UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

METODOLOGÍA PARA CALCULAR VOLÚMENES DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS LLUVIAS COMO RESPUESTA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN BOGOTÁ

Trabajo de grado presentado para optar por el título de Magíster en Ingeniería Civil

Autores

Rubiel Alberto López Mejía

Johanna Carolina Bain Loayza

Docente director

MSc. Eduardo Zamudio Huertas

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Facultad Tecnológica

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá D.C., Colombia

2025

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a nuestro director Eduardo Zamudio Huertas por su valiosa orientación, apoyo y confianza durante nuestro proceso de formación posgradual.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que han hecho posible este proyecto.

A nuestro proyecto curricular, La Maestría en Ingeniería Civil, en especial a su coordinador, el profesor Jorge Arturo Pineda-Jaimes por su constante seguimiento a los avances de este trabajo.

A nuestros compañeros de estudio, por los momentos de aprendizaje y apoyo mutuo en los desafíos abordados durante estos semestres.

Agradecemos a las entidades como IDEAM, IDIGER y EAAB por brindarnos la información requerida.

"La única forma de hacer un gran trabajo es amar lo que haces. Si no lo has encontrado, sigue buscando". Steve Jobs

DEDICATORIA

A todos aquellos que creen en el poder de la educación, la perseverancia y luchan por sus sueños.

A nuestras familias y amigos, quienes nos alentaron y motivaron a lo largo de este proceso. Su apoyo y compañía han sido fundamentales en este camino.

A Carolina Marín, por su paciencia infinita y su apoyo incondicional, pilares fundamentales en todo este proceso que ha sido la maestría.

A mi querido amigo Gustavo Adolfo García V., por estar siempre a mi lado en este viaje. Tu apoyo incondicional y tus palabras de aliento han sido mi luz en los momentos de duda.

¡Gracias!

Resumen

En el presente trabajo está enmarcado dentro de la línea de investigación de hidrología e hidráulica en el campo de la Ingeniería Civil. Se propone una metodología para el dimensionamiento de estructuras hidráulicas en edificaciones relacionadas con el aprovechamiento, almacenamiento y/o amortiguamiento de aguas lluvias. Para este fin se describen elementos teóricos, a partir del análisis de metodologías existentes de acuerdo con los criterios de construcción sostenible, certificaciones de sostenibilidad, normativa local y nacional, consejo colombiano de construcción sostenible, entre otras metodologías asociadas con el cálculo de estructuras hidráulicas de uso eficiente del recurso. Las principales fuentes de información fueron entidades tales como: El Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER), el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB). De acuerdo con la precipitación total diaria, y comparando varios modelos de variabilidad climática, se determina la presencia o ausencia del fenómeno de variabilidad climática en Bogotá, partiendo del análisis de regionalización de lluvias a partir de la metodología de extracción, imputación y generación cluster. Posteriormente se ejecutan pruebas de homogeneidad y estacionariedad para cada una de las estaciones de la zona de estudio – Bogotá D.C. Finalmente, se realiza un análisis comparativo entre algunos proyectos existentes con relación a la metodología desarrollada, con el fin de determinar la pertinencia de esta.

Palabras Claves: Modelación hidrológica, Cálculo de diseño, Estructuras hidráulicas, variabilidad climática, gestión integral del agua.

Abstract

This work is part of the hydrology and hydraulics research group in the field of civil engineering. A methodology is proposed for the sizing of hydraulic structures in buildings related to the use, storage, and/or buffering of rainwater. To this end, theoretical elements are described based on the analysis of existing methodologies in accordance with sustainable construction criteria, sustainability certifications, local and national regulations, the Colombian Sustainable Construction Council, and other methodologies associated with the calculation of hydraulic structures for the efficient use of resources. The main sources of information were entities such as the District Institute for Risk Management and Climate Change (IDIGER), the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), and the Bogotá Water and Sewer Company (EAAB). Based on total daily precipitation and comparing various climate variability models, the presence or absence of climate variability in Bogotá is determined by analyzing rainfall regionalization using the extraction, imputation, and cluster generation methodology. Homogeneity and stationarity tests are then performed for each of the stations in the study area – Bogotá D.C. Finally, a comparative analysis is conducted between some existing projects in relation to the developed methodology, to determine its relevance.

Key words: Hydrological modelling, Design calculation, Hydraulic structures, climate variability, integrated water management.

CONTENIDO

Resumen 4

Abstract 5

1 Introducción 10

1.1 Planteamiento del problema 12

2 Justificación 13

2.1 Pregunta de investigación 18

2.2 Hipótesis 19

3 Objetivos 19

3.1 Objetivo General 19

3.2 Objetivos Específicos 19

4 Estado del arte y antecedentes 20

5 Metodología 29

5.1 Área de estudio 29

5.2 Estaciones analizadas 31

5.3 Algoritmos estadísticos de variabilidad hidrológica 34

5.3.1 Imputación de Datos – Método IDW 35

5.3.2 Pruebas de Homogeneidad 35

5.3.3 Prueba de Tendencia y Estacionariedad 40

5.3.4 Método de Segmentación – Clustering de serie temporal 43

5.4 Metodologías de Cálculo de Volúmenes 48

5.4.1 Resolución 0330 de 2017 48

5.4.2 Norma EAAB NS-085 49

5.4.3 Uso de Fuentes Alternativas: Certificación CASA V3.0 50

5.4.4 Gestión de la Escorrentía: Certificación CASA V3.0 51

5.4.5 Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) 52

5.4.6 Gestión del Agua Lluvia: Metodología LEED – V4.0 52

5.4.7 Metodología de Gloud (1993) 53

6 Análisis y Resultados 53

6.1 Algoritmos estadísticos de variabilidad climática 54

6.1.1 Cargue e Imputación de Datos – Método IDW 54

6.1.2 Pruebas de Homogeneidad y Estacionariedad 55

6.1.3 Segmentación – Clustering de las series temporales 62

6.2 Modelo de Cálculo Propuesto 62

6.2.1 Obtención Información de lluvias diarias 62

6.2.2 Determinación de lluvias máximas 24 horas 63

6.2.3 Determinación de Curvas IDF método Vargas M.R. - Díaz-Granados O.M - Universidad de los Andes 63

6.2.4 Determinación de tiempos de concentración 63

6.2.5 Determinación de caudal pico de diseño 64

6.2.6 Determinación del Hidrograma unitario acorde al SCS 64

6.2.7 Determinación de volumen 64

6.3 Proceso de aplicación de la metodología 65

6.4 Aplicación de la metodología en proyectos existentes 67

6.4.1 Proyecto 1 – Centro comercial El Edén 67

6.4.2 Proyecto 2 – Centro de investigación contra el Cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo 74

7 Conclusiones 82

8 Recomendaciones 86

9 Bibliografía 88

Índice de Tablas

Tabla 1. Entidades públicas y estaciones vigentes (01/ enero/2013 - 31/diciembre/2023*)*.....31

Tabla 2. Coordenadas de estaciones.....32

Tabla 3. Resultados Pruebas de Homogeneidad de las precipitaciones mensuales.....55

Tabla 4. Resultados Pruebas de Estacionalidad de las precipitaciones mensuales 58

Tabla 9. Digitalización de datos información general Centro Comercial El Edén. 71

Tabla 10. Volumen estimado para el proyecto.....71

Tabla 11. Digitalización Datos Información General CTIC 79

Tabla 12. Volumen estimado para el proyecto.....79

Tabla 13. Digitalización Datos Información General CTIC solo cubierta Hospital 80

Tabla 14. Volumen estimado para el proyecto solo Cubierta Hospital.....80

1 Introducción

La seguridad hídrica es hoy una preocupación global, ya que de acuerdo con datos del Banco Mundial (BM) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), cerca de 2000 millones de personas en el mundo consumen agua contaminada patógenos fecales y 3.600 millones carecen de sistemas de saneamiento. Este déficit compromete la salud pública, favorece la propagación de enfermedades como el cólera, la fiebre tifoidea, la diarrea y la poliomielitis, y tensiona los sistemas de abastecimiento, cuya demanda crece a ritmo de la expansión demográfica y urbanización acelerado (Geraldo y Ghisi, 2017). A esta presión se suma la contaminación causada por actividades domésticas e industriales, que reduce la disponibilidad de agua potable y agrava la seguridad en el acceso (Duarte Arguello, 2021).

Frente a este panorama, la captación y el aprovechamiento de aguas lluvias emerge como una estrategia clave de adaptación. Diversos estudios evidencian que estos sistemas pueden suplir necesidades domésticas, agrícolas e industriales (Juez Pirachican, 2021; Mora Martínez, 2022). Al reutilizar el recurso hídrico, se alivia la demanda sobre los efluentes tanto superficiales como subterráneos y se refuerza la resiliencia de los territorios, especialmente en comunidades con recursos limitados (Acuña Domínguez & Fernández Adrián, 2022).

Pese a los avances en la gestión del recurso hídrico, las zonas periurbanas continúan presentando carencias en el abastecimiento de servicios hidrosanitarios, es decir, en la discontinuidad, sobrecostos y baja calidad que comprometen la habitabilidad en las regiones (Asprilla, Y. & González, M, 2016). Paralelamente, la regulación de la demanda urbana de agua potable exige herramientas como las propuestas por José Andelfo Lizcano-Caro (2020), capaz de anticipar patrones de consumo y diseñar medidas de eficiencia. Articular ambas perspectivas resulta clave para superar la visión tradicional centrada solo en la oferta. Puesto que, en otras ciudades como

Bruselas, también se han implementado normativas para promover el uso sostenible de los recursos hídricos y reducir el consumo de agua potable. Según Sánchez y Gómez (2022), uno de los factores clave en la consecución de estos objetivos es considerar la variabilidad climática y sus efectos directos en los fenómenos de escasez y exceso de agua. En este sentido, Enríquez et al. (2022) destacan que las inundaciones, exacerbadas por la mayor densificación urbana y el incremento de superficies impermeables, son ahora una de las principales preocupaciones en la gestión del agua. Además, Pérez-Ortiz et al. (2022) subrayan la importancia de analizar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación para tomar decisiones informadas en las cuencas hidrográficas. Las proyecciones globales del cambio climático, según Pino-Vargas et al. (2022), estiman impactos negativos en los sistemas hidrológicos, lo que afectaría directamente los regímenes de precipitación y temperatura en varias regiones del mundo.

En Colombia, los desafíos son notorios dado a que cerca del 50% de la población urbana sufre de inestabilidad en el suministro debido a la contaminación de los efluentes superficiales y el 80% de los municipios depende de corrientes cuya oferta se reduce en épocas de estiaje (IDEAM; Suarez et al,2006). Ante esta situación, las nuevas edificaciones incorporan cada vez más estructuras de captación pluvial, en consonancia con la NTC 1500, la Resolución 0549 de 2015 y la Resolución 0330 de 2017, mientras que la certificación LEED otorgada por el Consejo de Construcción Sostenible de Estados Unidos (USGBC, 2014), impulsa las buenas prácticas de diseño ya existente en más de 500 proyectos registrados en el país (Flórez, 2013).

Por ello, este documento propone una metodología estandarizada para calcular y dimensionar tanques de aprovechamiento de aguas lluvias en Bogotá, incorporando la variabilidad climática local, con el objetivo de reducir la incertidumbre en el dimensionamiento de estructuras tipo SUD, disminuir el consumo de agua potable, mejorar la disponibilidad en épocas de sequías y

atenuar los picos de caudal durante las tormentas, con énfasis a las zonas urbanas y periurbanas vulnerables. La estructura del documento está dada por ocho capítulos: El capítulo 1 – Introducción, delimita el problema y justifica la pertinencia del estudio. El capítulo 2 – Justificación, analiza la escasez hídrica mundial, la situación colombiana y los lineamientos de sostenibilidad que impulsa la captación pluvial. El capítulo 3 plantea los objetivos a desarrollar. El capítulo 4 – Estado del arte, presenta conceptos, normatividad y criterios técnicos. El capítulo 5 – Metodología, describe la metodología utilizada para la caracterización hidrológica, el dimensionamiento y el cálculo de estructuras de amortiguamiento de precipitaciones. El capítulo 6 – Análisis y resultados, presenta los resultados obtenidos a partir de las pruebas, modelos evaluados y su validación. El capítulo 7 – Conclusiones, sintetiza los hallazgos y desataca la contribución de la propuesta a la gestión integral del recurso hídrico. Finalmente, el capítulo 8 – Recomendaciones, se proponen líneas de acción para futuros proyectos, políticas públicas y/o nuevas investigaciones.

1.1 Planteamiento del problema

Bogotá enfrenta un reto relacionado con la implementación de estratégicas para gestionar la creciente demanda de abastecimiento de agua potable y la variabilidad del recurso hídrico en un contexto de urbanización acelerada, comprometiendo la sostenibilidad y gobernanza del agua en la capital colombiana. Lo anterior genera incertidumbre en el diseño de sistemas de almacenamiento de aguas lluvias. Adicionalmente la falta de metodologías que integren información histórica de precipitaciones y criterios de sostenibilidad impiden determinar estimaciones precisas del volumen necesario para tales estructuras. Así entonces, esta propuesta parte de la necesidad de desarrollar una metodología que incorpore la dinámica climática de Bogotá en los modelos de diseño, de modo que se disminuya la incertidumbre en el dimensionamiento de tanques y dispositivos de aprovechamiento de aguas lluvias y se favorezca una gestión hídrica sostenible.

2 Justificación

El agua desempeña un papel central en el desarrollo sostenible, al ser esencial para el progreso socioeconómico, la generación de energía, la producción de alimentos, el mantenimiento de los ecosistemas y la supervivencia humana. Además, es un componente clave en la adaptación al cambio climático, ya que actúa como un vínculo decisivo entre la sociedad y el medio ambiente (Naciones Unidas, 2023).

El acceso al agua es un derecho fundamental que debería ser garantizado para todos los seres humanos; sin embargo, su disponibilidad no llega a toda la población mundial. Por esta razón, dentro de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, se establecen metas y estrategias para abordar esta problemática. Entre ellas se incluyen el aumento del uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores, así como asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para enfrentar la escasez. Además, se busca reducir significativamente el número de personas que sufren de falta de agua y promover la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles. También se enfatiza el fortalecimiento de la participación de las comunidades locales en la mejora de la gestión del agua y el saneamiento, como parte de los objetivos a cumplir para el año 2030.

Actualmente el agua disponible para consumo humano es cada vez menor, esto a pesar de ser un recurso renovable, además, según Canaza-Choque et al, 2023:

> En lo que va del tiempo, se ha evidenciado una disminución en la disponibilidad de agua, actualmente asociado a la creciente presión del cambio climático (CC) y a la demanda

> exponencial por parte de la población, la tecnología y la industria, y de múltiples intereses en cuanto a su uso que, en ocasiones, están por encima del recurso y de un problema sustancialmente referenciado a la calidad del recurso hídrico que permita una vida saludable en los diversos ámbitos del desenvolvimiento social, adicionalmente también se puede asegurar que esta crisis también va ligada a los altos niveles de contaminación y la explotación excesiva. (Canaza-Choque et al, 2023, pp 556)

De acuerdo con Juez Pirachican (2021), el agua tiene una variedad de usos esenciales para la vida humana y el progreso continuo de diversas actividades, incluyendo el uso doméstico, agrícola, pecuario, recreativo e industrial. Es fundamental resaltar su relevancia en la salud pública. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 71% de la población mundial tiene acceso a agua potable en condiciones adecuadas de cantidad y calidad en el lugar de uso. Sin embargo, 844 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, y 2.000 millones dependen de fuentes de agua contaminada con heces, lo que contribuye a la propagación de enfermedades como cólera, fiebre tifoidea, diarrea y poliomielitis. Además, se estima que para 2025, al menos el 50% de la población mundial vivirá en áreas afectadas por escasez de agua.

Suárez et al. (2006) señalan que cerca del 50% de la población urbana en Colombia enfrenta dificultades en el suministro de agua, lo cual está relacionado con la creciente presión sobre las cuencas hidrográficas y las restricciones impuestas por la contaminación de las fuentes de agua superficiales. Este problema se ve aún más agravado por el hecho de que más del 80% de las cabeceras municipales dependen de pequeños riachuelos o quebradas, lo que pone en riesgo el abastecimiento, particularmente durante los períodos de estiaje.

A pesar de que Colombia cuenta con una gran riqueza hídrica, la mayoría de las poblaciones dependen de fuentes superficiales de agua como embalses, ríos, lagos y quebradas (Suárez et al., 2006). Sin embargo, la facilidad de acceso a estos recursos ha reducido el impulso para el desarrollo de tecnologías alternativas para el abastecimiento, como el aprovechamiento de agua lluvia. Aunque algunas comunidades con dificultades en el acceso a agua potable han implementado sistemas para recolectar agua de lluvia, la mayoría de estos sistemas son poco tecnificados, lo que afecta la calidad del agua y la eficiencia de su uso.

Ante todo, este panorama referente a la falta de disponibilidad de agua para usos domésticos y no domésticos, el aprovechamiento de aguas lluvias se puede presentar como una alternativa para el ahorro y reúso en usos donde no se requiere agua potable como puede ser, sanitarios, lavado de fachadas, lavado de zonas duras, orinales y riego, Según Suárez et al. (2006). A lo largo de la historia, diversas civilizaciones han utilizado diferentes métodos para la captación de agua de lluvia. Sin embargo, estas tecnologías no han sido objeto de estudio y documentación formal hasta tiempos recientes. Al observar la distribución de restos de estructuras dedicadas a la recolección de agua de lluvia en diversas partes del mundo, así como el uso continuado de estas prácticas, se puede concluir que las técnicas de captación de agua de lluvia han sido fundamentales tanto para la producción agrícola como para satisfacer las necesidades domésticas, especialmente en las regiones áridas y semiáridas del planeta.

En la actualidad, a nivel normativo se tienen diferentes requerimientos partiendo desde la norma NTC1500 (norma técnica de instalaciones hidráulicas y sanitarias), la resolución 0549 de 2015 (guía de construcción sostenible), a nivel distrital la norma NS-085 de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y la resolución 0330 de 2017 (reglamento técnico para el

sector del agua y saneamiento básico – RAS). Adicionalmente se tiene la guía de Gestión integral del Agua en edificaciones del consejo colombiano de construcción sostenible (CCCS), y las diferentes certificaciones de construcción sostenible como lo son LEED; CASA y EDGE. Debido a esto, cada nuevo proyecto en fase de planeación y diseño debe considerar la posibilidad de generar un aprovechamiento de aguas lluvias para uso dentro de la misma edificación o simplemente para un amortiguamiento en caudales pico y así aportar a no colapsar los sistemas de alcantarillado de la ciudad. Sin embargo, para definir estos volúmenes no se cuentan con metodologías claras de cálculo, por lo cual se hace vital contar con una metodología estándar, comprobada, clara y aplicada para poder definir estos volúmenes de aprovechamiento y/o amortiguamiento.

Según Sánchez Gómez (2022):

> El clima es uno de los factores ambientales principales que tiene incidencia en diferentes aspectos, ya sea de manera recurrente o cíclica; los efectos del clima ocasionan impactos en diversas formas, grados y magnitud, estos procesos se han venido dando de manera frecuente a largo de la historia de la humanidad, las fluctuaciones que generan estos procesos naturales se les denomina variabilidad climática, además; a través del tiempo el clima ha presentado fluctuaciones o cambios en sus ciclos climatológicos (temperatura y precipitación) los cuales se han ido alterando por encima o por debajo del promedio normal, estos cambios ocasionan impactos severos sobre la humanidad y el ambiente. (Sánchez Gómez, 2022, pp 15)

Teniendo en cuenta esto, uno de los factores fundamentales para la consideración del amortiguamiento de aguas lluvias es el régimen de precipitaciones de la zona de estudio, esto

ligado a toda la hidrología del sector la cual se ve directamente afectada por fenómenos de cambio climático o variabilidad climática, ya que sin considerar esto se pueden proyectar volúmenes de almacenamiento que no cumplan con los requerimientos reales del proyecto.

El análisis de la variabilidad climática debe basarse en la recolección y el procesamiento de datos hidrometeorológicos de la zona de estudio, lo cual incluye la depuración de la información y la aplicación de metodologías estadísticas, como las series de tiempo, tal como lo señalan Arrieta et al. (2022). Estos análisis permiten determinar los efectos de dicha variabilidad en las tormentas de diseño. A partir de estos resultados, y mediante la identificación de diversas metodologías existentes para el cálculo del aprovechamiento de aguas lluvias, es posible estimar un volumen óptimo que maximice la relación beneficio/costo en los distintos proyectos de edificación en la ciudad de Bogotá.

Según Poveda & Álvarez (2012), las metodologías usadas tradicionalmente en la ingeniería hidrológica para la determinación de caudales extremos y/o de diseño de distintos períodos de retorno se basan en el planteamiento de estacionariedad teniendo como base la función de distribución de probabilidades de las series de caudales extremos. Dicha hipótesis puede llegar a no ser válida ante los posibles efectos del cambio climático, la variabilidad climática, la deforestación, la erosión de los suelos y los cambios en el uso del suelo, considerando la dinámica hidrológica reflejada en los registros de las variables estudiadas en la ingeniería.

