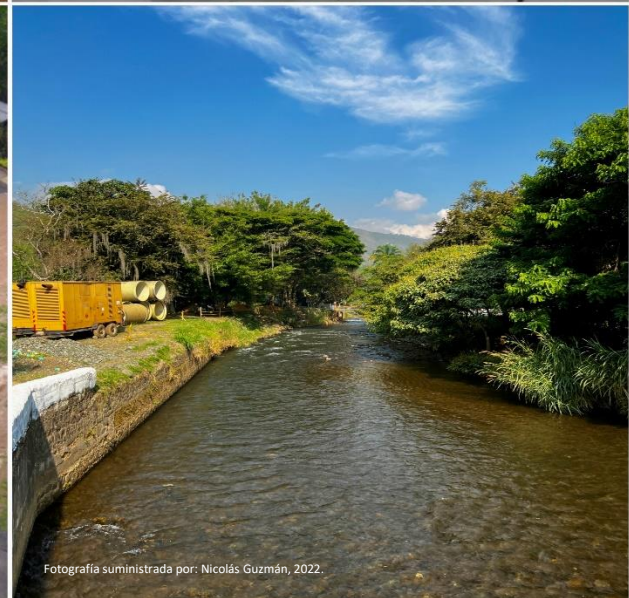




ESTUDIO DE LA POSIBLE INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LA REGULACIÓN HÍDRICA EN LA ZONA MEDIA-ALTA DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO CALI

**VALERIA GARCÍA MUÑOZ
NICOLÁS GUZMÁN GARCÍA**



**ESTUDIO DE LA POSIBLE INCIDENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA SOBRE
EL COMPORTAMIENTO DE LA REGULACIÓN HÍDRICA EN LA ZONA MEDIA-ALTA DE LA CUENCA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO CALI**

Valeria García Muñoz

Nicolás Guzmán García

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS AGRÍCOLAS

Director

Henry Jiménez Escobar Ing. M.Sc.

Profesor Titular

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente - EIDENAR

Programa Académico de Ingeniería Agrícola

Santiago de Cali, diciembre del 2023

Agradecimientos

En la culminación de este trabajo de grado, deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento al profesor Henry Jiménez, cuya dirección y apoyo fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo. También agradecemos a la CVC y al IDEAM, quienes proporcionaron la información hidroclimatológica utilizada como base fundamental de este trabajo; a cada uno de los formadores que han hecho parte de este proceso, por su valiosa contribución y orientación. Nuestra gratitud se extiende a la Universidad del Valle y al Programa Académico de Ingeniería Agrícola, por disponer de los recursos y ambiente propicio para nuestra formación como ingenieros. Finalmente, a nuestros seres más queridos, quienes han sido una fuente constante de motivación y apoyo, les dedicamos este logro con sincero agradecimiento.

Resumen

En el contexto actual, marcado por la aceleración del Cambio Climático, las variaciones en el ciclo hidrológico darán lugar a un incremento en la frecuencia y la magnitud de eventos climáticos extremos afectando la disponibilidad de los recursos hídricos, la vulnerabilidad de la población y la estabilidad de los ecosistemas. Por lo tanto, el estudio de la influencia del Cambio Climático y la Variabilidad Climática en las cuencas hidrográficas resulta primordial para la planificación y gestión integral de los recursos hídricos, así como para la mitigación y prevención de desastres.

El objetivo principal de este proyecto es estudiar cómo el Cambio Climático y la Variabilidad Climática afectan la regulación hídrica en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali. El trabajo implicó la recopilación y procesamiento de información hidroclimatológica, seguido de una caracterización hidrológica detallada, la estimación de la regulación hídrica y un análisis integral de las variables hidroclimáticas. Este enfoque busca proporcionar una visión amplia del comportamiento hidrológico de la cuenca y su respuesta ante escenarios específicos de Cambio Climático y Variabilidad Climática.

La importancia de este estudio radica en su contribución a la planificación y gestión integral de los recursos hídricos en una región clave (por su oferta de servicios ecosistémicos y por ser foco de desarrollo habitacional y económico en el sur occidente colombiano), así como en su relevancia para la mitigación y prevención de desastres relacionados con el agua. Además, se espera que los resultados sirvan como base teórica valiosa para investigaciones futuras en este campo, contribuyendo así al entendimiento continuo de la interacción entre el Cambio Climático y la regulación hídrica.

Palabras clave: Regulación Hídrica, Variabilidad Climática, Cambio Climático, Cuenca Hidrográfica, Gestión Integral De Los Recursos Hídricos, Río Cali.

Contenido

1. Introducción.....	1
2. Planteamiento del Problema	3
3. Justificación.....	4
4. Objetivos.....	6
4.1. Objetivo General	6
4.2. Objetivos Específicos	6
5. Antecedentes	7
6. Marco Teórico.....	9
6.1. Marco de contexto	9
6.2. Marco geográfico	10
6.3. Marco conceptual	14
7. Metodología.....	24
7.1. Recopilación de información	24
7.1.1. Visitas de campo	24
7.2. Caracterización biofísica.....	26
7.3. Recopilación de información hidrológica	29
7.4. Análisis exploratorio de datos y estimación de datos faltantes.....	31
7.5. Caracterización hidrológica	32
7.6. Determinación de la capacidad de la regulación hídrica	33
7.6.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	33
7.6.2. Balance hídrico	34
7.7. Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad Climática.....	35
8. Resultados y Análisis	37
8.1. Antecedentes históricos	37