Adicionalmente es importante mencionar que para el correcto desarrollo de la metodología esta se realizará mediante el análisis documental de estudios sobre variabilidad climática como el desarrollado por Bocanegra, 2009. Allí nos brinda la información necesaria para entender el comportamiento climatológico que influye en la variabilidad climática de las precipitaciones en

nuestro país, junto con las diferentes dinámicas y tendencias del efecto del cambio climático descrito por CEPAL, 2011. Estos comportamientos son importantes para la presente investigación, ya que de esta forma se podrán identificar patrones que, mediante análisis estadísticos y de series de tiempo, permitirán denotar el comportamiento de régimen de precipitación en Bogotá con relaciones a otros parámetros estadísticos asociados.

Así mismo, es importante destacar que las metodologías de regionalización enfocadas en regresiones lineales multivariadas entre los caudales extremos y algunas características hidrográficas de las cuencas no se centran en el entendimiento e ignoran la complejidad de los fenómenos emergentes, extremos y no lineales que se desarrollan en las cuencas hidrológicas (Poveda & Álvarez, 2012).

Finalmente, es importante destacar que este estudio proporcionará herramientas útiles para atender las necesidades actuales en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (CEPAL, 2018), particularmente en lo relacionado con el ODS 11, que busca garantizar ciudades y comunidades sostenibles. En este contexto, resulta fundamental que las edificaciones cuenten con certificaciones en distintas categorías de sostenibilidad. Dentro de estos diseños, se vuelve indispensable la incorporación de sistemas para el aprovechamiento y/o amortiguamiento de aguas lluvia, así como el uso de metodologías claras y aplicables.

2.1 Pregunta de investigación

Es importante aclarar que el interés de esta investigación es el de responder a la pregunta: "*¿Cómo podrían adaptarse los cálculos de volúmenes en el amortiguamiento y/o aprovechamiento del agua lluvia al comportamiento de variabilidad climática presente en Bogotá D.C., Colombia?*

2.2 Hipótesis

Los análisis de la variabilidad climática en la ciudad de Bogotá y su inclusión en los cálculos de las estructuras hidráulicas destinadas al almacenamiento y/o aprovechamiento de aguas lluvias, permite disminuir la incertidumbre y a su vez optimizar los diseños en distintos tipos de edificación que repercuten en reducción de costos, mejores sistemas de ahorro de agua potable, cumplimiento normativo y posibilidad de obtención de certificaciones de sostenibilidad.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Determinar la influencia de la variabilidad climática en la ciudad de Bogotá y su efecto en los cálculos de volúmenes de aprovechamiento de aguas lluvias, orientados a la disminución de la incertidumbre en el dimensionamiento de estructuras hidráulicas.

3.2 Objetivos Específicos

- Aplicar modelos de machine learning y estadística para regionalizar los datos pluviométricos.
- Analizar la dinámica temporal y espacial de la precipitación en Bogotá mediante series de tiempo y métodos de segmentación.
- Desarrollar una metodología para el cálculo de volúmenes de aprovechamiento y/o amortiguamiento de aguas lluvias en cualquier tipo de edificación teniendo en cuenta las metodologías de cálculo utilizadas en la actualidad.
- Validar la metodología definida en dos tipos de edificaciones en funcionamiento.

4 Estado del arte y antecedentes

Desde sus inicios, el ser humano ha recurrido al agua superficial como su principal fuente de abastecimiento, consumo y transporte, lo que llevó a las primeras civilizaciones a establecerse en los valles fluviales. En estos lugares, el hombre aprendió a domesticar los cultivos, lo que le permitió descubrir la primera aplicación del agua de lluvia. Sin embargo, no dependía exclusivamente de ella para sobrevivir, ya que siempre contaba con agua superficial disponible. A medida que las civilizaciones crecieron y algunos pueblos comenzaron a habitar áreas áridas o semiáridas, se empezó a desarrollar la captación de agua de lluvia como una alternativa para el riego agrícola y el consumo doméstico (Suárez et al., 2006).

Según Liaw & Chiang (2014), el concepto de recolección de agua de lluvia consiste en el proceso de captar, almacenar y utilizar el agua de lluvia como fuente hídrica principal o complementaria. Los sistemas de captación de agua de lluvia tienen una larga historia. Hay ejemplos de sistemas que se remontan al año 2000 ac en Roma, Oriente Medio, África, India y China. De hecho, se pueden encontrar casos de recolección de agua de lluvia en la mayoría de las áreas del mundo.

Los usos de la recolección de agua de lluvia se han destacado como una posible fuente alternativa de agua. Pese a no ser fenómenos recientes, los sistemas de captación de agua de lluvia han sido estudiados con mayor intensidad en los últimos tiempos, especialmente en regiones alejadas de las redes de suministro o en situaciones de escasez crónica de suministro (Fioramonte et al., 2022).

La captación de agua de lluvia es un proceso fácil por el cual es posible obtener agua para consumo humano y/o uso agrícola. En diferentes lugares del mundo con variaciones entre alta

o media precipitación y donde no se tiene facilidad de una gran cantidad de captación de agua y sin la calidad necesaria para consumo humano, es común que se recurra al agua de lluvia como fuente de abastecimiento. Teniendo en cuenta esto, el agua de lluvia es captada, transportada y almacenada en depósitos para su posterior uso (CEPIS, 2004).

Además, la práctica de la recolección de agua de lluvia se ha estudiado ampliamente en los últimos años, ya que tiene el potencial de aliviar parte del estrés creciente en los sistemas de distribución de agua urbana y redes de drenaje. Dentro del campo, está surgiendo un enfoque de control en tiempo real del almacenamiento de agua de lluvia como un método para mejorar la capacidad de los sistemas de recolección de aguas lluvias para reducir la escorrentía y los flujos de drenaje urbano (Snir et al., 2022).

De igual manera, Borrero et al. (2007) asegura que, hoy en día, el papel del agua lluvia en las ciudades se está replanteando. En efecto, el agua lluvia está pasando de considerarse un desecho, del cual hay que deshacerse lo antes posible, a considerarse un recurso. La recolección de aguas lluvias para usos domésticos representa una práctica interesante, tanto económicamente para el consumidor como ambientalmente para el planeta.

Un sistema de recolección de agua de lluvia a pequeña escala es una gran unidad para ahorrar y almacenar agua de lluvia acumulada de techos, jardines u otras superficies impermeables. Además, el agua ahorrada puede reciclarse para usos domésticos no potables. Estos sistemas proporcionan una fuente alternativa de suministro de agua y tienen el beneficio adicional de reducir y retener la escorrentía, por lo tanto, mitigar el desbordamiento de los sistemas de drenaje de aguas pluviales y la posibilidad de inundación. Sin embargo, estos sistemas son utilizados con poca frecuencia, a pesar de los hallazgos positivos que se han informado en la literatura

científica; esto puede deberse en parte a la falta de confianza y conocimiento de los usuarios con respecto a la efectividad de sistemas de captación de agua (Fonseca et al., 2017).

En la actualidad, muchas poblaciones alrededor del mundo siguen enfrentando dificultades en el abastecimiento de agua, principalmente debido al constante crecimiento poblacional y la migración de las personas de áreas rurales a urbanas. A esto se suman factores como el aumento de la demanda de seguridad alimentaria y bienestar económico, la intensificación de la competencia entre diferentes usuarios y usos del agua, y el grado de contaminación proveniente de actividades industriales, municipales y agrícolas (Palacio Castañeda, 2010).

Según Juez Pirachican (2021),

> Aunque en los diferentes trabajos de investigación se han desarrollado métodos para el dimensionamiento del volumen óptimo para el almacenamiento de aguas lluvias, en la práctica de la ingeniera no se procede a utilizar estos métodos, y el cálculo se hace a partir de una aproximación conceptual del método racional sin contemplar aspectos como el balance entre oferta y demanda, así como el análisis de costos. Esto conlleva a que se presente fallas en el dimensionamiento adecuado en general por defecto, siendo insuficiente para captar un porcentaje importante de lluvias y provocando rebose y posteriormente inundaciones. (Juez Pirachican, 2021, pp 17)

Dentro de las investigaciones encontradas relacionadas con el presente proyecto se evidenciaron diferentes métodos y enfoques, desde los cuales se puede identificar soluciones puntuales a edificaciones tipo doméstico, comercial, educativas, aeroportuarias y gubernamentales. Sin embargo, estos enfoques siempre se realizan como casos de estudio y no son dirigidos a brindar una solución general para enfrentar la determinación de los volúmenes para tanques tormenta

requeridos de para el aprovechamiento y/o amortiguamiento de aguas lluvias en cualquier tipo de edificación. Así mismo, también se ha podido observar que los conceptos de variabilidad climática se han enfocado en realizar análisis espaciales a nivel nacional, departamental y en ocasiones a nivel de cuencas de ríos principales; sin embargo, no se enfocan en un análisis detallado de una edificación o áreas de estudio puntual.

Por ejemplo, para el proyecto realizado por Borrero et al. (2007), se realizó un balance hidrológico para el área de drenaje del campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). Dicho análisis se centró en determinar la lámina de agua lluvia acumulada mensual en mm, teniendo en cuenta la información pluviométrica registrada por el Instituto Geofísico de la Universidad entre 1951 y 1992. Considerando lo anterior, en el estudio indicado se plantearon tres escenarios (mínimo, promedio y máximo) de la posible oferta hídrica mensual en la universidad, de manera que se pudiera tener en cuenta la variabilidad de la información disponible. Teniendo en cuenta estos datos de lluvia y con la información de los diferentes tipos de superficies del campus, y teniendo en cuenta los valores de coeficientes de escorrentía de las diferentes superficies, se calculó la oferta en términos de volumen según el método racional para cada mes y cada escenario planteado.

En la investigación llevada a cabo por Juez Pirachican (2021), se propone una aproximación detallada hacia un método estándar para el cálculo del dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias, fundamentado en el modelo de oferta y demanda YAS - Yield After Spillage, el cual ha sido ampliamente utilizado en una gran cantidad de investigaciones previas, especialmente en aplicaciones domésticas. Este modelo permite una evaluación precisa de la disponibilidad de agua en función de la captación de lluvia y la demanda de la población.

Tras realizar diversos análisis y estudios de casos específicos, la investigación sugiere la aplicación de modelos matemáticos para optimizar los sistemas de almacenamiento de agua, con el objetivo de mejorar su eficiencia y rendimiento en situaciones prácticas. En este contexto, se lleva a cabo una evaluación detallada de dos sistemas existentes, con el propósito de validar la efectividad y precisión del método propuesto. Sin embargo, uno de los aspectos que no se aborda completamente en este estudio es la variabilidad climática del sector de estudio. Aunque el modelo es eficaz para calcular los volúmenes de almacenamiento en condiciones estándar, no se tiene en cuenta cómo las variaciones climáticas, tales como las fluctuaciones en la cantidad y distribución de las precipitaciones, pueden impactar significativamente en los cálculos finales de los volúmenes requeridos para el almacenamiento y, en consecuencia, en la efectividad general del sistema de captación de aguas lluvias.

Otro enfoque investigado, es el planteado por (Melo Niño, 2018), en el cual la metodología de cálculo para obtener los volúmenes de almacenamiento de aguas lluvias se fundamentó en tres (3) métodos de cálculo hidrológico los cuales son: el método racional a partir de curvas IDF realizadas por el IDEAM y la EAAB, el método de bloque alterno y la metodología de cálculo descrita en la guía de diseño para captación del agua de lluvia publicada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). En este documento se centran en realizar una evaluación puntual de los tanques de almacenamiento de aguas lluvias existentes en el aeropuerto el Dorado.

Sin embargo, estos resultados pueden ser diversos debido a las disparidades que existen entre los métodos de cálculo determinados en la normativa local, ya que según (Rojas et al, 2015), Determinar el grado de incertidumbre de un modelo o la precisión del modelo respecto al

fenómeno real, requiere necesariamente la medición del parámetro resultante y comparar dicho valor con el calculado.

Además de lo mencionado anteriormente, a nivel Bogotá se registran varias edificaciones que han implementado tanques de aprovechamiento y/o amortiguamiento de agua lluvia, como lo son Alkosto Venecia, centro comercial Paseo Villa del Río, centro comercial El Edén y la Fundación de Investigación Contra el Cáncer – CTIC, en los cuales se han empleado diferentes metodologías de cálculo ligadas a las empresas diseñadoras de redes hidrosanitarias.

Dentro de los análisis metodológicos consultados se ha evidenciado que se limitan a tener una información que parte de entidades públicas como puede ser el IDEAM o las empresas de acueducto de las diferentes ciudades, sin embargo no tienen presente los efectos directos que se pueden presentar en los regímenes de precipitación debido a la posible variabilidad climática en los sectores de estudio, temas el cual toma gran importancia debido a que, según SÁNCHEZ GÓMEZ (2022) “La variabilidad climática es un fenómeno natural que forma parte del sistema terrestre; sin embargo, en las últimas décadas, su intensidad se ha visto acentuada por la influencia de actividades antrópicas. Esta variabilidad no se manifiesta únicamente en el aumento de la temperatura global, sino que presenta impactos diferenciados según la región. Entre estos efectos se incluyen eventos como vientos intensos, precipitaciones en forma de nieve o granizo, incrementos en la humedad o condiciones de aridez. En particular, las zonas costeras evidencian una intensificación del ciclo hidrológico como consecuencia de estos cambios”.

Según Nie et al. (2023), en las últimas décadas, especialmente en los últimos 20 años, se han realizado muchos estudios sobre las tendencias de la precipitación y la escorrentía y sobre la

relación entre precipitación y escorrentía, como las características espaciotemporales de los eventos extremos de precipitación.

Adicionalmente, Liu et al. (2020) afirma que uno de los métodos comunes para analizar series temporales de datos meteorológicos e hidrológicos es comprobar la presencia o ausencia de tendencias en los mismos causadas por cambios naturales graduales y el cambio climático debido a las actividades humanas. Teniendo en cuenta esto, según Lizcano et al (2020), Antes de 1985, el clima se consideraba una variable independiente. Sin embargo, diversos estudios llevaron a la necesidad de modelarlo, lo cual se logró en 2005 mediante el método ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), que incorpora variables climáticas. Este método permitió realizar aproximaciones más precisas en comparación con las regresiones lineales o métodos univariados utilizados anteriormente.

Así mismo, Lornezhad et al. (2023) indica que las pruebas de determinación de tendencias se dividen en dos tipos, pruebas paramétricas y no paramétricas. La ventaja de una prueba no paramétrica sobre una prueba paramétrica como la prueba ***t*** es que la prueba no paramétrica es adecuada para series temporales que no tienen una distribución estadística normal y también para datos que son faltantes u omitidos. Por otra parte, la prueba de Mann-Kendall es una prueba no paramétrica que constituye un método estadístico adecuado para demostrar la existencia de una tendencia en series hidrológicas. En los últimos años, muchos investigadores han utilizado esta prueba como la mejor opción para comprobar la existencia de cambios estacionales y anuales en el caudal de ríos, arroyos y precipitaciones en las cuencas.

Teniendo en cuenta esto, se revisaron estudios relacionados a la variabilidad climática entre los cuales se puede destacar el artículo “Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la

precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia" (Pérez-Ortiz et al., 2022), cuya metodología consistió en la estimación de datos faltantes, estimación de anomalías de precipitación y comparación de diversos índices como ONI, SOI y EMI y el análisis espacial y temporal de la precipitación. Durante los años de estudio, 1972 a 2016, se observó una disminución del 10% de las lluvias en la zona alta de la cuenca del río Cali, con una tendencia negativa; además, se comprobó que los meses de mayo y agosto son más susceptibles a eventos de precipitación extremos en periodos del fenómeno ENOS.

Diversos estudios relacionados indican que son escasos los trabajos enfocados en la aplicación de la variabilidad climática como herramienta de apoyo en los sistemas de gestión hídrica, particularmente en el contexto de los procesos de ordenamiento y gestión de cuencas. A pesar de esto, se reconoce que la gestión integrada de los recursos hídricos requiere un enfoque sectorial diferenciado, que sea capaz de responder de manera efectiva a las diversas necesidades de la sociedad. Esto se logra mediante la creación de un nuevo modelo de gestión multipropósito, que se base en la colaboración a través de acciones comunes de planificación y gestión integrada de cuencas hidrográficas, además de la incorporación de usos múltiples del agua. Según Ruiz-Ochoa et al. (2022), este enfoque tiene el potencial de mejorar la eficacia en la administración de los recursos hídricos, considerando la diversidad de intereses y necesidades de las comunidades, la agricultura, la industria y otros sectores que dependen del agua.

Teston et al. (2022) asegura que en los diseños de los sistemas de captación de aguas de lluvias es relevante considerar el cambio climático, ya que los datos de lluvia son esenciales para calcular la capacidad de los tanques de almacenamiento. Diversos estudios demostraron que las series de 10 años de datos de lluvia diaria podrían ser suficientes para dimensionar los tanques

de agua de lluvia. En este contexto, se sugiere que futuras investigaciones evalúen no solo el impacto del tamaño de la serie de datos, sino también el impacto que genera el cambio climático en el diseño de sistemas de captación de agua de lluvia. También es fundamental resaltar la importancia de futuras investigaciones que evalúen el impacto de las variables de diseño en el desempeño de los sistemas de captación de agua de lluvia. En estos estudios es necesario considerar series de datos de precipitaciones previstas sin descuidar el cambio climático.

Diversos estudios han documentado múltiples metodologías para el cálculo de caudales y, en consecuencia, de los volúmenes de aprovechamiento y/o amortiguamiento de agua lluvia en edificaciones. Sin embargo, la mayoría de estas investigaciones se centran en resolver problemáticas específicas de casos de estudio particulares, sin proponer una solución estandarizada que pueda ser utilizada como herramienta en la planificación, diseño y construcción de sistemas de captación de aguas lluvias aplicables a diferentes tipologías de edificaciones. Además, se observa que los datos de precipitación empleados en dichos estudios provienen, en su mayoría, de fuentes secundarias y se limitan a registros anuales, sin incorporar un análisis detallado de la variabilidad climática reciente ni de los efectos diferenciados de los distintos tipos de precipitación sobre los cálculos realizados. En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo desarrollar una metodología general estandarizada que considere las variaciones en los patrones de precipitación, permitiendo su aplicación en cualquier tipo de edificación. Asimismo, busca ofrecer una herramienta útil tanto para estudios de prefactibilidad como para la evaluación posterior de la efectividad de sistemas de captación ya implementados.

5 Metodología

5.1 Área de estudio

La ciudad de Bogotá D.C., capital de Colombia, se encuentra en la región Andina, en el centro del país, como se evidencia en la Figura 1. *Área de estudio*. Está rodeada de cerros y se ubica a una altitud de 2.640 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una temperatura promedio anual de 13,3°C. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, Bogotá presenta un clima Cfb (Clima oceánico de la costa oeste), caracterizado por temperaturas moderadas y un régimen de lluvias bimodal. Este régimen incluye dos temporadas lluviosas, de marzo a junio y de septiembre a diciembre, así como dos temporadas secas, de enero a abril y de julio a agosto (Weatherbase, 2024). En cuanto a su hidrografía, las principales cuencas que tributan al río Bogotá son: el río Tunjuelo, que atraviesa la ciudad y abastece los embalses de la Regadera y Chisacá; el río Salitre, también conocido como arzobispo o Juan Amarillo, que nace en los cerros orientales a más de 3000 msnm y cruza diversas quebradas como Las Delicias, Los Molinos y El Chicó, entre otras; el río Fucha, que drena la zona central de Bogotá, recorriendo el sureste hasta la zona industrial en el oeste. En total, estas cuencas albergan aproximadamente 198 cuerpos de agua, entre ellos quebradas, ríos, canales y el sistema de 15 humedales: Humedal Córdoba, El Burro, Jaboque, Juan Amarillo, La Conejera, La Isla, La Vaca, Meandro del Say, Santa María del Lago, El Salitre, Techo, Tingua Azul, Tibanica, Torca y Guaymaral, Hyntiba – Escritorio y El Tunjo (Ambiente, 2024).



Figura 1. Área de estudio

Bogotá está conformada por 20 localidades, tal como se evidencia en la Figura 2. *Localización de las localidades de Bogotá D.C.*: Usaquén, Chapinero, Santa Fe, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá, Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los Mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, La Candelaria, Rafael Uribe Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz.

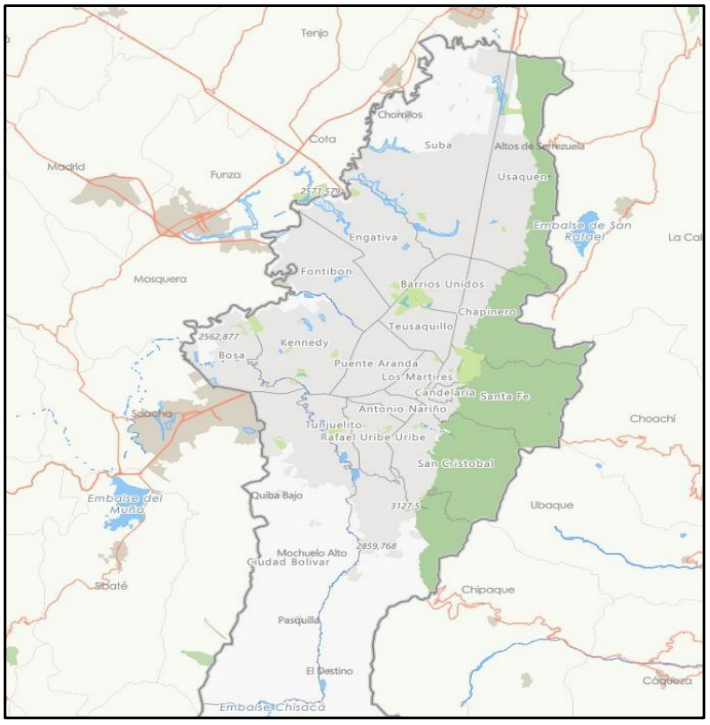


Figura 2. Localización de las localidades de Bogotá D.C. (Bogotá, 2024)

5.2 Estaciones analizadas

En la presente investigación, los datos de precipitación diaria en la ciudad de Bogotá se obtuvieron a partir de información suministrada por 3 entidades: EAAB, IDEAM e IDIGER, como se presenta en la Tabla 1. *Entidades públicas y estaciones vigentes (01/ enero/2013 - 31/diciembre/2023)*:

Tabla 1. *Entidades públicas y estaciones vigentes (01/ enero/2013 - 31/diciembre/2023)*

Entidad	Estaciones en red en Datos Abiertos	Estaciones Analizadas
EAAB	27	27
IDEAM	16	16
IDIGER	72	13
Total	**115**	**56**

Nota. Fuente. Autores

De las 115 estaciones disponibles en el catálogo Nacional de Estaciones Pluviométricas, 56 se seleccionaron dada la condición de temporalidad escogida entre enero 1 de 2013 a diciembre 31 de 2023; las cuales corresponden a registros de precipitación total diaria. La geolocalización de las estaciones se presenta en la Tabla 2. **Coordenadas de estacione**, en coordenadas planas MAGNA-BOGOTÁ y coordenadas geográficas WGS-84 y en la Figura 3. *Localización de las estaciones analizadas*.

Tabla 2. Coordenadas de estaciones

Estación	Estación	Entidad	Norte (m)	Este (m)	Latitud (°)	Longitud (°)
Australia	E1	IDEAM	977668.01	993951.66	4.394	-74.132
Inem Kennedy	E10	IDEAM	1007177.90	993645.67	4.661	-74.135
Jardín Botánico	E11	IDEAM	1008086.90	997208.56	4.669	-74.103
Colegio Miguel A. Caro	E12	IDEAM	1023992.40	1005146.80	4.813	-74.031
San Cayetano	E13	IDEAM	991214.28	998810.95	4.517	-74.088
UDCA	E14	IDEAM	1022385.70	1003082.30	4.799	-74.050
Estación Paraíso	E15	IDIGER	1003513.90	1002086.90	4.628	-74.059
Estación Guadalupe	E16	IDIGER	999487.69	1002529.70	4.592	-74.055
Estación Juan Rey	E17	IDIGER	991431.82	998761.26	4.519	-74.089
Estación Micaela	E18	IDIGER	989438.03	999002.06	4.501	-74.087
Estación la Esperanza	E19	IDIGER	983737.64	996624.66	4.449	-74.108
Villa Teresa	E2	IDEAM	972774.98	991953.29	4.350	-74.150
Estación Pasquilla	E20	IDIGER	983443.00	991417.26	4.446	-74.155
Estación Quiba	E21	IDIGER	994129.35	991288.44	4.543	-74.156
Estación Molinos	E22	IDIGER	995246.93	996628.47	4.553	-74.108
Los Taques	E23	IDEAM	955819.84	987405.91	4.197	-74.191
Nueva Generación	E24	IDEAM	1020570.30	998133.46	4.782	-74.094
San Juan	E25	IDEAM	974044.28	937504.66	4.033	-74.311
Santa María de Usme	E26	IDEAM	987294.66	994587.43	4.481	-74.126
Estación UAN Usme	E27	IDIGER	987318.37	994498.40	4.482	-74.127
Estación Colegio Sierra Morena Sede A (IED)	E28	IDIGER	997606.22	989720.85	4.575	-74.170
Estación Independencia Río Tunjuelo	E29	IDIGER	1002552.00	987008.06	4.619	-74.195
Estación UAN Circunvalar	E3	IDIGER	1004341.10	1002224.50	4.635	-74.057

Estación Vitelma	E30	EAAB	997671.91	1000638.90	4.575	-74.072
Bosa Barreno	E32	EAAB	1001914.70	988072.38	4.614	-74.185
Fontibón	E33	EAAB	1007082.40	992526.98	4.660	-74.145
Casablanca	E34	EAAB	998376.70	990428.36	4.582	-74.164
Santa Lucia	E35	EAAB	997549.68	995080.34	4.574	-74.122
El Delirio	E36	EAAB	994729.65	1002120.30	4.549	-74.058
San Diego	E37	EAAB	1001499.60	1001390.30	4.610	-74.065
Cama Vieja	E38	EAAB	1003579.60	998480.36	4.629	-74.091
San Luis	E39	EAAB	1005379.60	1004130.40	4.645	-74.040
UNAL	E4	IDEAM	1004536.80	998733.73	4.637	-74.089
Casa de Bombas Salitre	E40	EAAB	1009949.60	999770.39	4.686	-74.080
Cerro de Suba	E41	EAAB	1013540.60	999137.41	4.719	-74.085
Usaquén Santa Ana	E42	EAAB	1010241.60	1005804.40	4.689	-74.025
Serrezuela	E43	EAAB	1018599.60	1007000.40	4.764	-74.014
La Conejera	E44	EAAB	1019499.60	1000500.40	4.773	-74.073
La Caro	E45	EAAB	1029049.50	1005790.50	4.859	-74.025
Las Huertas	E46	EAAB	999099.74	981400.39	4.588	-74.245
Guadalupe	E47	EAAB	999429.64	1002520.30	4.591	-74.055
Juan Rey	E48	EAAB	991779.68	999260.31	4.522	-74.084
IDEAM Centro	E5	IDEAM	1000419.90	1001203.00	4.600	-74.067
Saucedal II	E50	EAAB	106398.81	91999.69	4.390	-74.090
Estación Quiba	E51	EAAB	92297.76	89998.26	4.320	-74.110
Salitre Casa de Bombas	E53	EAAB	109951.09	99772.85	4.410	-74.050
El Verjon	E54	EAAB	97996.81	106000.94	4.950	-74.020
San Rafael	E55	EAAB	112903.5	111107.69	4.420	-74.000
San Francisco	E56	EAAB	1004480.07	999261.21	4.352	-74.213
Estación Cerro Cazadores	E6	IDIGER	1007693.00	1005425.40	4.666	-74.029
Betania	E7	IDEAM	958276.61	992300.40	4.219	-74.147
Emanuel D'Alzon	E8	IDEAM	1011602.40	1000799.10	4.701	-74.070
Escuela la Unión	E9	IDEAM	971961.55	988200.23	4.343	-74.184

Fuente: Autores, 2024.

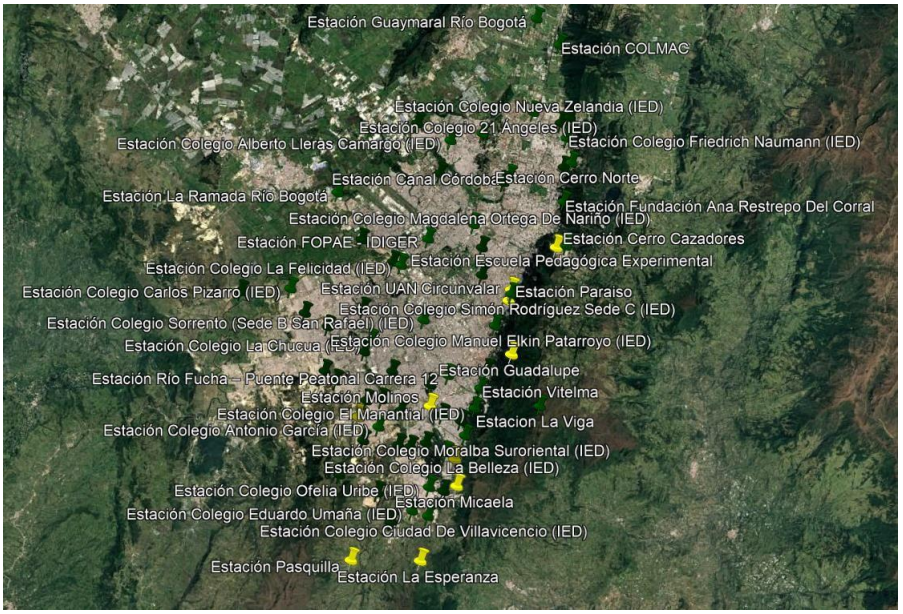


Figura 3. Localización de las estaciones analizadas

5.3 Algoritmos estadísticos de variabilidad hidrológica

Los algoritmos estadísticos desempeñan un papel fundamental en la comprensión de los patrones de precipitación y optimización de la gestión de los recursos hídricos. En este contexto, el uso de algoritmos determinísticos como la Interpolación Ponderada por el inverso de la Distancia (IDW) junto con las técnicas de aprendizaje automático (Machine Learning - ML) han ganado relevancia debido a su capacidad de mejorar la precisión y confiabilidad de los modelos hidrometeorológicos. Por ello, en esta sección se describen los principios teóricos y la aplicabilidad de los algoritmos determinísticos, así como el análisis de homogeneidad, tendencia, estacionalidad y pronóstico mediante la implementación de 16 modelos estadísticos para evaluar el comportamiento hidrológico en Bogotá. Los datos de precipitación diaria utilizados en este estudio fueron obtenidos de tres entidades: la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático

(IDIGER), con registros comprendidos entre el 1 de enero de 2013 y el 31 de diciembre de 2023, como se muestra en la Tabla 1. *Entidades públicas y estaciones vigentes (01/ enero/2013 - 31/diciembre/2023)***Imputación de Datos – Método IDW**

Este proceso determinístico de imputación de datos faltantes en series de tiempo se utiliza para completar valores ausentes en una serie temporal. No obstante, para este estudio se empleó un modelo determinístico, el Método de Interpolación ponderado; en el cual de acuerdo con el estudio realizado por (Reinoso, 2015) se satisface la correlación espacial entre cantidad y ocurrencia de precipitación entre estaciones vecinas, dada la ecuación **(1)** (Li, 2014).

$$P_M(t) = \sum_{i=1}^{n} 1\ \lambda_{M,i}\ P_i(t) / \sum_{i=1}^{n} 1\ \lambda_{M,i}\ (1) \qquad \textbf{(1)}$$

Donde

$\lambda_{M,i}$: Peso asociado con la estación

Razón por la cual se evalúa cada punto (estación hidrológica) a partir de la asignación del mismo peso a todas las estaciones vecinas; eligiendo entonces la información de precipitación geográfica de las estaciones y la distancia que existe entre ellas; adicionalmente, el algoritmo determina la distancia inversa, el coeficiente de correlación, el exponencial inverso y el radio normal ponderado. Para esto se tiene en cuenta la geolocalización de cada estación de acuerdo con las coordenadas de cada estación dada la Tabla 2. **Coordenadas de estaciones**

5.3.2 Pruebas de Homogeneidad

Estas pruebas estadísticas son empleadas para evaluar si un conjunto de datos o varias muestras tienen origen común o existen diferencias significativas entre ellas, es decir, si poseen una distribución similar y/o homogeneidad en los diferentes periodos de tiempo.

5.3.2.1 PETTITT

La prueba pettitt es una prueba no paramétrica utilizada para detectar un único punto de cambio abrupto en la mediana de una serie temporal continua. Es utilizada en hidrología y climatología cuando no se puede asumir normalidad o variaciones conocidas, dada por la ecuación **(2)** (Kundzewicz, 2004):

$$U(t) = \sum_{i=1}^{t-1} sign\,(P_i - P_t) \qquad K = \max_{t} |U(t)| \qquad t^* = \operatorname*{argmax}_{t} |U(t)| \tag{2}$$

Cálculo acumulado — Estadístico máximo — Punto de cambio

Donde:

- $\boldsymbol{sign}\,(\boldsymbol{X_i - X_j})$ es la función signo, que toma el valor de 1 si $X_i > X_j$, -1 si $X_i < X_j$, o si $X_i = X_j$.
- $\boldsymbol{k}$ es el punto de cambio potencia en la serie temporal (con k = 1, 2, …, n)

El valor $U(t)$ representa la acumulación de las diferencias entre los valores anteriores y el valor en el punto *t*. Este está dado por la ecuación **(3)** (Kundzewicz, 2004), se debe calcular su valor absoluto, para determinar el valor máximo de todos los puntos $\boldsymbol{k}$.

$$U_{max} = \max_{k = 1,2,\dots,n} |\mathrm{U_k}| \tag{3}$$

Una vez se tiene el valor máximo de U_{max} se compara con un valor crítico $U_{crítico}$ que depende del tamaño de la muestra n y del nivel de significancia $\boldsymbol{\alpha}$ que se haya elegido ($\boldsymbol{\alpha}$ = 0.05).

Si $U_{max} > U_{crítico}$, se rechaza la hipótesis nula H_o y se concluye que *existe un cambio estructural en la serie temporal*. Sin embargo, si $U_{max} \leq U_{crítico}$, no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no hay evidencia suficiente para detectar un cambio en la serie de tiempo.

5.3.2.2 SNHT (Standard Normal Homogenety Test)

También conocida para la Prueba Normal Estándar de Homogeneidad, es una prueba estadística utilizada para detectar cambios estructurales en las series temporales, similar a la prueba Pettitt. Esta prueba es particularmente útil para el análisis de series temporales hidrológicas en la tendencia central (media). Se enfoca en verificar si una serie de datos es homogénea o si presenta un cambio significativo en su distribución, en términos de la media. Está dada por la siguiente ecuación **(4)** (Browning, 2015) resumida:

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{t}^{n} x_t \qquad \overline{k}_{k} = \frac{1}{k}\sum_{t}^{k} \qquad \mu^2 = \frac{1}{n-k}\sum_{t=k+1}^{k} \qquad \textbf{(4)}$$

Cálculo medio global | Cálculo subserie antes del punto de cambio | Media de la subserie después del punto de cambio

El cálculo de la prueba está dado por las dos subseries μ_k^1 y μ_k^2 para cada punto $\boldsymbol{k}$, que se basa en la desviación estándar ponderada de las medias de las dos partes. Ecuación **(5)** (Browning, 2015).

$$S_k = \frac{k\,(n-k)}{n} \cdot \frac{(\mu_k^1 - \mu_k^2)^2}{\sigma^2} \qquad \textbf{(5)}$$

Donde

- $\boldsymbol{k}$ es el punto indica que se podría hacer un cambio (el punto de ruptura)
- μ_k^1 y μ_k^2 son las medias de las dos subseries antes y después del punto $\boldsymbol{k}$
- σ^2 es la varianza global de la serie

El parámetro S_k mide la diferencia en la media antes y después del punto $\boldsymbol{k}$, ajustado por la varianza de la serie completa. El valor máximo S_{max} de todos los puntos está dado por la ecuación **(6)** (Browning, 2015) cuyos puntos posibles $\boldsymbol{k}$ son 1 y $n-1$

$$S_{max} = \max_{k = 1, 2, \ldots, n-1} S_k \quad \textbf{(6)}$$

El valor máximo S_{max} se compara con un valor crítico $S_{crítico}$ que depende del tamaño de la muestra *n* y del nivel de significancia **α** que se haya elegido (**α** = 0.05).

Si $S_{max} > S_{crítico}$ se rechaza la hipótesis nula H_o Debido a que hay un cambio significativo en la serie de tiempo. Si $S_{max} \leq S_{crítico}$ no se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que no se ha identificado un cambio significativo en la serie de tiempo.

5.3.2.3 BUISHAND

La prueba de Buishand fue introducida por Theo A. Buishand en 1982 para examinar la homogeneidad de la media en series hidro-climáticas. El modelo tiene como objetivo identificar los intervalos de lluvia a partir de la definición de un criterio dentro de un umbral determinado $\boldsymbol{P_{th}}$, definido binariamente así, en la ecuación **(7)** (Khaliq, 2007):

$$X_t = \begin{cases} 1 \text{ si } P_t \geq P_{th} \\ 0 \text{ si } P_t < P_{th} \end{cases} \quad \textbf{(7)}$$

Donde: $\boldsymbol{X_t}$ es 1 si hay lluvia en el tiempo *t* y 0 si no hay lluvia.

El modelo para determinar intervalos de lluvia se basa en la ***distribución exponencial*** o ***distribución de Poisson,*** que se usa para describir la ocurrencia de eventos independiente al largo del tiempo. La función de probabilidad está dada por la ecuación **(8)** (Khaliq, 2007).

$$F_T(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \textbf{(8)}$$

Donde

- **λ** es la tasa de ocurrencia de eventos de lluvia por unidad de tiempo
- **t** es la duración del intervalo de lluvia

Este modelo adicionalmente requiere estimar parámetros de distribución de lluvia (λ) para identificar la frecuencia de ocurrencia de los eventos de lluvia y su duración en intervalos de tiempo. Para esto aplica la estimación de *la máxima verosimilitud* y el *ajuste de distribuciones* de los datos observados, definido así, en la ecuación **(9)** (Khaliq, 2007):

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^{n} (\lambda e^{-\lambda\ Xt_i}) \quad \textbf{(9)}$$

Donde $\boldsymbol{t_i}$ son las duraciones de los intervalos de lluvia observados. Mientras que **n** es el número total de intervalos. La comparación de los valores críticos (Valor B), se compara con valores de un **p-valor**, si **B** supera el valor crítico, es decir, el **p-valor** es menor que el nivel de significancia, se rechaza la hipótesis nula de homogeneidad, deduciendo la existencia de un cambio significativo en la serie.

5.3.2.4 VON NEUMAMN

Esta prueba se utiliza para analizar la autocorrelación de las series de tiempo y evaluar la dependencia entre los valores, mediante el cálculo de la varianza en la serie. Adicionalmente, este modelo permite evaluar la tendencia de los regímenes climáticos, definido en la ecuación **(10)** (Jaiswal, 2016):

$$Q = \frac{\sum_{t=2}^{n} (P_t - P_{t-1})^{\angle}}{\sum_{t=1}^{n} P_t^{\,2}} \quad \textbf{(10)}$$

Donde

- $\boldsymbol{P_t}$ es el valor de la serie de tiempo en el instante **t** (precipitación en el tiempo)
- $\boldsymbol{P_{t-1}}$ es el valor de la serie de tiempo en un instante **t -1**
- $\boldsymbol{n}$ es el número total de observaciones en la serie

El estadístico de Von Neuman $\boldsymbol{Q}$ mide la relación entre la varianza de las diferencias entre los valores consecutivos de la serie (numerador) y la varianza total de la serie (denominador). El valor de $\boldsymbol{Q}$ da información sobre la autocorrelación de la serie.

Si $\boldsymbol{Q \approx 2}$, sugiere que las observaciones en la serie son independientes entre sí, es decir, no existe autocorrelación. Si $\boldsymbol{Q < 2}$, indica una correlación positiva, es decir, existe relación entre la probabilidad de los eventos de precipitaciones intensas en cortos periodos de tiempos. Pero si $\boldsymbol{Q > 2}$, indica una autocorrelación negativa, es decir, refleja series de precipitaciones intensas y nulas.

5.3.3 Prueba de Tendencia y Estacionariedad

Estas pruebas son fundamentales para comprender el comportamiento de las series de tiempo de precipitación en cada una de las 56 estaciones analizadas. Por un lado, las pruebas de tendencia permiten identificar la homogeneidad de las series, es decir, evidencian patrones de incremento o disminución en los regímenes de lluvia, los cuales están directamente relacionados con fenómenos de cambio climático y/o con variaciones estacionales que influyen en la variabilidad climática. Por otro lado, las pruebas de estacionariedad permiten determinar si las propiedades estadísticas de las series, como la media y la varianza, se mantienen constantes o presentan cambios significativos debido a modificaciones en el entorno. La aplicación de estas pruebas busca asegurar la validez de los análisis y mejorar la precisión de las predicciones basadas en los datos.

5.3.3.1 DICKEY FULLER

La prueba de Dickey-Fuller es una prueba estadística utilizada para determinar si una serie de tiempo es estacionaria o no; enfocada en la existencia de una raíz unitaria en la serie temporal

para conocer el comportamiento estacional o no, es decir, si la media, varianza y covarianza cambian a lo largo del tiempo, fundamentado en la hipótesis de la ecuación **(11)** (Hamilton, 1994):

$$Y_t = \rho Y_{t-1} + \varepsilon_t \qquad Y_t = \alpha + Bt + \rho Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad \textbf{(11)}$$

Primer origen Modelo Dickey Fuller — Forma básica del modelo

Donde

- $\boldsymbol{Y_t}$ es el valor de la serie de tiempo en el periodo **t**
- $\boldsymbol{\rho}$ es el coeficiente de la regresión
- $\boldsymbol{Y_{t-1}}$ es el valor de la serie en el periodo anterior
- $\boldsymbol{\varepsilon_t}$ es el término de error en el tiempo **t**
- $\boldsymbol{Bt}$ es una tendencia lineal
- $\boldsymbol{\alpha}$ es el parámetro que se prueba a comprobar si es igual a 1

El objetivo de la prueba es examinar si el coeficiente $\boldsymbol{\rho}$ es 1. Si $\boldsymbol{\rho = 1}$, la serie tiene una raíz unitaria y es no estacionaria. Si $\boldsymbol{\rho < 1}$, la serie es estacionaria.

La evaluación del modelo está dada por la hipótesis nula (H_o) que plantea la existencia de una raíz unitaria y demuestra la no estacionariedad; mientras que la hipótesis alternativa (H_1) plantea la ausencia de una raíz unitaria, es decir, la estacionariedad.

5.3.3.2 PHILLIPS-PERRON (PP)

La prueba Phillips-Perron se emplea para determinar si una serie de tiempo tiene una raíz unitaria, es decir, si la serie temporal es no estacionaria. A diferencia de la prueba de Dickey Fuller, la prueba de Phillips-Perron ajusta las estadísticas de los errores estándar de la regresión

para corregir la autocorrelación y la heterocedasticidad en los residuos, sin tener que agregar rezagos adicionales a la serie, así, como en la ecuación **(12)** (Enders, 2015):

$$Y_t = \alpha + \rho Y_{t-1} + \varepsilon_t \qquad \Delta Y_t = \alpha + Bt + \rho Y_{t-1} +$$

Modelo Autorregresivo — Test de Phillips Perron **(12)**

Donde

- $\boldsymbol{Y_t}$ es el valor de la serie de tiempo en el periodo **t**
- $\boldsymbol{\alpha}$ es el parámetro que se prueba a comprobar si es igual a 1
- $\boldsymbol{\rho}$ es el coeficiente de la regresión
- $\boldsymbol{Y_{t-1}}$ es el valor de la serie en el periodo anterior
- $\boldsymbol{\varepsilon_t}$ es el término de error en el tiempo **t**

El objetivo de la prueba es examinar si el coeficiente $\boldsymbol{\rho}$ es 1. Si $\boldsymbol{\rho = 1}$, la serie tiene una raíz unitaria y es no estacionaria. Si $\boldsymbol{\rho < 1}$, la serie es estacionaria.

5.3.3.3 KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin)

Es una prueba estadística utilizada para determinar si una serie temporal es estacionaria o no, específicamente para probar la hipótesis nula de la estacionariedad en torno a la media. Además, evalúa si los datos presentan un comportamiento estacionario en la media o si existen tendencias determinísticas o estocásticas, en la ecuación **(13)** (Hamilton, 1994) así:

$$KPSS = \frac{1}{n^2\sigma^2} \sum_{t=1}^{n} \left(\sum_{i=1}^{t} \varepsilon i\right)^2 \qquad \textbf{(13)}$$

La ecuación **(13)** evalúa el valor crítico con relación al valor estadístico y su tendencia en el comportamiento de los datos.

Donde un valor de KPSSS superior al valor crítico en el nivel de significancia, induce al rechazo de la hipótesis nula y concluye que la serie de precipitaciones presenta una tendencia; sin embargo, si el valor KPSS es inferior al valor crítico, se aprueba la hipótesis nula y se considera a los datos de tipo estacionario.

5.3.3.4 MANN-KENDALL

Este tipo de prueba tiene como objeto detectar tendencias en series de tiempo y su homogeneidad, frente a una distribución de datos, tal como se ve en la ecuación **(14)** (Yue, 2004).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(X_j - X_i) \qquad Vas = \frac{n\,(n-1)\,(2n+5)}{18} \tag{14}$$

Ecuación general — Ajuste de la varianza

Donde

- $Sgn(X_j - X_i) = 1;\ X_j > X_i$
- $Sgn(X_j - X_i) = 0;\ X_j = X_i$
- $Sgn(X_j - X_i) = 1;\ X_j < X_i$

5.3.4 Método de Segmentación – Clustering de serie temporal

El método de segmentación es una herramienta fundamental en el análisis hidrológico, ya que separa series temporales de acuerdo con los patrones, tendencias y cambios significativos para mejorar la precisión de los modelos predictivos. Adicionalmente, identifica las ubicaciones de un cubo de espacio-tiempo que son más similares y las divide en clústeres distintos, donde cada clúster tiene características de serie temporal similares, las cuales se pueden agrupar para que tengan valores similares y proporcionales a lo largo del tiempo, o muestren patrones periódicos suaves similares a lo largo del tiempo de acuerdo con Esri (2018).

Esta herramienta toma como entrada un cubo NetCDF de espacio-tiempo que se puede crear usando las siguientes herramientas.

Cubos Espacio-tiempo agregando puntos (Minería de patrones en espacio-tiempo): De acuerdo con Pablo Montero, 2014, la estrucutra de datos de netCDF es desarrollada por cada punto y atributo agregado dado por cada ubicación específica, donde para todas las ubicaciones de bin, se evalua la tendencia de los recuentos y valores de los campos resumen como se puede observar en la ***Figura 4***. Ilustración resumen de cubo espaciotemporal de puntos agregados (Montero, 2014). Cada bin tiene una posición fija en el espacio (X, Y) y en el tiempo (t). Los bins que abarcan la misma área comparten el mismo Id de ubicación; mientras que los bins que abarcan la misma duración comparten el mismo Id de periodo tiempo.

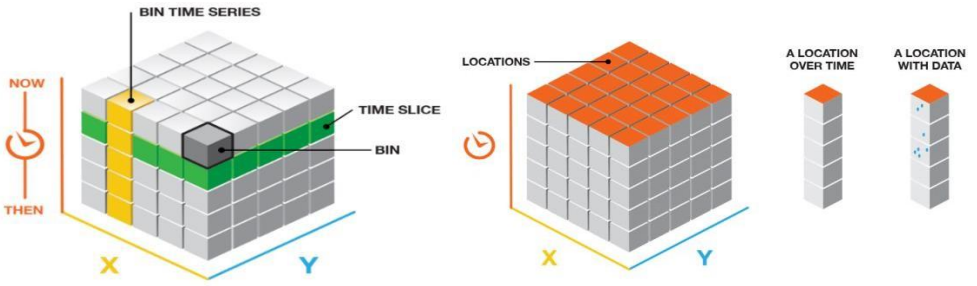


Figura 5. Ilustración resumen de cubo espaciotemporal de puntos agregados (Montero, 2014)

Es importante mencionar que esta herramienta requiere 60 puntos como mínimo y una variedad de marcas de hora, de lo contrario esta herramienta fallará si los parámetros especificados dan lugar a un cubo con más de dos mil millones de bins. Adicionalmente, esta herramienta requiere datos proyectados para medir la distancia con precisión:

– **Cubos espacio-tiempo a partir de ubicaciones definidas** (Minería de patrones en espacio-tiempo): Esta técnica se basa en la construcción de una estructura de datos espacio-temporal a partir de ubicaciones geográficas fijas, en las cuales los atributos varían a lo largo del

tiempo. Utilizando el formato netCDF, se generan *bins* o celdas espacio.temporales para cada ubicación, confimando un cubo tridimencional donde las dimensiones X e Y representan el espacio y la dimensión T representanda el Tiempo ***Figura 6***. Cubo espacio-tiempo a partir de ubicaciones. Adicicionalmente esta estructura permite analizar la evolución temporal de las variables o campos de resumen mediante la detección de tendencias, de acuerdo con la metodología propuesta por definidas (Kaufman, 2009).

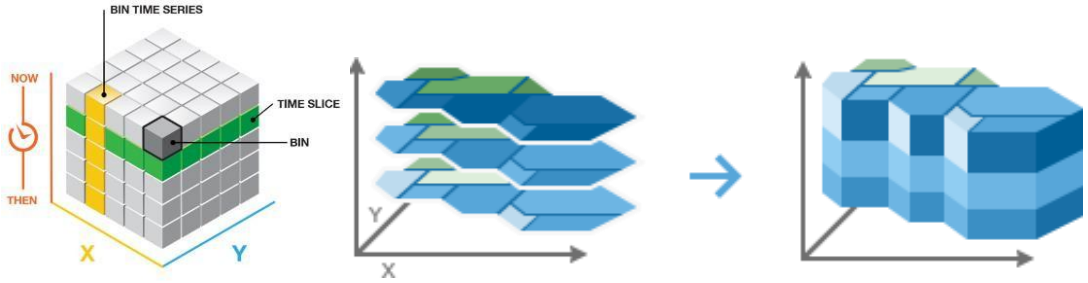


Figura 7. Cubo espacio-tiempo a partir de ubicaciones definidas (Kaufman, 2009)

Así mismo como los valores para los parámetros variables o campos de resumen que incluyen cuando se desarrolla el cubo, los bins asociados a la misma ubicación física compartirán el mismo Id de ubicación y, conjuntamente, representarán una serie temporal Los bins que estén asociados al mismo periodo de tiempo compartirán el mismo Id de periodo de tiempo y conjuntamente un intervalo de tiempo.

- **Cubos de espacio-tiempo a partir de capa ráster multidimensional** (Miniería de patrones en espacio-tiempo): Esta metodología consiste en la generación de un cubo espacio-temporal a partir de una capa ráster multidimensional, estructurando los datos en *bins* o celdas para facilitar un análisis y visualización eficientes en el espacio y el tiempo ***Figura 8.*** Cubo espacio-tiempo de capa ráster multidimensional (Ramsay, 2006). Según lo propuesto por Ramsay (2006), el cubo permite identificar patrones espacio-temporales a

través de la parametrización de la capa ráster de entrada. Cada *bin* generado se corresponde de manera única con una celda ráster durante un intervalo específico de tiempo, lo que permite una segmentación detallada de los datos para su análisis.

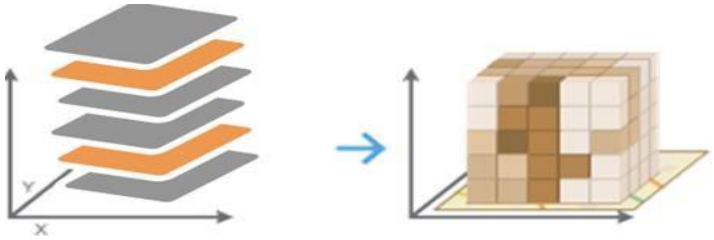


Figura 8. Cubo espacio-tiempo de capa ráster multidimensional (Ramsay, 2006)

Los bins que comparten la misma ubicación tendrán el mismo atributo de Localización Id, mientras que los que comparten el mismo intervalo tendrán el mismo atributo de Time Step Id. Donde para analizar cada tendencia en el tiempo se emplea la prueba de Mann-Kendall, para medir distancias con precisión. Cada herramienta genera una entidad 2D que muestra cada ubicación en el cubo simbolizada por su pertenencia a un clúster, lo cual permite explorar cualquier patrón espacial. Además, durante la ejecución de la herramienta, el panel de Geoprocesamiento resume los resultados a partir de estadísticas de tendencia de Mann-Kendall para cada clúster. Adicionalmente, cada campo CENTER_REP indica qué ubicaciones del cubo espacio-tiempo son más representativas de cada grupo (llamadas medias de los clústeres). Este campo contendrá un valor 1 para cada medida de cada clúster, y todas las demás ubicaciones contendrán un valor de 0. Es importante mencionar que el objetivo del clustering es dividir las ubicaciones del cubo de espacio-tiempo en grupos donde las series temporales de ubicaciones dentro de cada grupo son más similares entre sí de las que son las series temporales de ubicaciones fuera del grupo. Por otra parte, el Perfil (Correlación) del parámetro Característica

de interés se utiliza para agrupar series temporales que tienden a mantenerse proporcionales entre sí y aumentan y disminuyen su valor al mismo tiempo.

5.3.4.1 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos es una etapa fundamental ya que permite garantizar la calidad de la información a analizar. En esta sección se describirán las técnicas aplicadas a la recopilación, limpieza y transformación de los datos.

Pasos:

1 - Consolidación de series de tiempo de precipitación y verificación de datos faltantes

2 - Implementación de metodología IDW para completar datos faltantes

3 - Conservación de series diarias a mensuales para reducir la variabilidad

5.3.4.2 Clustering basado en distancia DTW

El análisis de clustering basado en la distancia Dynamic Time Warping (DTW) es una técnica avanzada para la agrupación de series temporales que permite identificar patrones y similitudes en datos hidrológicos y climáticos. En esta sección, se describe el proceso de agrupamiento utilizando DTW ***Figura 9***. Polígonos de Thiessen – Regionalización por método de clusterización (autores, 2024).

Pasos:

1 - Consolidación de todas las series de tiempo en un solo dataframe

2 - Aplicación del método del codo para encontrar el número optimo de clústeres

3 - Aplicación del método DTW para asignar el cluster a cada serie de tiempo

4 - Cálculo de la serie representativa de cada clúster basado en el método de medoides

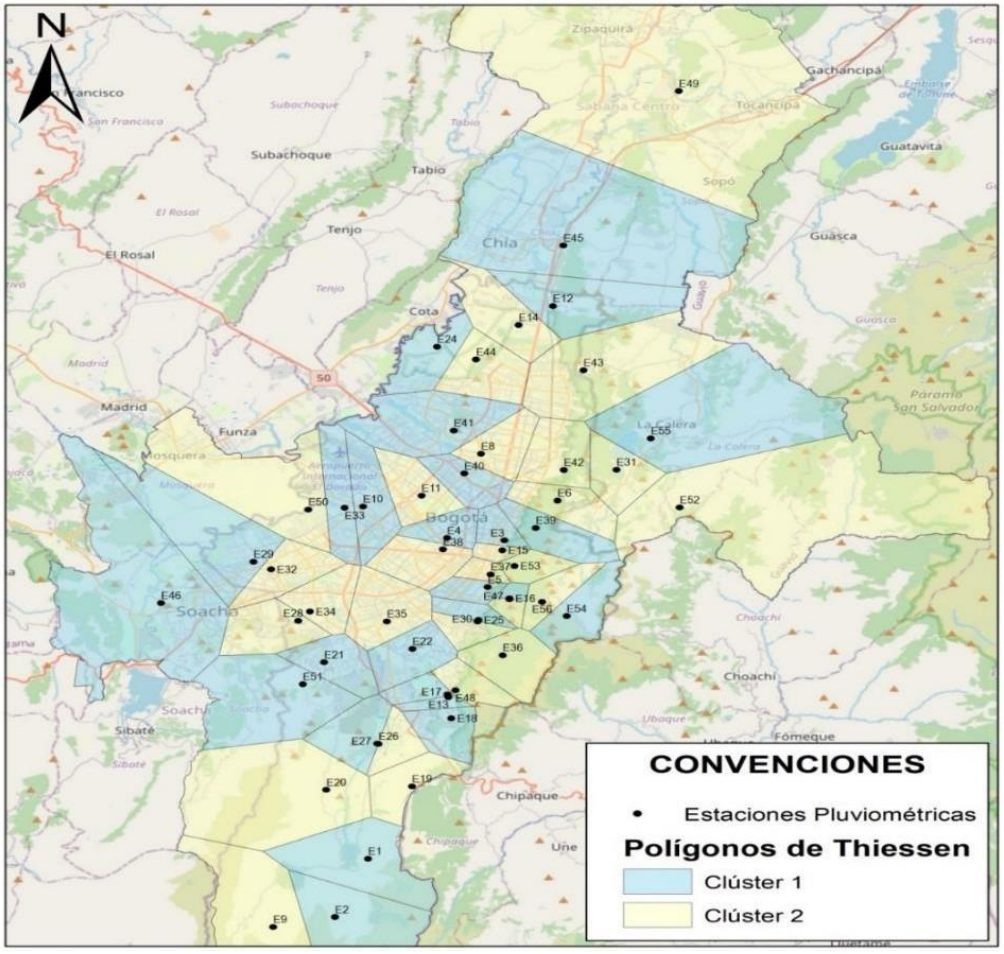


Figura 9. Polígonos de Thiessen – Regionalización por método de clusterización (autores, 2024)

5.4 Metodologías de Cálculo de Volúmenes

Para esta investigación se compararon siete (7) metodologías de cálculo para el amortiguamiento y/o aprovechamiento de aguas lluvias en edificaciones que serán expuestas a continuación.

5.4.1 Resolución 0330 de 2017

De acuerdo con el artículo 153 de la resolución 0330 de 2017, para los nuevos desarrollos urbanos donde se modifique la cobertura del suelo, es necesario implementar estrategias que mitiguen el impacto de la impermeabilización en el aumento de los caudales de escorrentía. Para

lograrlo, se debe diseñar sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS), con el objetivo de reducir al menos un 25% del caudal pico del hidrograma de creciente de diseño. Esta medida busca evitar la sobrecarga de los sistemas pluviales y prevenir inundaciones. Además, se requiere realizar un análisis de las condiciones de escorrentía antes y después del proyecto, en comparación con la capacidad de recepción de flujo de los puntos de entrega del proyecto. Por otro lado, la resolución 0799 de 2021, que modifica parcialmente la resolución 0330 de 2017, establece en su artículo 44 que se debe evaluar la viabilidad de implementar SUDS en función de las condiciones específicas de la zona, las áreas tributarias que alimentarán dichos sistemas y los sistemas proyectados para la recolección, evacuación y disposición de las aguas pluviales. Asimismo, en caso de que se considere viable la implementación de estos sistemas, se debe diseñar con el objetivo de reducir el caudal pico del hidrograma de la creciente de diseño, asegurando que la reducción no sea inferior al 30%, con el fin de evitar la sobrecarga de los sistemas pluviales y prevenir inundaciones. A pesar de que se exige realizar una amortiguación de aguas lluvias, las normativas no especifican un método de cálculo exacto para este propósito. Por lo tanto, se vuelve imprescindible contar con una metodología que se ajuste a lo dispuesto por las normas nacionales de diseño de sistemas hidráulicos en el país.

5.4.2 Norma EAAB NS-085

La norma NS-085 es una norma local que hace parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá EAAB ESP, esta norma rige los diseños de los sistemas de alcantarillado pluvial y residual externos de la ciudad y además da bases para los cálculos hidráulicos de los mismos, así mismo, dentro de sus requerimientos, en el capítulo 4.3.1.1 indica lo siguiente:

> Los nuevos desarrollos de proyectos y de redensificación deberán incluir un manejo del volumen de escorrentía adicional al generado por el aumento de la impermeabilidad del suelo en comparación con las condiciones de áreas no urbanizadas. El consultor deberá calcular los hidrogramas siguiendo la metodología descrita en la sección 4.3.1.3.2 para condiciones de desarrollo y condiciones no urbanizadas, donde para este último deberá asumir un porcentaje de área impermeable no mayor al 10%. En caso de que las estructuras para el manejo de estos volúmenes estén conectadas a la red de drenaje de la ciudad, estas deben contar con mecanismos que garanticen que el caudal de salida no exceda el caudal pico calculado para la misma área suponiendo que esta no se encuentra urbanizada y deben contar con la capacidad total de diseño para aceptar flujos de agua lluvia provenientes de tormentas sucesivas en un tiempo no superior a 18 horas.

Ahora bien, teniendo en cuenta el párrafo anterior, el capítulo 4.3.1.3.2 de la norma indica que la metodología de cálculo de los hidrogramas para condiciones pre y post desarrollo se deben realizar bajo el método del Soil Conservation Services (SCS), el cual se basa en que los cálculos de los caudales se estiman a partir de un hidrograma unitario de diseño el cual se le aplica a una precipitación efectiva de diseño.

Lopez, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 6_HIDROGRAMA UNITARIO.

5.4.3 Uso de Fuentes Alternativas: Certificación CASA V3.0

Dentro de la certificación de sostenibilidad emitida por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) denominada CASA se tiene el lineamiento “Uso de fuentes alternativas”, el cual busca promover el uso de fuentes alternativas de agua en el proyecto y la circularidad del recurso hídrico, con el fin de reducir el consumo de agua potable. Este lineamiento contiene una metodología de cálculo para el aprovechamiento de aguas lluvias en usos donde no es requerida

agua potable (ej. Sanitarios, orinales, riego, etc.), se basa en los registros de precipitación promedio mensual y busca, a partir del método racional, calcular el potencial de almacenamiento de agua lluvia dentro de un proyecto, teniendo como referencia el área de captación (cubiertas y zonas verdes), la precipitación media mensual multianual y el requerimiento de agua no potable del proyecto, para con esto realizar un balance hídrico y determinar el potencial de ahorro de agua al implementar estrategias de almacenamiento de aguas lluvias en los proyectos de edificaciones residenciales nuevas.

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 01. MÉTODOLOGIA CASA.

5.4.4 Gestión de la Escorrentía: Certificación CASA V3.0

Dentro de la certificación de sostenibilidad emitida por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) denominada CASA se tiene el lineamiento “Gestión de la escorrentía”, el cual busca replicar los flujos naturales del ciclo hidrológico, a partir de la gestión del agua lluvia de acuerdo con las características del sitio y las variables del proyecto. Este lineamiento al igual que el anterior cuenta con una metodología de cálculo basada en la gestión de caudales del proyecto, el cual busca que el predio no cambie las condiciones hidrológicas y que el aporte de caudal al sistema de alcantarillado de la ciudad sea el mismo que la condición pre desarrollo; adicionalmente busca gestionar percentiles de lluvia, que varían desde el percentil 60% hasta el 90%, en dicho lineamiento se establece que: *“*Para efectos del cálculo del volumen a gestionar, se tendrá en consideración el área del predio afectada por el coeficiente de escorrentía, en las condiciones de diseño del proyecto establecido, y el estudio pluviométrico de la zona, que incluya los eventos de precipitaciones diarios de los últimos diez años” (CASA COLOMBIA, 2025).

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 02. MÉTODOLOGIA CASA.

5.4.5 Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)

El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) es el centro regional de tecnología ambiental de la Organización Panamericana de la Salud Oficina regional (OPS), Oficina regional para las Américas de la Organización Mundial de la Salud. Esta organización cuenta con toda una guía para el diseño de captación de aguas lluvias donde se establece un método conocido como: *"Cálculo del Volumen del Tanque de Almacenamiento toma como base de datos la precipitación de los 10 o 15 últimos años. Mediante este cálculo se determina la cantidad de agua que es capaz de recolectarse por metro cuadrado de superficie de techo y a partir de ella se determina a) el área de techo necesaria y la capacidad del tanque de almacenamiento, o b) el volumen de agua y la capacidad del tanque de almacenamiento para una determinada área de techo"* (CEPIS, 2004).

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 03. MÉTODOLOGIA CEPIS.

5.4.6 Gestión del Agua Lluvia: Metodología LEED – V4.0

Dentro de las posibles certificaciones de sostenibilidad a las que se puede optar en el país, se encuentra la certificación LEED, la cual está enfocada a cualquier tipo de edificación a construir. Esta certificación en su versión 4.0 cuenta con un crédito denominado "Gestión del agua de lluvia" el cual busca reducir el volumen de escorrentía y mejorar la calidad del agua replicando la hidrología natural y el equilibrio hídrico del sitio, con base en las condiciones históricas y los ecosistemas no desarrollados de la región, este se basa en tomar un mínimo de 10 años de registros de precipitación diaria y obtener el percentil de lluvias que va desde el 85% hasta el 98% (dependiendo del proyecto y la certificación a alcanzar) y, a partir de este y el área de

captación, determinar un volumen de amortiguamiento de agua lluvias para el proyecto a desarrollar.

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 04. LEED V4.0.

5.4.7 Metodología de Gloud (1993)

Dentro de las investigaciones realizadas, en la referencia 48, se encuentra una metodología para el cálculo de almacenamiento de agua lluvias basada en los registros medios anuales de lluvias de la zona del proyecto, esta metodología busca determinar los rendimientos anuales de recolección de agua de lluvia-escorrentía (Y), se calculan utilizando la ecuación **(2)** (Sharma, 2023):

$$Y = \frac{R\,A\,C}{1000} \quad m^3 / año \qquad \textbf{(3)}$$

Donde:

R: Precipitación promedio anual (mm)

A: Área de captación (m2)

C: Coeficiente de escorrentía

Esta metodología busca determinar el potencial de almacenamiento de agua lluvias de un proyecto en términos anuales.

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 05. GLOULD_MEDIA ANUAL.

6 Análisis y Resultados

Este capítulo presenta el análisis de los datos obtenidos y los resultados derivados de la aplicación de la metodología establecida en los capítulos previos. En primera instancia, se describen los procesos de recolección y tratamiento de datos, incluyendo la identificación de valores atípicos y la validación de la información utilizada. A continuación, se desarrollan los

análisis estadísticos e hidrológicos que permiten evaluar la variabilidad de las precipitaciones en la zona de estudio, así como su influencia en la gestión del recurso hídrico. Asimismo, se expone la aplicación de la metodología diseñada para calcular los volúmenes de amortiguamiento de aguas lluvias, considerando los parámetros generales de las edificaciones y las condiciones hidrológicas previas y posteriores al desarrollo del proyecto. Los resultados obtenidos se presentan a través de gráficos y tablas, acompañados de un análisis comparativo de su implementación en dos edificaciones en funcionamiento que cuentan con tanques de amortiguamiento. Este análisis permite evaluar la aplicabilidad y efectividad de la metodología en el ámbito de la ingeniería hidráulica en Bogotá D.C.

6.1 Algoritmos estadísticos de variabilidad climática

6.1.1 Cargue e Imputación de Datos – Método IDW

Esta metodología se generó a partir de la utilización de modelos en R studio. Se parte del cargue de siete paquetes. Posteriormente se ejecuta un comando de limpieza de memoria y al asegurar que esta se encuentra disponible y libre de todos los objetos, como variables y/o funciones del entorno de trabajo actual, se cargan los archivos de las coordenadas de todas las estaciones junto con la ruta de los archivos (Excel) de las series de tiempo, generando así un **dataframe** con todas las fechas por días desde el 2013/01/01 hasta el 2023/12/31, donde se ejecuta el comando de lectura de la base de datos de precipitación, completando las fechas faltantes con **NA** y a su vez eliminando valores duplicados por fecha; para esto se convierte la columna “FECHALECTURA” en formato fecha. Finalmente, se realiza la imputación de valores faltantes por IDW así: Se toma la tabla en formato “largo” y se vincula a la tabla de coordenadas de cada una de las estaciones, se fija un total de cuatro vecinos (criterio “torre” de vecindad), conversión a objeto espacial, guardado de los resultados iniciales, iteración sobre cada día para completar

valores faltantes empleando IDW, identificación de valores nulos y generación de un nuevo modelo IDW empleando los datos disponibles (no nulos) de precipitación. Posteriormente, se ejecuta el comando de interpolación IDW para calcular los valores nulos y llenado de valores nulos. Finalmente se recupera la tabla con las celdas completas, cambiando la tabla a formato ancho, es decir, con los datos de cada estación por columna, y se guarda esta última tabla resultante en formato CSV junto a la extracción de las series completas diarias descargadas por separado en formato Excel (.xlsx)

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 07. DATOS.

Adicionalmente se realiza la conversión de las series a mensuales, para esto se inicia con el cargue de paquetes de librerías. De forma similar al proceso anteriormente descrito acerca de la conversión de las series diarias, se realiza la limpieza de la memoria y posteriormente el cargue de las series de tiempo y ajustes a series mensuales. Así que se ejecuta la lectura de las bases de datos de precipitaciones diarias junto con la creación de un objeto xts, para la conversión de datos diarios a precipitación total mensual en el **dataframe**, guardando la información por separada.

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta ANEXOS. ANEXO 07. DATOS. 03. SERIES MENSUALES.

6.1.2 Pruebas de Homogeneidad y Estacionariedad

Estas pruebas se ejecutaron iniciando desde el cargue de paquetes, ruta donde se encuentran todas las series mensuales imputadas y ejecución de los comandos para las pruebas de homogeneidad y modelos de estacionalidad, las cuales son agrupadas en la **Tabla 3.** Resultados Pruebas de Homogeneidad de las precipitaciones.

Tabla 3. Resultados Pruebas de Homogeneidad de las precipitaciones mensuales

Estación	Pvalor			
	Pettit	SNHT	Buishand	Bartels
E1	0.66	0.66	0.21	0
E2	0	0.01	0	0
E3	0.22	0.3	0.13	0.02
E4	0.24	0.6	0.02	0
E5	0.64	0.64	0.32	0.03
E6	0.48	0.03	0.08	0.01
E7	1	0.76	0.89	0
E8	0.06	0.11	0.07	0
E9	0.07	0	0	0
E10	0.16	0.32	0.3	0.01
E11	0.16	0.21	0.13	0
E12	0.37	0.42	0.17	0.01
E13	1	0.82	0.96	0
E14	0.2	0.32	0.06	0.06
E15	0.01	0	0	0
E16	0.01	0.01	0.02	0.02
E17	0	0	0	0
E18	0.71	0.88	0.76	0
E19	0.74	0.88	0.79	0
E20	1	0.81	0.77	0
E21	0.2	0.2	0.22	0.06
E22	0.18	0.16	0.15	0.01
E23	0.01	0.06	0.03	0
E24	0.07	0.15	0.1	0
E25	0.16	0	0.09	0
E26	0.73	0.86	0.02	0.01
E27	0.12	0.09	0.12	0.01
E28	0.11	0.15	0.07	0.02
E29	0.11	0.55	0.74	0.03
E30	0.79	0.27	0.6	0.1
E31	0.34	0.45	0.07	0
E32	0.46	0.76	0.17	0.01
E33	0.65	0.87	0.71	0.01
E34	0.57	0.32	0.2	0.04
E35	0.31	0.37	0.27	0.04
E36	0.01	0	0.08	0
E37	0	0	0	0
E38	0.11	0.28	0.25	0.01
E39	0.3	0.58	0.18	0.01
E40	0.88	0.64	0.33	0
E41	0.35	0.47	0.05	0.01

E42	0.57	0.85	0.66	0.01
E43	0.09	0.31	0.41	0.01
E44	0.82	0.75	0.37	0.01
E45	0.27	0.58	0.18	0
E46	0.55	0.45	0.21	0
E47	0.27	0.13	0.25	0.05
E48	1	0.86	0.98	0
E49	0.3	0.48	0.44	0
E50	0.49	0.42	0.37	0.02
E51	0.98	0.78	0.36	0.2
E52	0	0	0	0
E53	0.16	0.57	0.1	0
E54	0.01	0.01	0.02	0
E55	0.24	0.69	0.21	0.03
E56	0.23	0.51	0.41	0

Fuente: Autores, 2024.

Los resultados de las cuatro pruebas de homogeneidad aplicadas a las 56 estaciones pluviométricas indican que un p-valor menor a 0.05 sugiere que la serie no es homogénea, mientras que un p-valor mayor a 0.05 implica que no hay evidencia suficiente para rechazar la hipótesis de homogeneidad. Con base en esta evaluación, las estaciones se clasificaron en tres categorías: homogéneas, no homogéneas y con posibles cambios.

- **Estaciones homogéneas**: Las estaciones E1, E7, E13, E18, E19, E20, E26, E40, E44 y E48 presentan p-valores altos en todas las pruebas, lo que indica que no muestran cambios significativos en sus series de precipitaciones.
- **Estaciones no homogéneas**: Las estaciones E2, E9, E15, E17, E36, E37 y E52 tienen p-valores cercanos a 0 en casi todas las pruebas, lo que sugiere la presencia de rupturas o tendencias en los datos.
- **Estaciones con posibles cambios**: Las estaciones E3, E6, E10, E12, E22, E25, E28, E31, E35, E39 y E47 presentan p-valores intermedios en algunas pruebas, por lo que podrían requerir análisis adicionales para su reclasificación. Esta clasificación permite

identificar las estaciones que requieren una revisión más detallada para comprender mejor las posibles causas de homogeneidad en los datos.

En cuanto a la significancia de las pruebas de homogeneidad se obtuvo que:

- Prueba **Pettitt** 9 de 56 (16.1%) de los resultados fueron significativos, mientras que el restante correspondiente a 47 de 56 estaciones (83.9%) no fueron significativos
- Prueba **SNHT y Buishand** 11 de 56 estaciones (19.6%) sus resultados fueron significativos, mientras que 45 de 56 estaciones (80.4%) no fueron significativos.
- Prueba **Bartels** 51 de 56 estaciones (91.1%) sus resultados fueron significativos, mientras que 5 de 56 estaciones (8.9%) no fueron significativos.

Los resultados obtenidos permitieron detectar cambios provocados por la modificación en las condiciones climáticas, adicionalmente el análisis de homogeneidad constituye una etapa crítica en la evaluación de series de precipitaciones, ya que permite asegurar la integridad de los datos y la validez de las inferencias estadísticas que se deriven de ellos.

En resumen, las estaciones con evidencia significativa de cambios en la serie de precipitaciones podrían estar influenciadas por factores como variabilidad climática, esto se puede evidenciar en la **Tabla 4.** Resultados Pruebas de Estacionalidad de las precipitaciones mensuales.

Tabla 4. Resultados Pruebas de Estacionalidad de las precipitaciones mensuales

Estación	Pvalor			
	DickeyFuller	PhillipsPerron	KPSS	ZivotAndrews
E1	0.01	0.01	0.1	-6.72
E2	0.01	0.06	0.1	-7.62
E3	0.01	0.01	0.1	-10.1
E4	0.01	0.11	0.1	-9.38
E5	0.01	0.01	0.1	-10.7
E6	0.01	0.03	0.1	-10.04

E7	0.01	0.01	0.1	-7.02
E8	0.01	0.04	0.1	-7.27
E9	0.01	0.04	0.1	-10.2
E10	0.01	0.01	0.1	-9.69
E11	0.01	0.05	0.1	-10.41
E12	0.01	0.01	0.1	-8.33
E13	0.01	0.01	0.1	-7.62
E14	0.01	0.01	0.1	-9.04
E15	0.01	0.01	0.1	-7.37
E16	0.01	0.01	0.1	-9.97
E17	0.01	0.01	0.1	-11.56
E18	0.01	0.01	0.1	-11.74
E19	0.01	0.02	0.1	-8.94
E20	0.01	0.01	0.1	-9.85
E21	0.01	0.01	0.1	-9.76
E22	0.01	0.01	0.1	-9.99
E23	0.01	0.01	0.1	-10.62
E24	0.01	0.03	0.1	-9.97
E25	0.01	0.02	0.1	-10.09
E26	0.01	0.02	0.1	-9.12
E27	0.01	0.08	0.1	-9.97
E28	0.01	0.01	0.1	-9.74
E29	0.01	0.02	0.1	-10.5
E30	0.01	0.05	0.1	-10.49
E31	0.01	0.02	0.1	-9.82
E32	0.01	0.05	0.1	-9.36
E33	0.01	0.02	0.1	-12.27
E34	0.01	0.01	0.1	-9.52
E35	0.01	0.01	0.1	-9.5
E36	0.01	0.02	0.1	-9.56
E37	0.01	0.01	0.1	-10.96
E38	0.01	0.02	0.1	-9.15
E39	0.01	0.01	0.1	-8.54
E40	0.01	0.02	0.1	-9.61
E41	0.01	0.01	0.1	-10.03
E42	0.01	0.02	0.09	-10.31
E43	0.01	0.09	0.06	-9.67
E44	0.01	0.1	0.06	-10.28
E45	0.01	0.06	0.05	-8.96
E46	0.01	0.01	0.05	-9.94
E47	0.01	0.03	0.05	-10.5
E48	0.01	0.01	0.05	-10.61

E49	0.01	0.01	0.05	-9.69
E50	0.01	0.01	0.04	-16.46
E51	0.01	0.02	0.02	-10.9
E52	0.01	0.01	0.02	-9.88
E53	0.01	0.01	0.02	-10.33
E54	0.01	0.02	0.01	-10.35
E55	0.01	0.09	0.01	-10.43
E56	0.01	0.01	0.01	-6.89

Fuente: Autores

A partir de los resultados obtenidos, se observa que el 100% de los **p-valores** en las pruebas de Dickey-Fuller y Phillips-Perron son menores a 0.01, lo que indica el rechazo de la hipótesis nula de presencia de raíz unitaria. Esto sugiere que las 56 series de tiempo analizadas presentan una tendencia estacionaria. Por otro lado, en la prueba KPSS, más del 73% de los valores son equivalente a 0.01, lo que indica que no se rechaza la hipótesis nula de estacionariedad. Sin embargo, el 26% restante obtuvo valores entre 0.01 y 0.06, lo que podría sugerir cierta evidencia de no estacionariedad en algunos casos. Finalmente, la prueba de Zivot-Andrews, que evalúa la estacionariedad considerando posibles rupturas estructurales, muestra valores negativos en un rango de -16 a -7 para la mayoría de las estaciones. Esto sugiere que las series analizadas pueden ser estacionarias, aunque algunas podrían presentar cambios estructurales en su comportamiento. En general, los resultados indican que la mayoría de las series analizadas son estacionarias, según la prueba ADF. Asimismo, la prueba KPSS no proporciona evidencia sólida de no estacionariedad, lo que refuerza esta conclusión. Por otro lado, la prueba de Zivot-Andrews sugiere la presencia de cambios abruptos en los registros de precipitación en algunas estaciones, lo que podría estar asociado con eventos climáticos extremos o modificaciones en las condiciones locales. Esto es especialmente relevante para el análisis de variabilidad climática, ya que la estacionariedad implica que las fluctuaciones en estas estaciones siguen un patrón a lo largo del tiempo, sin tendencias significativas.

6.1.3 Segmentación – Clustering de las series temporales

El clustering tiene como objetivo agrupar las ubicaciones dentro del cubo de espacio-tiempo en conjuntos donde las series temporales sean más similares entre sí que con las series de ubicaciones externas al grupo. Por otro lado, el perfil de correlación del parámetro característica de interés permite identificar y agrupar series temporales que mantienen una relación proporcional, es decir, aquellas que tienden a aumentar y disminuir de manera sincronizada. Como resultado del análisis, se lograron extraer dos clústeres bien diferenciados, lo que permite una mejor interpretación de los patrones temporales presentes en los datos. Finalmente, la clusterización obtenida se representa en la Figura 7, donde se pueden observar las tendencias de las precipitaciones medias mensuales en la ciudad de Bogotá D.C.

6.2 Modelo de Cálculo Propuesto

Considerando las metodologías descritas en el capítulo 5.4, junto con los análisis estadísticos e hidrológicos expuestos en los capítulos 5.2 y 5.3, y en cumplimiento de los requerimientos normativos, se diseñó una metodología para determinar los volúmenes de amortiguamiento de aguas lluvias. Esta metodología se basa en los parámetros generales de las edificaciones, desde la fase de prefactibilidad del proyecto hasta la selección del tipo de cobertura y el área ejecutada, garantizando su alineación con la normativa nacional y distrital aplicable. Asimismo, la metodología propuesta tiene en cuenta las condiciones hidrológicas antes y después del desarrollo de la zona a intervenir. Teniendo en cuenta todo esto, para el desarrollo de la metodología se tienen los parámetros que se explican en lo subsecuente.

6.2.1 Obtención Información de lluvias diarias

Para la metodología desarrollada es necesario contar con los registros de mínimo los últimos 10 años de precipitación diaria, información que fue obtenida con las entidades correspondientes,

IDEAM, IDIGER y la EAAB. Teniendo en cuenta lo indicado, la presente investigación cuenta con información de los últimos 10 años de 57 estaciones pluviométricas localizadas en la ciudad de Bogotá.

6.2.2 Determinación de lluvias máximas 24 horas

Con la información recolectada, se debe realizar un análisis de datos con el fin de determinar los valores máximos 24 horas mensuales, ya que este es un insumo para la determinación de las curvas IDF de la estación analizada.

6.2.3 Determinación de Curvas IDF método Vargas M.R. - Díaz-Granados O.M - Universidad de los Andes

Para la determinación de las curvas IDF se optó por usar el método de Vargas M.R. - Díaz-Granados O.M descrito en la referencia 36. En esta investigación se derivaron curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) relacionadas con la precipitación máxima anual media en 24 horas, la cantidad media de días de lluvia al año, la precipitación total media anual y la altitud de la estación. No obstante, la correlación más favorable se consiguió con la precipitación máxima anual promedio en 24 horas en una estación, y es la que se sugiere para los estudios, además de ser la más fácil de aplicar.

6.2.4 Determinación de tiempos de concentración

Para determinar el tiempo de concentración del proyecto a analizar se tiene como método de cálculo la fórmula de Kirpich, que es la fórmula aprobada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, acorde a la referencia 37.

6.2.5 Determinación de caudal pico de diseño

Teniendo como referencia las curvas IDF calculadas y el tiempo de concentración por medio del método racional se determinan los caudales pico del proyecto, este método es utilizado en la ingeniería hidráulica con el objetivo de estimar el caudal pico de escorrentía superficial que puede generarse en una cuenca durante un evento de lluvia de diseño. Este método es particularmente útil en el diseño de sistemas de drenaje urbano.

La descripción y aplicación del método racional se aclara en la referencia 37.

6.2.6 Determinación del Hidrograma unitario acorde al SCS

Una vez estén los parámetros anteriormente definidos, se procede a desarrollar el diagrama unitario del proyecto estudiado para las estaciones climatológicas consultadas, para este caso se plantea con el método del SCS descrito en el manual de drenaje del Invías capítulo 2.

6.2.7 Determinación de volumen

Una vez desarrollados los hidrogramas unitarios (ver ***Figura 10***. Hidrograma unitario tipo ejemplo (Autores, 2024)) para las condiciones pre y post desarrollo, se procede a determinar el volumen necesario para conservar la condición hidrológica en la zona de interés, esto se realiza determinando el área bajo la curva entre el hidrograma post desarrollo y el hidrograma predesarrollo.

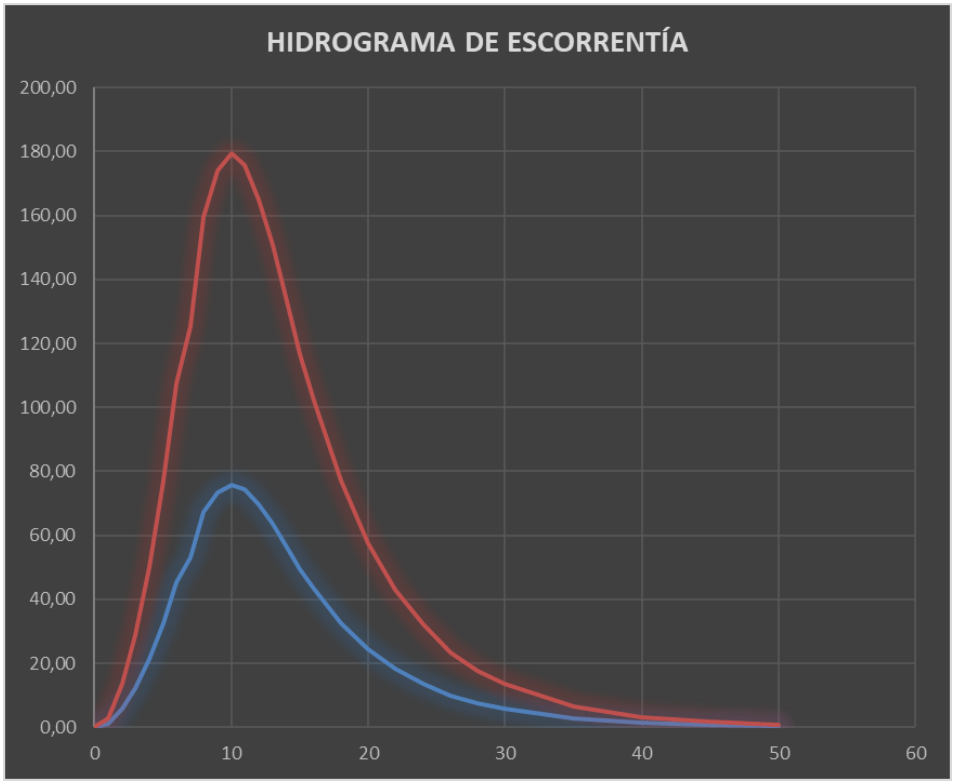


Figura 10. Hidrograma unitario tipo ejemplo (Autores, 2024)

6.3 Proceso de aplicación de la metodología

En este capítulo se presenta una guía detallada para la correcta implementación y uso de la metodología de diseño propuesta, asegurando su aplicabilidad en distintos escenarios. Para el correcto uso de la metodología descrita, se deben seguir los siguientes pasos:

Paso 1 - Determinación de parámetros iniciales del proyecto

El primer paso para proceder con la determinación de los volúmenes óptimos para el amortiguamiento de aguas lluvias es determinar los parámetros iniciales del proyecto, lo cuales son:

- Localización
- Área de lote

- Longitud lote
- Tipo de proyecto a construir
- Área cubierta proyecto final
- Área verde proyecto final
- Altura edificación
- Longitud edificación

Paso 2 - Determinación de estaciones meteorológicas cercanas

Se debe localizar el proyecto por medio de la plataforma Google Earth, y junto con el archivo Red Estaciones Bogotá.kmz, desarrollado durante esta investigación, se deberán ubicar las 3 estaciones más cercanas al proyecto. Este paso es fundamental con el fin de determinar la incidencia de los datos climatológicos de las estaciones en la zona de estudio, ya que esta herramienta nos ayuda a cuantificar las distancias de las diferentes estaciones al punto de interés.

Paso 3 – Uso metodología de cálculo López-Bain

Una vez que se han identificado las estaciones y los datos generales del proyecto, se inicia el uso de la metodología López-Bain, que dispone de una hoja de cálculo para realizar la determinación de los volúmenes de amortiguación del proyecto en análisis. Ya con la digitación de los datos la metodología da el volumen estimado recomendado para el amortiguamiento de lluvias. En el siguiente enlace se encuentra la hoja de cálculo desarrollada, acompañada de una breve descripción para su correcta aplicación.

Enlace metodología: METODOLOGÍA LOPEZ/BAIN

López, R. A & Bain, J.C (2025). Carpeta 07. METODOLOGIA FINAL, METODOLOGÍA LOPEZ/BAIN

6.4 Aplicación de la metodología en proyectos existentes

Para la correcta aplicación de la metodología propuesta, se seleccionaron dos proyectos desarrollados por la empresa Construcciones Planificadas S.A., los cuales cuentan con la certificación LEED, que garantiza la implementación adecuada de prácticas para el manejo de las aguas de escorrentía. Es relevante señalar que, debido a restricciones de confidencialidad, solo se pudo acceder a información general de los proyectos, sin disponer de planos detallados. No obstante, dado que la metodología desarrollada está orientada a la estimación de volúmenes de amortiguamiento en las fases de prefactibilidad y factibilidad para futuros proyectos de edificación, se considera que la información disponible es suficiente para su adecuada aplicación en este contexto. Los proyectos elegidos son los siguientes:

- Centro comercial El Edén
- Centro de investigación contra el Cáncer Luis Carlos Sarmiento

6.4.1 Proyecto 1 – Centro comercial El Edén

El centro comercial es El Edén, un proyecto de tipo comercial, localizado en la Avenida Boyacá con calle 12, como se puede observar en la ***Figura 11***. Localización Centro Comercial El Edén (Google Earth, 2024), cuenta con un área construida de aproximadamente 162.000 m2 compuestos por 3 pisos y 2 sótanos, además, cuenta con 1847 parqueaderos y 243 locales de diferentes dimensiones.

Referente a los datos generales necesarios para la aplicación correcta de la metodología, fueron facilitados los planos de implantación del proyecto, donde se identifica la información relevante y necesaria para la implementación de la metodología, estos datos obtenidos son los siguientes:

- Localización: Av. Boyacá con Calle 12
- Área de lote: El área del lote, según planos es de 40235 m2

- Longitud lote: La longitud del lote, siendo la diagonal más larga, según medidas de AutoCAD son 338 m
- Tipo de proyecto a construir: Comercial
- Área dura proyecto final: El área dura total del proyecto es 40235 m2
- Área verde proyecto final: Las zonas verdes del proyecto son pocas, por lo cual para efectos prácticos se consideran 0 m2, así mismo, esto da un factor al momento de dimensionar el volumen
- Altura edificación: La altura según planos es de 33.75 m
- Longitud edificación: La longitud, siendo la diagonal más larga del proyecto, según medidas sobre planos es de 312 m

Teniendo estos datos procedemos a la aplicación de la metodología. El primer paso es contar con la información del proyecto, la cual se mencionó anteriormente. El segundo paso es localizar el proyecto y las 3 estaciones más cercanas (figuras 10, 11 y 12), así como la distancia de estas al proyecto.



Figura 12. Localización Centro Comercial El Edén (Google Earth, 2024)

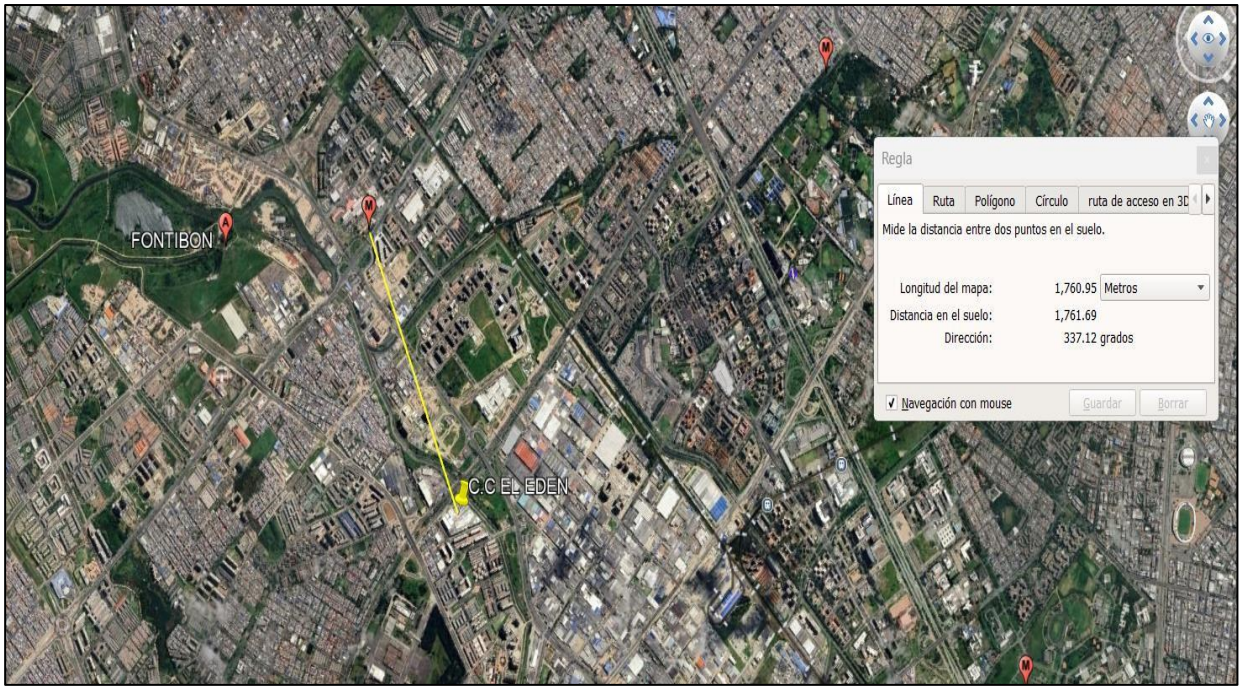


Figura 13. Localización estación Inem Kennedy (Google Earth, 2024)



Figura 14. Localización estación Fontibón (Google Earth, 2024)

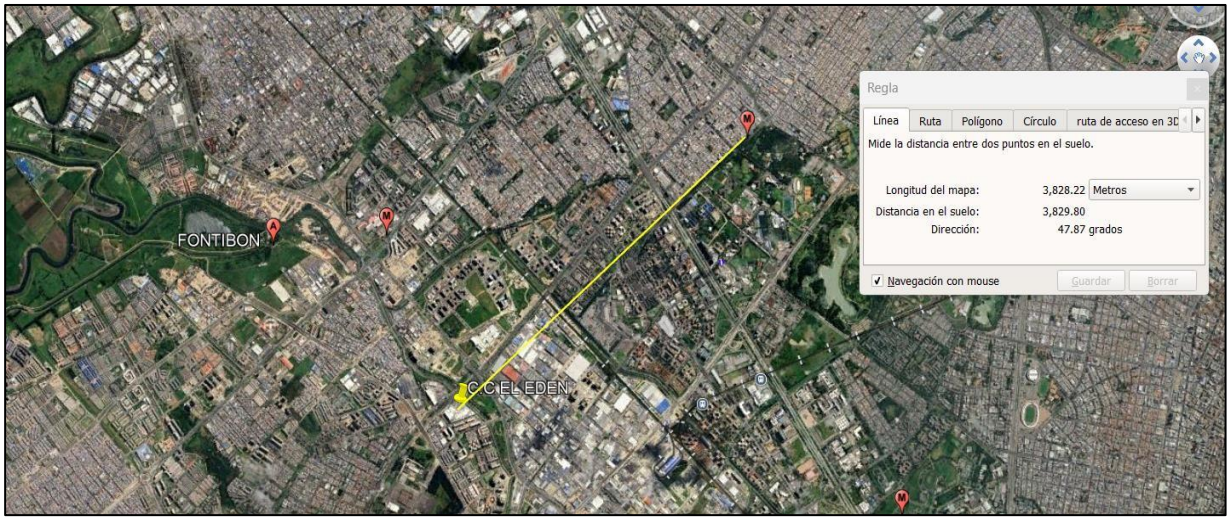


Figura 15. Localización estación Jardín Botánico (Google Earth, 2024)

Se identificaron las 3 estaciones mostradas en las anteriores Figuras, las cuales también se muestran sus respectivas distancias, a continuación:

- Inem Kennedy, localizada a 1761 metros
- Fontibón: Localizada a 2394 metros
- Jardín Botánico: Localizada a 3829 metros

Posteriormente, con la información compilada, procedemos a digitarla en la hoja “datos iniciales” (ver **Tabla 5.** Digitalización de datos información general Centro Comercial El Edén) de la metodología entregada.

Tabla 5. Digitalización de datos información general Centro Comercial El Edén

DATOS DEL PASO 1			
NOMBRE DE PROYECTO	EL EDÉN CENTRO COMERCIAL		
TIPO DE PROYECTO	COMERCIO		
ÁREA LOTE	40235	m2	
ÁREA DURA	40235	m2	
ÁREA ZONA VERDE	0	m2	
ALTURA EDIFICACIÓN	33,75	m	
LONGITUD EDIFICACIÓN (DIMENSIÓN E)	312	m	
LONGITUD LOTE (DIMENSIÓN C)	338	m	
DATOS DEL PASO 2			
	1	2	3
ESTACIÓN	JARDIN BOTANICO	INEM KENNEDY	FONTIBON (EAAB)
DISTANCIA (m)	3829	1761	2394

Fuente: Autores, 2024.

Una vez digitada la información, en la pestaña “Volumen de diseño” (ver **Tabla 6.** Volumen estimado para el proyecto) se nos indica el volumen que deberíamos tener en cuenta acorde a la normativa NS-085 del acueducto de Bogotá, es de 484.36 m^3.

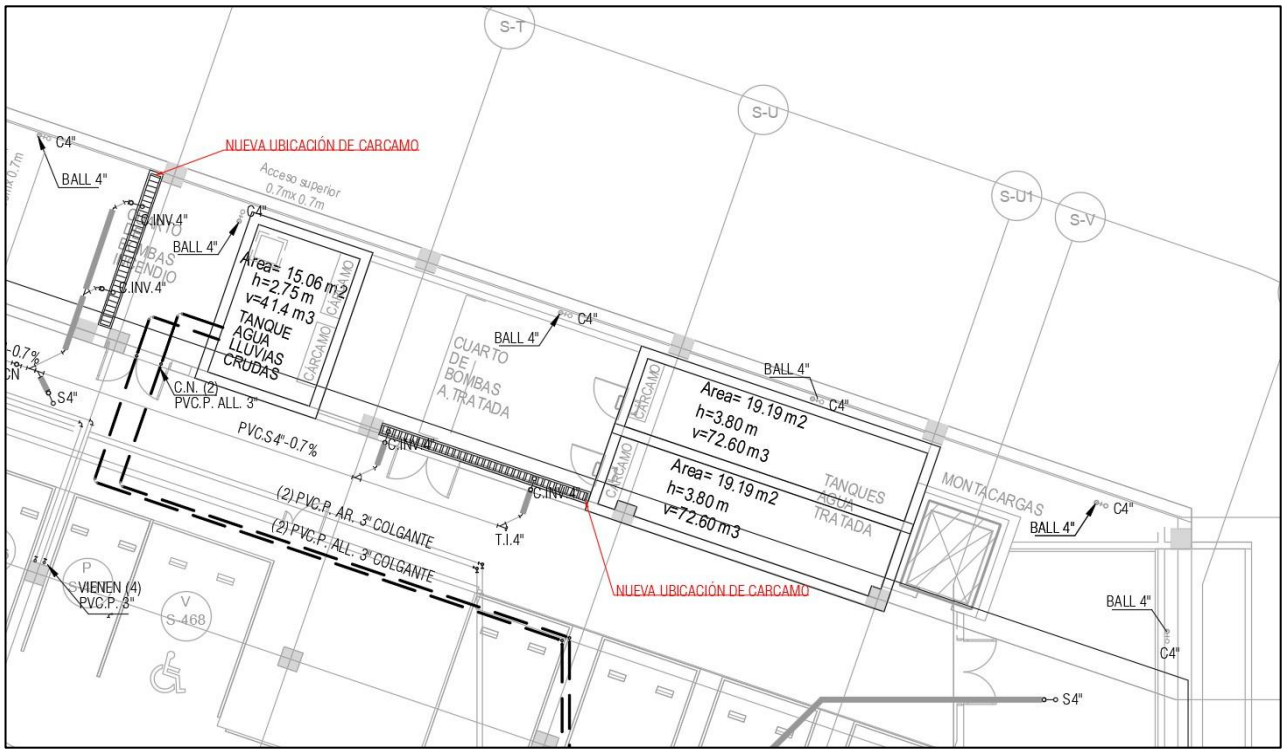
Tabla 6. Volumen estimado para el proyecto

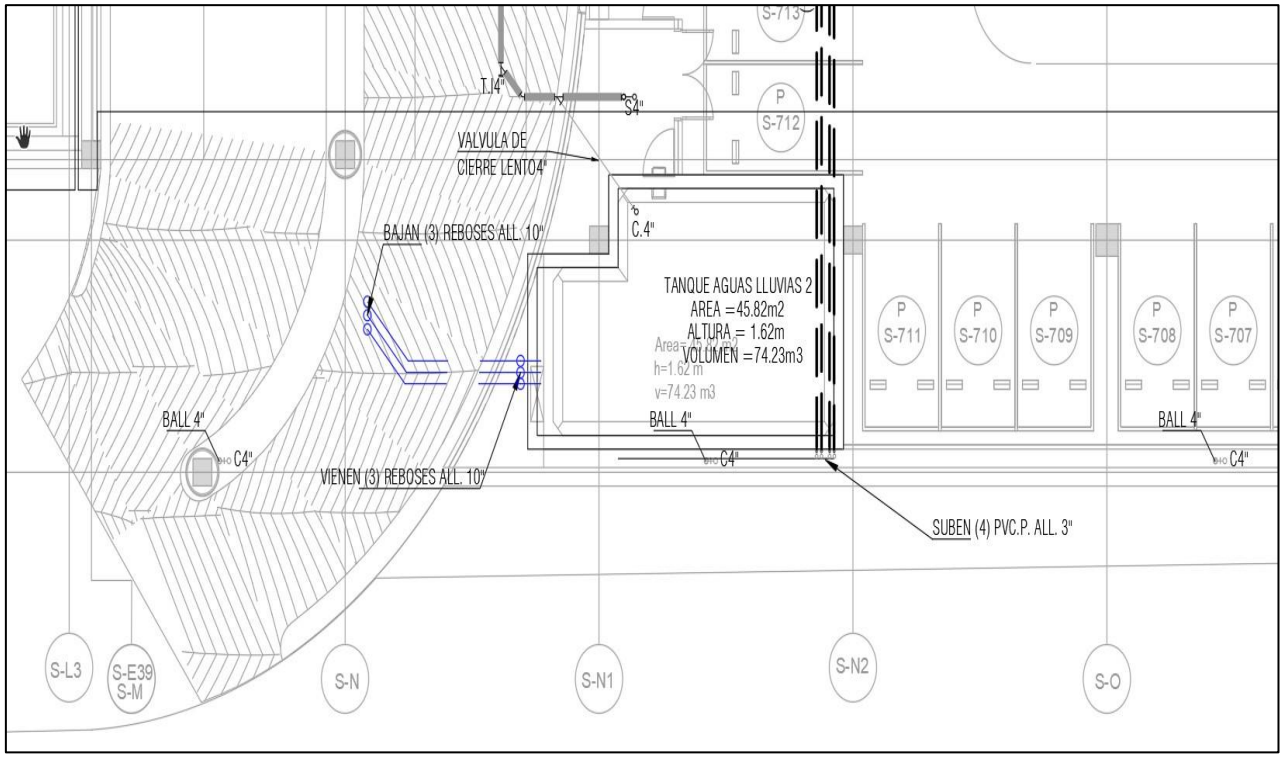
EL VOLUMEN RECOMENDADO PARA EL PROYECTO CUMPLIENDO NS085 ES DE:	484,36	M3

Fuente: Autores, 2024.

Con este resultado, y con la intención de validar el volumen obtenido con la información construida, se identifica que el proyecto actualmente cuenta con un volumen de almacenamiento

de 260 m³, dividido en 3 tanques localizados a nivel de semi sótano, tal como se muestra a continuación en la ***Figura 16***. Tanques existentes en el proyecto Centro Comercial El Edén (CPSA, 2024):





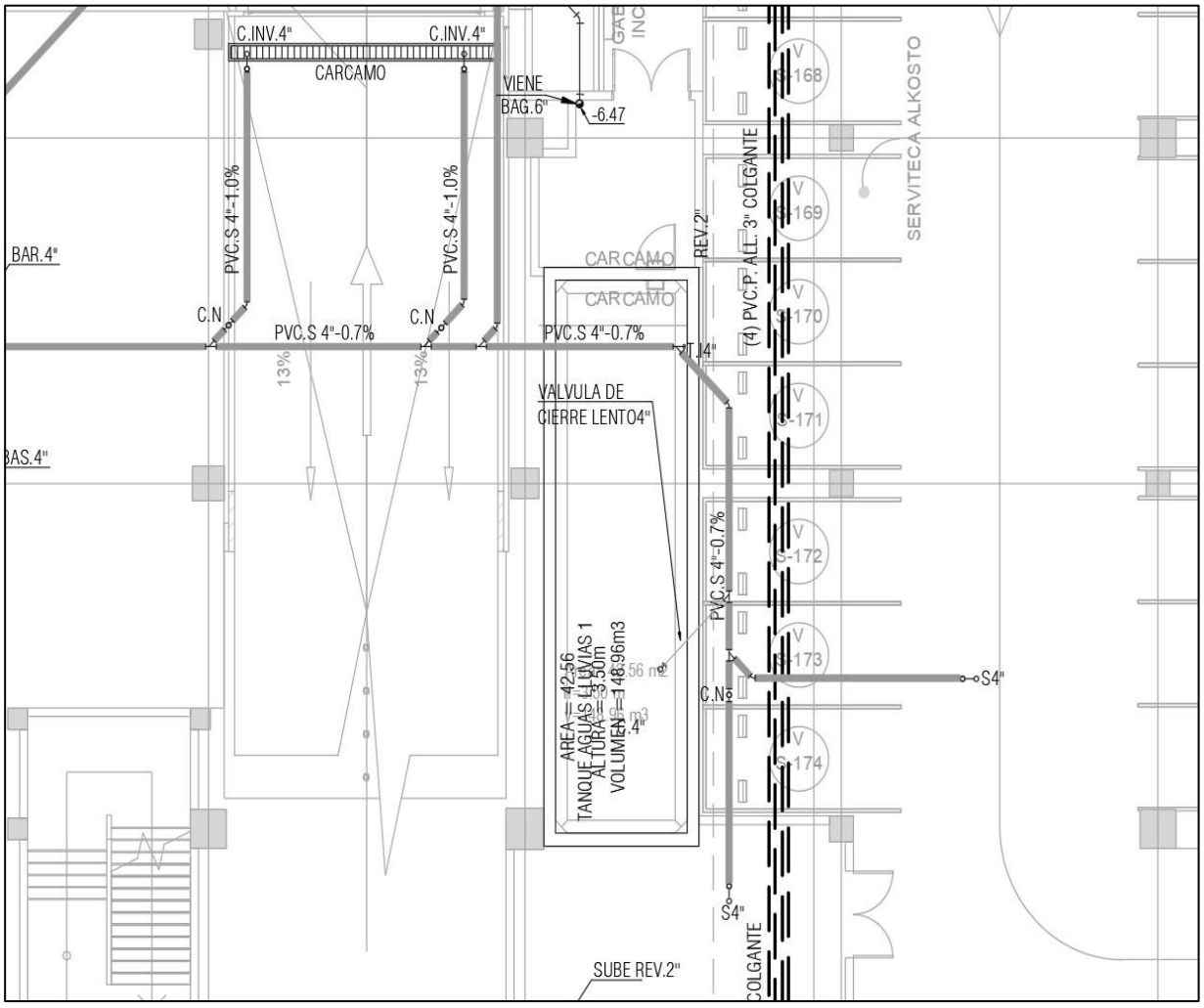


Figura 17. Tanques existentes en el proyecto Centro Comercial El Edén (CPSA, 2024)

La diferencia presentada es debido a que en el momento de la construcción no se cumplió con la norma NS-05 del acueducto debido a la no exigencia de esta, por lo cual se optó por cumplir con las exigencias de la certificación LEED 2009.

6.4.2 Proyecto 2 – Centro de investigación contra el Cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo

El Centro de Tratamiento e Investigación sobre Cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo - CTIC, está ubicado en el norte de Bogotá, ver ***Figura 18***. Localización Centro de Tratamiento e Investigación sobre Cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo – CTIC (Google Earth, 2024), en una

zona de desarrollo urbanístico de vivienda multifamiliar ya en consolidada, cercano a vías e infraestructura de nivel metropolitano, como la Autopista Norte, el Portal Norte de Transmilenio, Carreras 7ª y 9ª, centros comerciales, y hospitales de tercer nivel.

Este proyecto cuenta con un área construida aproximada de 100.000 m2, constituido por un edificio hospital de 11 pisos, edificio de investigación de 4 pisos, 2 sótanos con 1200 parqueaderos, dentro de los servicios brindados se tienen los siguientes:

- Radioterapia: 8 Bunkers, 4 completamente dotados, y 4 para futuro crecimiento.
- Imágenes diagnósticas y medicina nuclear
- Zona de Cirugía
- Zona de UCI
- Consulta Externa: 103 consultorios, 4 salas de procedimientos
- Hospitalización: 130 habitaciones, incluyendo pediatría, aislados, trasplante de médula ósea, cuidados intermedios
- Quimioterapia: 55 sillas
- Otros servicios tal como gastroenterología, Unidad de apoyo terapéutico, Hospitalización parcial, Esterilización, Farmacia y Central de Mezclas, Laboratorio clínico y Laboratorio de Investigación

El proyecto a nivel hidráulico cuenta con un sistema de aprovechamiento de aguas lluvias localizado a nivel de sótano, el cual recolecta las aguas provenientes de la cubierta únicamente del edificio hospital, las demás zonas del proyecto descargan libremente a las domiciliarias del proyecto, localizadas a nivel de la carrera 14 y 15.

Referente a los datos generales necesarios para la aplicación correcta de la metodología, fueron facilitados los planos de implantación del proyecto, donde se identifica la información relevante y necesaria para la implementación de la metodología, estos datos obtenidos son los siguientes:

- Localización: Calle 170 entre carrera 14 y 15.
- Área de lote: El área del lote, según planos es de 32322 m2
- Longitud lote: La longitud del lote, siendo la diagonal más larga, según medidas de AutoCAD son 263 m
- Tipo de proyecto a construir: Institucional
- Área dura proyecto final: El área dura, compuesta por cubiertas y senderos peatonales del proyecto es aproximadamente 9537 m2
- Área verde proyecto final: Las zonas verdes del proyecto son considerables teniendo en cuenta la naturaleza de este, por lo cual se tienen aproximadamente 22785m2 de zonas verdes.
- Altura edificación: La altura según planos es de 65 m
- Longitud edificación: La longitud, siendo la diagonal más larga del proyecto, según medidas sobre planos es de 165 m de la edificación de 11 pisos.

Teniendo estos datos procedemos a la aplicación de la metodología.

El primer paso es contar con la información del proyecto, la cual se mencionó anteriormente.

El segundo paso es localizar el proyecto y las 3 estaciones más cercanas, así como la distancia de estas al proyecto (ver figuras 15,16 y 17).

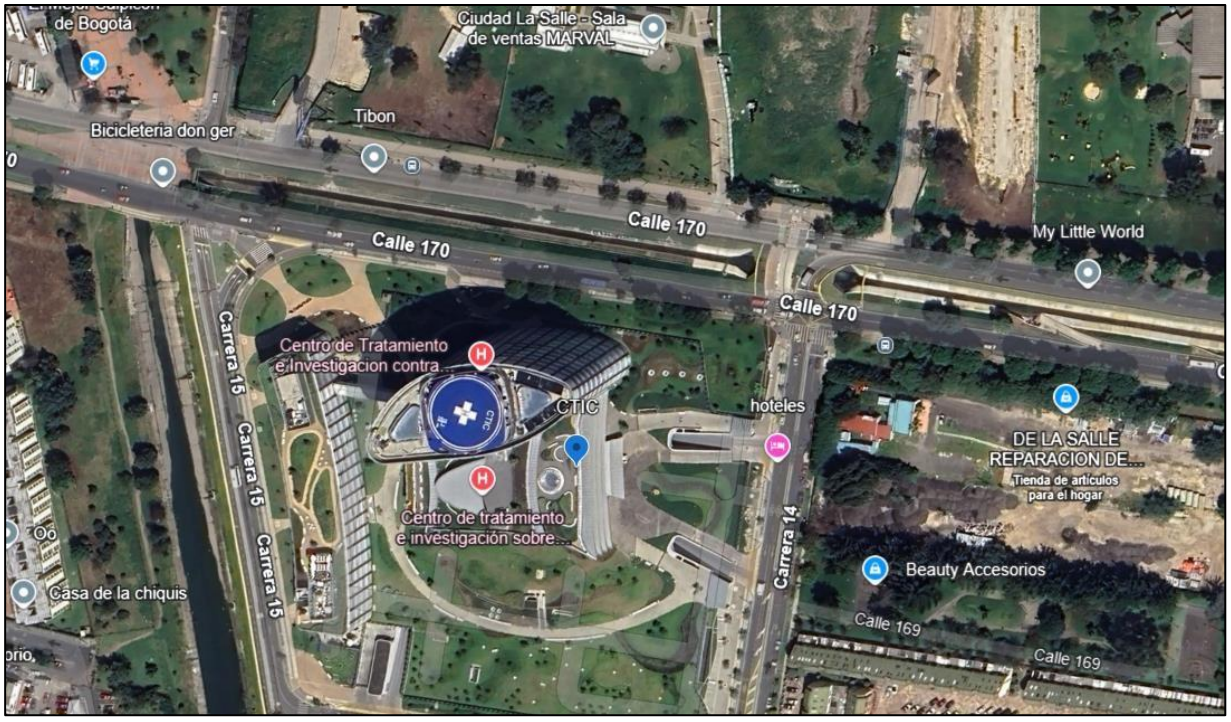


Figura 19. Localización Centro de Tratamiento e Investigación sobre Cáncer Luis Carlos Sarmiento Angulo – CTIC (Google Earth, 2024)

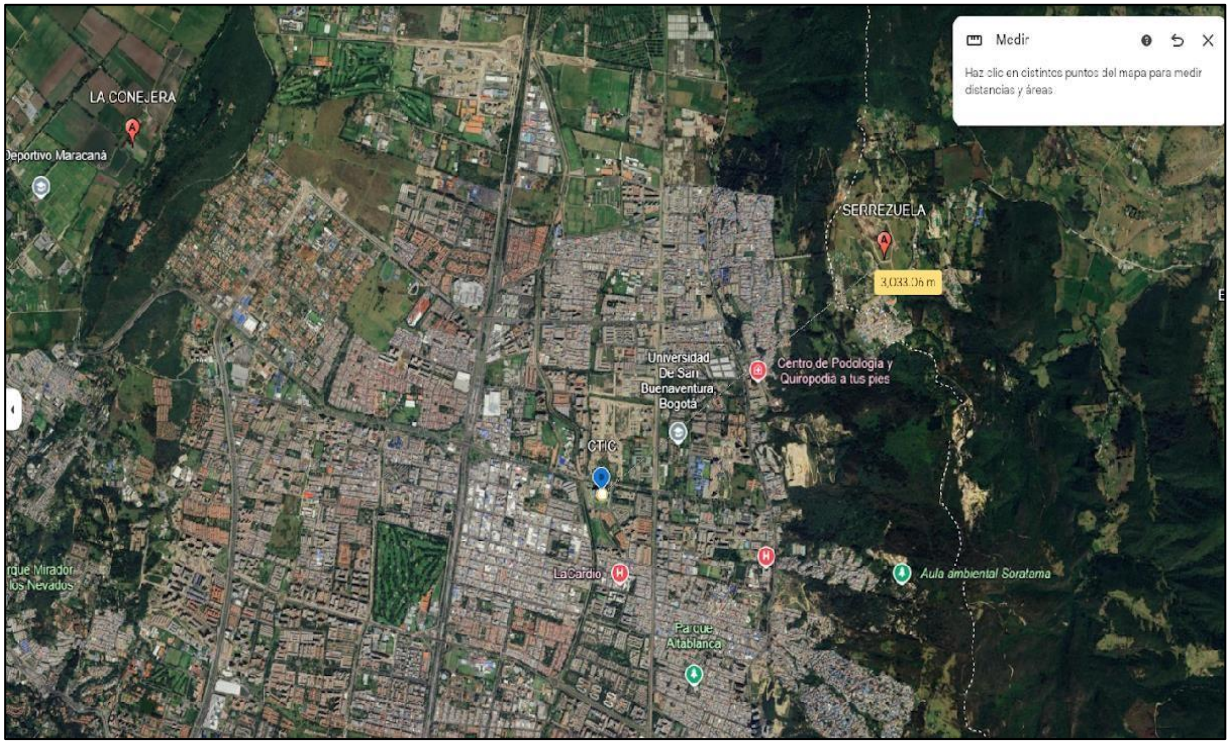


Figura 20. Localización Estación Serrezuela (Google Earth, 2024)

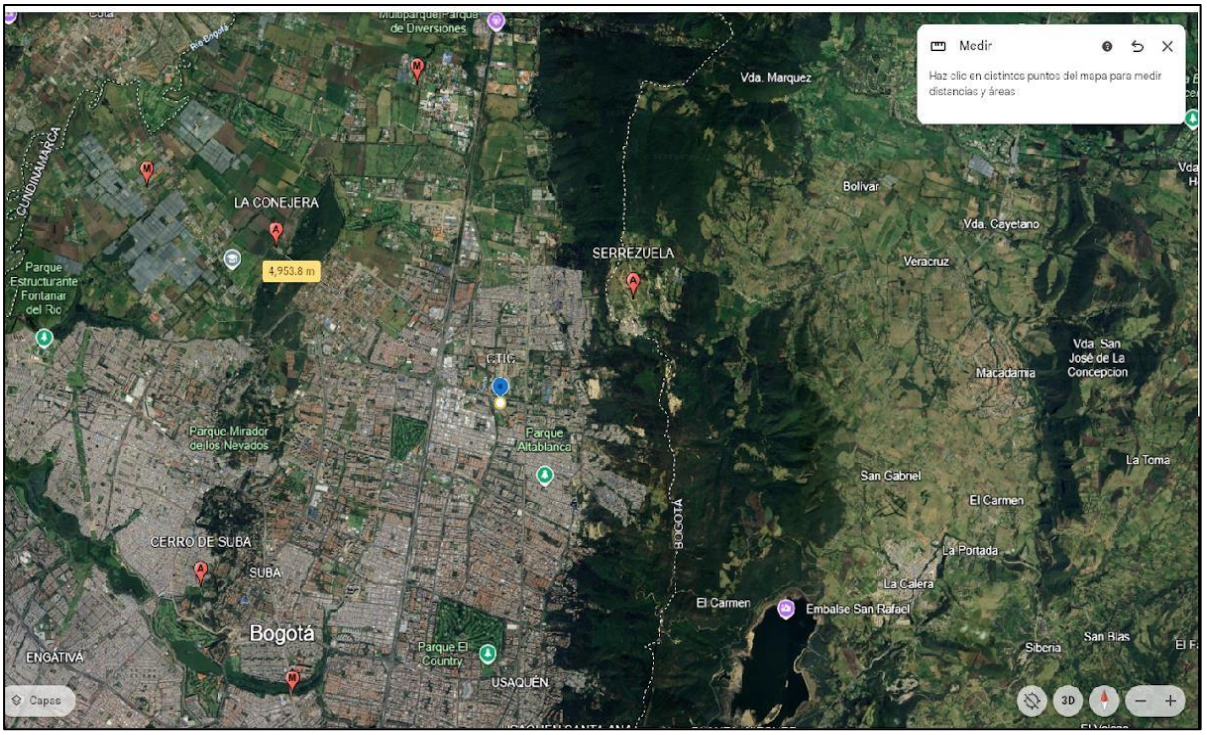


Figura 21. Localización Estación Conejera (Google Earth, 2024)

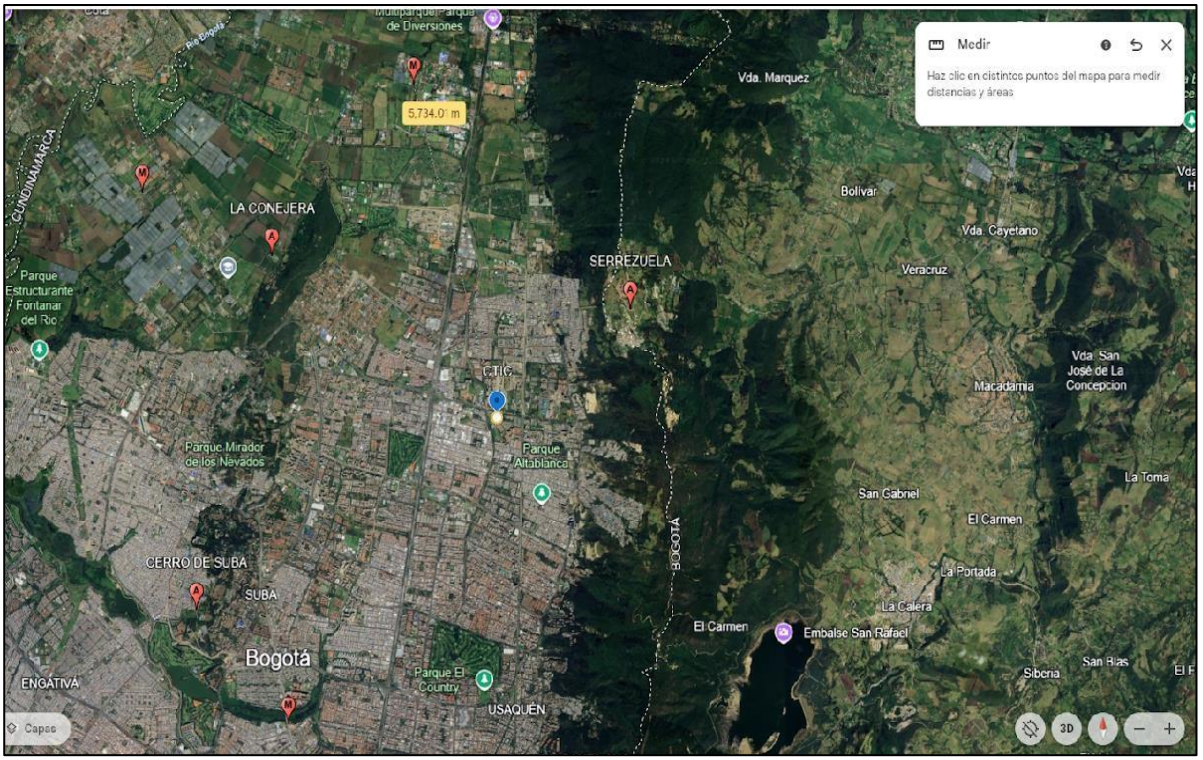


Figura 22. Localización Estación UDCA (Google Earth, 2024)

Se identificaron las 3 estaciones, las cuales también se muestran sus respectivas distancias, así:

- Serrezuela, localizada a 3033 metros
- La conejera, localizada a 4953.8 metros
- UDCA, localizada a 5734 metros

Con la información compilada, procedemos a digitarla en la hoja “datos iniciales” de la metodología entregada (ver **Tabla 7.** Digitalización Datos Información General CTIC).

Tabla 7. Digitalización Datos Información General CTIC

DATOS DEL PASO 1			
NOMBRE DE PROYECTO	HOPITAL CTIC		
TIPO DE PROYECTO	INSTITUCIONAL		
ÁREA LOTE	32322	m2	
ÁREA DURA	9537	m2	
ÁREA ZONA VERDE	22785	m2	
ALTURA EDIFICACIÓN	65	m	
LONGITUD EDIFICACIÓN (DIMENSIÓN E)	115	m	
LONGITUD LOTE (DIMENSIÓN C)	263	m	
DATOS DEL PASO 2			
	1	2	3
ESTACIÓN	SERREZUELA (EAAB)	LA CONEJERA (EAAB)	UDCA
DISTANCIA (m)	3033	4953,8	5734

Fuente: Autores, 2024.

Una vez digitada la información, en la pestaña “Volumen de diseño” (ver **Tabla 8.** Volumen estimado para el proyecto), nos indica el volumen que deberíamos tener en cuenta acorde a la normativa NS-085 del acueducto de Bogotá, el cual es de 159.20 m^3.

Tabla 8. Volumen estimado para el proyecto

EL VOLUMEN RECOMENDADO PARA EL PROYECTO CUMPLIENDO NS085 ES DE:	159,20	M3

Fuente: Autores, 2024.

Sin embargo, teniendo en cuenta que el proyecto no recolectó todas las zonas duras (cubiertas y senderos peatonales) del mismo, se realizó el cálculo teniendo en cuenta solo la cubierta del edificio Hospital, con lo cual se obtuvo los siguientes resultados mostrados en **Tabla 9.** Digitalización Datos Información General CTIC solo cubierta Hospital y **Tabla 10.** Volumen estimado para el proyecto solo Cubierta Hospital.

Tabla 9. Digitalización Datos Información General CTIC solo cubierta Hospital

DATOS DEL PASO 1			
NOMBRE DE PROYECTO	HOPITAL CTIC		
TIPO DE PROYECTO	INSTITUCIONAL		
ÁREA LOTE	32322	m2	
ÁREA DURA	4596	m2	
ÁREA ZONA VERDE	27726	m2	
ALTURA EDIFICACIÓN	65	m	
LONGITUD EDIFICACIÓN (DIMENSIÓN E)	115	m	
LONGITUD LOTE (DIMENSIÓN C)	263	m	
DATOS DEL PASO 2			
	1	2	3
ESTACIÓN	SERREZUELA (EAAB)	LA CONEJERA (EAAB)	UDCA
DISTANCIA (m)	3033	4953,8	5734

Fuente: Autores, 2024.

Tabla 10. Volumen estimado para el proyecto solo Cubierta Hospital

EL VOLUMEN RECOMENDADO PARA EL PROYECTO CUMPLIENDO NS085 ES DE:	76,72	M3

Fuente: Autores, 2024.

Con este resultado, y con la intención de validar el volumen obtenido con la información construida, se identifica que el proyecto actualmente cuenta con un volumen de almacenamiento

de 81.14 m3, dividido en 2 tanques localizados a nivel de semisótano, tal como se muestra a continuación en la ***Figura 23***. Tanques existentes en el proyecto CTIC (CPSA, 2024):

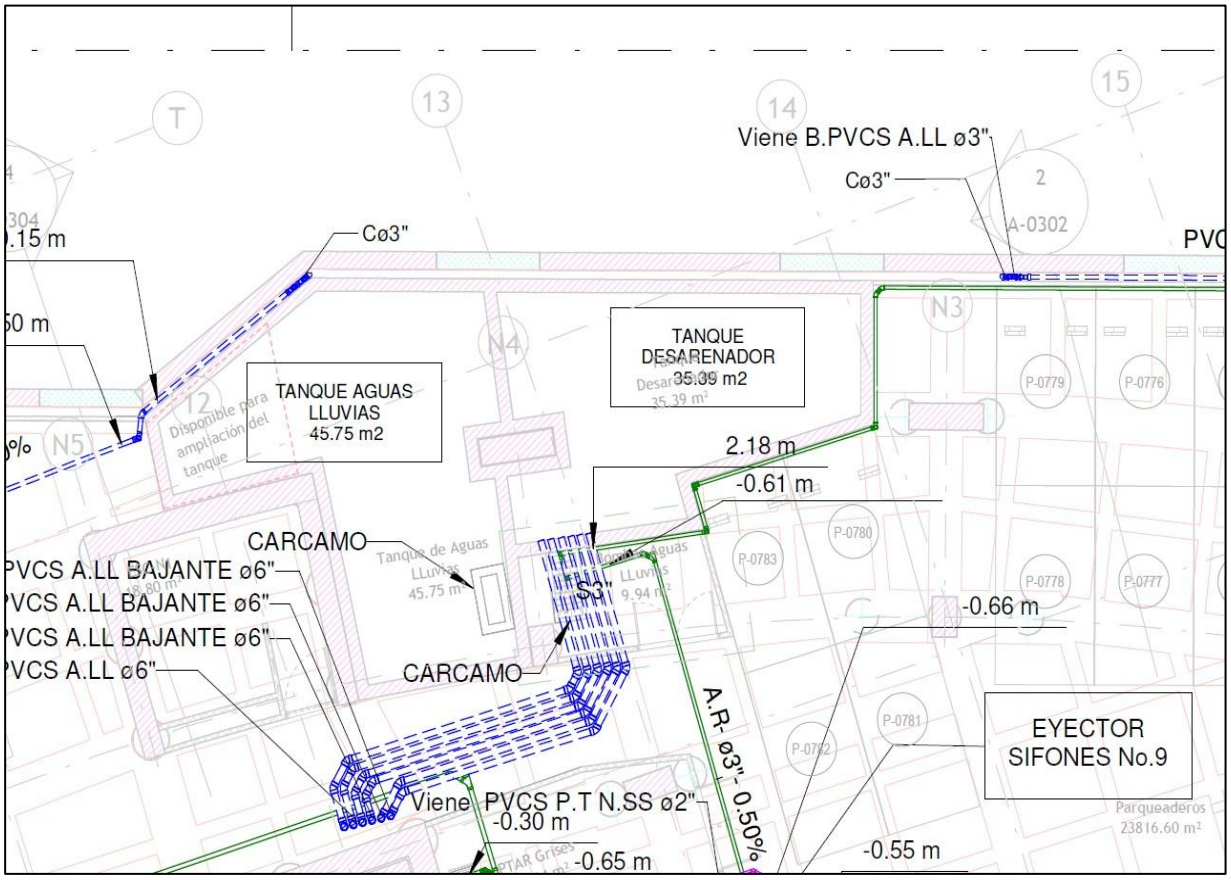


Figura 24. Tanques existentes en el proyecto CTIC (CPSA, 2024)

Teniendo en cuenta la información suministrada, y considerando las áreas duras las cuales se recolecta el agua lluvia se puede verificar que la metodología desarrollada es muy cercana a los cálculos realizados por parte de los diseñadores hidrosanitarios, sin embargo, considerando la totalidad de las zonas duras del proyecto se evidencia que el volumen requerido para cumplir la norma NS-085 debería ser de 159.20 m3 sin embargo, la diferencia presentada es debido a que en el momento de la construcción no se cumplió con la norma NS-085 del acueducto debido a

la no exigencia de esta, por lo cual se optó por cumplir con las exigencias de la certificación LEED 2009.

7 Conclusiones

- Tras realizar las pruebas descritas en el capítulo 5.3 y considerando la homogeneidad y estacionalidad de los datos obtenidos de las 56 estaciones pluviométricas, se observa la presencia de variabilidad climática en la ciudad de Bogotá. En este contexto, la metodología de cálculo desarrollada, basada en la información pluviométrica de los últimos 10 años e incluyendo eventos extremos como determinantes del cálculo hidráulico, podría ayudar a reducir la incertidumbre en la estimación del volumen de las estructuras hidráulicas destinadas al amortiguamiento de aguas lluvias.
- De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la aplicación de algoritmos descritos en el capítulo 6.1.2, se concluye que Bogotá presenta tendencias de variabilidad climática. Las ocho pruebas de homogeneidad y estacionariedad respaldan esta conclusión, ya que los resultados permiten aceptar la hipótesis planteada como válida. Dichos resultados evidencian fenómenos relacionados directamente con variaciones en la precipitación, asociados a la variabilidad climática en Bogotá D.C.
- La modelación de segmentación y regionalización de lluvias optimiza la planificación, prevención y mitigación de riesgos asociados al diseño de estructuras hidráulicas, ya que se basa en el análisis de los patrones de precipitación a lo largo de periodos históricos. Este enfoque permite identificar y parametrizar regiones específicas según la intensidad y duración de las precipitaciones, integrando además

los resultados en el software ArcGIS Pro.

- La aplicación de pruebas de homogeneidad y estacionariedad facilitó la detección de tendencias diferenciadas en regiones clasificadas como zonas de alta y baja intensidad de lluvias, evidenciando una relación directa con fenómenos de variabilidad climática propios de la región. Estos resultados, contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento temporal de las precipitaciones y respaldan el desarrollo de metodologías más precisas para el diseño de tanques de amortiguamiento y/o almacenamiento de aguas lluvias.
- La presente metodología es un acercamiento al cálculo de los volúmenes de amortiguamiento y/o aprovechamiento de aguas lluvias en cualquier tipo de edificación, así mismo con esta se logra cumplir con los requerimientos normativos exigidos en la ciudad de Bogotá, por lo que es un elemento fundamental en el momento de proyectar presupuestos en etapas de prefactibilidad y factibilidad de proyectos.
- Es responsabilidad del equipo técnico realizar la correcta interpretación de los datos obtenidos al usar esta metodología.
- La metodología descrita parece ser adecuada principalmente para proyectos de edificación. No se sugiere su uso en proyectos de urbanismo debido a las diferencias en los criterios de análisis hidráulicos e hidrológicos. Sin embargo, podría ser utilizada para obtener un valor aproximado de volúmenes, siempre y cuando el área del proyecto no exceda las 80 hectáreas.

- Una vez implementada la metodología Lopez/Bain en los proyectos existentes, se puede concluir que debido a la exigencia de cumplimiento normativo a los nuevos proyectos que estén bajo el POT 555 del 2021 de la ciudad de Bogotá, los cálculos obtenidos son mayores, sin embargo, si se revisa el planteamiento de estos proyectos y la normativa que se aplicó, se puede concluir que los valores obtenidos son cercanos a la realidad de los proyectos y así determinar qué es un método de estimación válido para realizar análisis de presupuestos y áreas técnicas para los nuevos proyectos a desarrollar en la ciudad de Bogotá.
- Con la implementación de esta metodología se asegura el correcto cumplimiento de las normas nacionales y distritales, en lo referente al manejo de escorrentía dentro de los proyectos de edificaciones.
- Los volúmenes estimados mediante la metodología presentada podrían servir para aproximarse a los requisitos solicitados por las certificaciones de sostenibilidad emitidas por las entidades correspondientes. Esto podría incluir la determinación de los sistemas de gestión de escorrentía requeridos en certificaciones como CASA, emitida por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, y/o LEED, emitida por la Green Business Certification Inc. (GBCI).
- La presente investigación también puede servir para la determinación de la intensidad de diseño en redes internas en las edificaciones para los cálculos hidráulicos de las mismas.
- Generar modelos de pronóstico dentro del dimensionamiento de estructuras hidráulicas a partir del análisis del comportamiento de lluvias en una región es esencial para mitigar posibles impactos relacionados con la fluctuación de las precipitaciones en el

abastecimiento del recurso, ya que brinda un panorama a futuro acerca de la capacidad de sostenibilidad, adicional a las nuevas tendencias de construcción sostenibles que se están implementando no solo en Colombia sino en muchos de los países del continente.

- La metodología desarrollada en este trabajo de grado se encuentra actualmente en implementación para los análisis de prefactibilidad y factibilidad de proyectos de edificación en la empresa Construcciones Planificadas S.A. Su aplicación permite contrastar los resultados obtenidos con los determinados por especialistas en sostenibilidad, evidenciando una correlación cercana entre ambos valores. Esto valida la metodología como una herramienta eficaz para la toma de decisiones en el diseño de redes internas, facilitando la determinación de los espacios técnicos requeridos dentro de las edificaciones. Asimismo, su uso contribuye al cumplimiento de las exigencias establecidas en el POT 555.

8 Recomendaciones

Se recomienda tener en cuenta las siguientes limitaciones que se obtuvieron a partir de este estudio, en pro de mejorar futuros desarrollos.

1. Calidad de los Datos: Se considera este factor de gran impacto, ya que, para el análisis estadístico y geoespacial, la información de las bases de datos hidrológicos debe tener en cuenta datos faltantes o repetidos, e incluso un posible error en la información recolectada; para lo cual se deberán procesar los datos mediante pruebas de correlación de la información para verificar su veracidad.
2. Procesamiento de la información: Debido a que esta propuesta metodológica se basa principalmente en las bases de datos obtenidas y procesadas, se considera importante generar distintos tipos de modelación de estos, partiendo de procesamiento en minería de datos o Big data a partir de lenguajes como SQL a través de software gratuito como lo es GCP. Se considera pueden presentarse posibles errores en el desarrollo de procedimientos almacenados, para lo cual se ideará su verificación a través de librerías de Python o R de acuerdo con la complejidad de los mismos.
3. Los volúmenes estimados son de referencia, ya que es responsabilidad del especialista hidráulico realizar las interpretaciones necesarias para la correcta implementación de estos cálculos.
4. Los datos utilizados en esta metodología son los registros del año 2013 al 2023, para futuras investigaciones, en años posteriores, se recomienda actualizar los datos, teniendo en cuenta los resultados mostrados referente a variabilidad climática.
5. El presente trabajo puede ayudar a una futura investigación referente al comportamiento de las lluvias en la ciudad de Bogotá, ya que se identifican zonas con cambios de

intensidades,

concluyendo que no es posible aplicar los mismos datos de intensidades en toda la ciudad para cálculos de redes internas.

6. Dado que la metodología fue desarrollada específicamente para la ciudad de Bogotá, su aplicación está inicialmente limitada a proyectos dentro de este territorio. No obstante, puede ser utilizada en otras regiones del país, siempre que se disponga de datos de precipitaciones diarias con un periodo de al menos 10 años para el área de estudio.

9 Bibliografía

1. Acuña Domínguez, J. A. D. & Fernández Adrian, J. C. (2022). Propuesta de captación de aguas pluviales para el aprovechamiento sanitario en una vivienda multifamiliar, Cajabamba-2022. ucv.edu.pe
2. Alfonso Arrieta-Pastrana, M. S. (2022). Analysis of Climate Variability in a Time Series of Precipitation and Temperature Data: A Case Study in Cartagena de Indias, Colombia. *MDPI*, 20.
3. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 5-32
4. Borrero, J. A. L., Abello, A. E. T., Pinilla, M. C. C., Castro, L. D., Robayo, J. I. E., & González, P. A. V. (2007). *Aprovechamiento del agua lluvia para riego y lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)*.
5. BM. (03 de 10 de 2022). Banco Mundial. Obtenido de https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview#:~:text=Alrededor%20de%202000%20millones%20de,b%C3%A1sicas%20para%20lavarse%20las%20manos.
6. Bocanegra, J. E. (2009). Estudio de la variabilidad climática de la precipitación en Colombia asociada a procesos oceánicos y atmosféricos de meso y gran escala. Colombia: IDEAM.
7. Browning, J. M., & Hering, A. S. (2015). Robust and non-robust SNHT tests for changepoint detection (R package vignette).
8. Canaza-Choque, F. A., & Huanca-Arohuanca, J. W. (2023). Disputas por el oro azul: Gobernanza hídrica y salud pública. *Revista de Salud Pública*, *21*, 555–561. https://doi.org/10.15446/rsap.v21n5.79646

9. CCCS. (02 de 06 de 2023). Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. Obtenido de https://www.cccs.org.co/wp/
10. CEPAL. (2011). Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe. Chile: NACIONES UNIDAS.
11. CEPAL. (2018). La agenda de 2030 y los objetivos de Desarrollo Sostenible. Chile: NACIONES UNIDAS.
12. CEPIS. (2004). Guía de diseño para captación del agua de lluvia.
13. Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1996). Hidrología aplicada. McGraw-Hill.
14. Duarte Arguello, A. M. (2021). Diseño de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia como alternativa de abastecimiento para el sistema de riego en la finca Jema ubicada en la Vereda Palonegro—Lebrija. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/33638
15. EAAB, Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado, NS-085, V4-2, Norma técnica de servicio, 2023.
16. Enders, W. (2015). Applied Econometric Time Series (4th ed.). John Wiley & Sons.
17. Enríquez, L., Pulgarín, L., Garzón, J. A., Velásquez, D., & Saldarriaga, J. (2022). Comparación de metodologías de localización óptima de tanques de tormenta considerando Cambio Climático. Casos de estudio: Bogotá y Medellín, Colombia. *Ingeniería Del Agua*, *26*(3), 139–155. https://doi.org/10.4995/ia.2022.17360
18. Esri. (2018). *ArcGIS Pro*. Obtenido de Funcionamiento de clustering de serie temporal: https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/space-time-pattern-mining/learnmoretimeseriesclustering.htm
19. Fioramonte, B., Campos, M. A. S., de Freitas, S. R., & Basso, R. E. (2022). Rainfall data used for rainwater harvesting systems: A bibliometric and systematic literature review.

AQUA - Water Infrastructure, Ecosystems and Society, *71*(7), 816–834. https://doi.org/10.2166/aqua.2022.034

20. Fonseca, C. R., Hidalgo, V., Díaz-Delgado, C., Vilchis-francés, A. Y., & gallego, I. (2017). Design of optimal tank size for rainwater harvesting systems through use of a web application and geo-referenced rainfall patterns. *Journal of Cleaner Production*, *145*, 323–335. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.057
21. Geraldi, M., & Ghisi, E. (2017). Influence of the length of rainfall time series on rainwater harvesting systems: A case study in Berlin—ScienceDirect. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344917301659
22. G, G. E. (04 de 02 de 2023). Colombia con más de 500 proyectos registrados con estándar LEED. *EL TIEMPO*, pág. 5.
23. González, M. G., & Asprilla, Y. (2016). La habitabilidad del espacio periurbano en el Área Metropolitana de Guadalajara: Entropías en la provisión de servicios hidrosanitarios. Tecnogestión: Una mirada al ambiente, 13(1). https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tecges/article/view/12130
24. Hamilton, J. D. (1994). Time Series Analysis. Princeton University Press.
25. Hyndman, R. J. (2018). *Forecasting: principles and practice.* Australia: Monash University.
26. IDEAM. (2019). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/siac/calidadagua.
27. IDEAM. (2024). DHIME. Obtenido de http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/
28. IDIGER. (2024). Sistema de Aleta Bogotá SAB - SIRE. Obtenido de Red Hidrometeorológica: https://www.sire.gov.co/web/sab/informacion-hidrometeorologica.

29. Jaiswal, R. K., Lohani, A. K., & Tiwari, H. L. (2015). Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. Environmental Processes, 2, 729-749.
30. Juez Pirachican, P. A. (2021). *Seguimiento y aproximación al método de diseño para sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80589
31. Kaufman, L. a. (2009). Finding groups in data: an introduction to cluster analysis. *ohn Wiley & Sons*, 344.
32. Khaliq, M. N., & Ouarda, T. B. M. J. (2007). On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT) and of the Buishand range test. Hydrological Sciences Journal, 52(3), 611-618.
33. Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. J. (2004). Change detection in hydrological records—A review of the methodology. Hydrological Sciences Journal, 49(1), 7-19.
34. Li, J., & Heap, A. D. (2014). A review of spatial interpolation methods for environmental scientists. Geoscience Australia, Record 2014/38. https://doi.org/10.11636/Record.2014.038
35. Liaw, C.-H., & Chiang, Y.-C. (2014). Dimensionless Analysis for Designing Domestic Rainwater Harvesting Systems at the Regional Level in Northern Taiwan. *Water*, *6*(12), Article 12. https://doi.org/10.3390/w6123913
36. Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. (1977). Hidrología para ingenieros.
37. Lizcano-Caro, J. A., Medina-Daza, R., & González-Pérez, M. G. (2020). Propuesta de metamodelo para la regulación de la demanda urbana de agua potable / Proposed meta-

model for the regulation of the urban demand for drinking water. Tecnología Y Ciencias Del Agua, 11(6), 244–286. https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-06-06

38. Melo Niño, J. (2018). Evaluación del sistema de captación y aprovechamiento del agua lluvia implementado en el Aeropuerto Internacional El Dorado de Bogotá. *Ingeniería Civil*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/368
39. Mora Martínez, E. S. (2022). Aprovechamiento de aguas lluvias para proceso de rotomoldeo en la empresa ROTOPLAST SA de Guarne, Antioquia. tdea.edu.co
40. Naciones Unidas. (2023). *Naciones Unidas*.
41. Pablo Montero, V. J. (2014). TSclust: An R Package for Time Series Clustering. . *Journal of Statistical Software*, 1-43.
42. Palacio Castañeda, N. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas, Antioquia. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/1325
43. Perez Carmona, R. Instalaciones hidrosanitarias, de gas y de aprovechamiento de aguas lluvias en edificaciones.
44. Pérez-Ortiz, M. A., Montenegro-Murillo, D. D., Vargas-Franco, V., Pérez-Ortiz, M. A., Montenegro-Murillo, D. D., & Vargas-Franco, V. (2022). Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del rio Cali, Colombia. *DYNA*, *89*(221), 168–177. https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607
45. Pino-Vargas, E., Chávarri-Velarde, E., Ingol-Blanco, E., Mejía, F., Cruz, A., & Vera, A. (2022). Impacts of Climate Change and Variability on Precipitation and Maximum Flows in Devil's Creek, Tacna, Peru. *Hydrology*, *9*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/hydrology9010010

46. Ramsay, J. O. (2006). Functional Data Analysis. *Springer Nature*, 17.

47. Reinoso, P. L. (27 de marzo de 2015). Imputación de datos en series de precipitación diaria caso de Estudio Cuenca del Río Quindío. pág. 13.

48. Rodriguez, P. &. (2020). Time series forecasting with random forests: A case study of financial data. *Journal of Forecasting.*, 87-124.

49. Rojas Sigala, Diego, & González Pérez, Mario Guadalupe. (2015). Incertidumbre en los modelos hidrológicos y planeación de obras hidráulicas en México. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 36(2), 69-83. Recuperado en 05 de mayo de 2025, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000200006&lng=es&tlng=es.

50. Ruiz-Ochoa, M. A., Vargas-Corredor, Y. A., Orduz-Amaya, L. P., Torres-Corredor, J. S., Ruiz-Ochoa, M. A., Vargas-Corredor, Y. A., Orduz-Amaya, L. P., & Torres-Corredor, J. S. (2022). Variabilidad climática en la planificación hídrica de la cuenca del río Cravo Sur (Casanare, Colombia). *Información tecnológica*, *33*(4), 117–124. https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000400117

51. SÁNCHEZ GÓMEZ, D. D. (2022). ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN EL CANTÓN PLAYAS PROVINCIA DEL GUAYAS, DURANTE LOS PERÍODOS 2000-2020.

52. Sharma, T. C., & Panu, U. S. (2023). Reservoir capacity estimation by the Gould probability matrix, drought magnitude, and behavior analysis methods. Hydrology, 10(2), 53. MDPI

53. Snir, O., Friedler, E., & Ostfeld, A. (2022). Water | Free Full-Text | Optimizing the Control of Decentralized Rainwater Harvesting Systems for Reducing Urban Drainage Flows. https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/571

54. Suárez, J. A. B., García, M. Á. G., & Mosquera, R. O. O. (2006). *HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA*.

55. USGBC. (2014). *LEED V4 User Guide.* USA: USGBC.

56. UN. (13 de 05 de 2023). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Obtenido de https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/

57. Teston, A., Piccinini Scolaro, T., Kuntz Maykot, J., & Ghisi, E. (2022). Comprehensive Environmental Assessment of Rainwater Harvesting Systems: A Literature Review. *Water*, *14*(17), Article 17. https://doi.org/10.3390/w14172716

58. VARGAS M.R., DÍAZ-GRANADOS O.M., Universidad de los Andes, "Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad-Duración-Frecuencia para Colombia", Santafé de Bogotá, 1998.

59. weatherbase. (2024). Comportamiento climático de Bogotá. Obtenido de https://www.weatherbase.com/weather/weather.php3?s=22208&cityname=Bogota-Colombia

60. Wilks, D. (2011). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences.* EE.UU: ELSEVIER.

61. Yao, Z. W. (2019). Precipitation forecasting based on deep learning and LSTM. *Atmospheric Research*, 108 - 116.

62. Yue, S., & Wang, C. Y. (2004). The Mann Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series. Water Resources Management, 18(3), 201 218.