8.2. Análisis exploratorio de datos y estimación de datos faltantes.....	40
8.3. Caracterización hidrológica	46
8.3.1. Distribución de la precipitación	46
8.3.2. Isoyetas.....	47
8.3.3 Polígonos de Thiessen	50
8.3.4. Comportamiento del caudal	52
8.4. Determinación de la capacidad de regulación hídrica	56
8.4.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)	56
8.4.2. Balance hídrico	57
8.5. Análisis del comportamiento de las variables hidrometereológicas bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad Climática	58
8.6. Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad Climática.....	70
8.6.1. Variabilidad Climática	70
8.6.2. Cambio Climático.....	74
9. Conclusiones	76
10. Recomendaciones.....	79
10. Referencias	81

Lista de Figuras

Figura 1. Localización de la zona de estudio..	11
Figura 2. Mapa de características ecosistémicas y zonas de vida en la zona de estudio (2018).	13
Figura 3. Mapa de cobertura de uso del suelo (2018) en la zona de estudio. C.	13
Figura 4. Mapa de rangos de pendiente del terreno (2018) en la zona de estudio.....	14
Figura 5. Esquemización de la CDC y los volúmenes para el cálculo del IRH.....	21
Figura 6. Quebrada "El Cabuyal"..	25
Figura 7. Sección de aforo de la estación limnigráfica Bocatoma sobre el río Cali.	25
Figura 8. Visita al Centro de Monitoreo y Control Hidroclimatológico de la CVC.....	26

Figura 9. Procedimiento para delimitación de la cuenca hidrográfica y su red de drenaje en QGIS.	27
Figura 10. Mapa de la red de estaciones en la zona de estudio elaborado a partir de información de la CVC y el IDEAM.	30
Figura 11. Procedimiento para estimación de datos faltantes con el método IDW a través de ArcGIS. ...	32
Figura 12. Boulevard del río Cali y alrededores.....	37
Figura 13. Inundaciones en el CAM.....	38
Figura 14. Inundaciones por el sector del zoológico..	38
Figura 15. Incendio forestal en los Farallones de Cali..	39
Figura 16. Sequía en el río Cali a la altura de la estación Bocatoma.	39
Figura 17. Histogramas de precipitación para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones Aguacatal – Montebello (AM), Edificio de la CVC (CVC), Brasilia (BRA) y San Pablo (SP).	41
Figura 18. Histogramas de precipitación para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones La Teresita (LT), Yanaconas (YN), Pichindé (PD) y Los Cristales (LC).	42
Figura 19. Histogramas de precipitación para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones La Fonda (LF), Las Brisas (LB), Peñas Blancas (PB) y La Argentina (LA).	42
Figura 20. Boxplot de precipitación para las estaciones seleccionadas en el periodo 1982 – 2021.....	43
Figura 21. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones Aguacatal – Montebello (AM), Edificio de la CVC (CVC), Brasilia (BRA) y San Pablo (SP) en el periodo 1982 – 2021.....	44
Figura 22. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones La Teresita (LT), Yanaconas (YN), Pichindé (PD) y Los Cristales (LC) en el periodo 1982 – 2021.	44
Figura 23. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones La Fonda (LF), Las Brisas (LB), Peñas Blancas (PB) y La Argentina (LA) en el periodo 1982 – 2021.....	45
Figura 24. Resultados de correlación de Spearman para las estaciones de estudio.	45
Figura 25. Promedio mensual multianual (1982 – 2021) de precipitación en las estaciones de la zona de estudio.	46
Figura 26. Precipitación anual multianual en las estaciones seleccionadas para el periodo 1982-2021... ..	47
Figura 27. Isoyetas (ene-feb-mar-abr) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).	48
Figura 28. Isoyetas (may-jun-jul-ago) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).....	49
Figura 29. Isoyetas (sep-oct-nov-dic) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).	50
Figura 30. Polígonos de Thiessen para la red de estaciones en la zona de estudio.....	51
Figura 31. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual en la zona de estudio para distintos periodos de tiempo.	52

Figura 32. Interpolación lineal para estimación de datos faltantes de caudal medio mensual de la estación limnigráfica Cali – Bocatoma en el periodo 1982 – 2021.	53
Figura 33. Comparación de la distribución temporal del caudal medio mensual en el punto de cierre de la zona de estudio para distintos periodos de tiempo.	54
Figura 34. Estimación del coeficiente de escurrimiento medio en la zona media-alta de la cuenca del río Cali (1982-2021).	55
Figura 35. Comparación de la CDC para los periodos de estudio (1982-2001 y 2002-2021).	55
Figura 36. Balance hídrico en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali (1982-2021).	58
Figura 37. Comportamiento de la temperatura media mensual en la estación La Teresita (1982-2021).	59
Figura 38. Anomalías de temperatura media en la estación La Teresita (1982-2021).	59
Figura 39. Cambios de la temperatura media en la zona de estudio de acuerdo con proyecciones de Cambio Climático por el IDEAM.	60
Figura 40. Incremento de la evapotranspiración potencial media anual a partir de las proyecciones de Cambio Climático por el IDEAM.	61
Figura 41. Anomalías de precipitación media mensual en la cuenca media-alta del río Cali (1982-2021).	62
Figura 42. Anomalías de caudal medio mensual en la estación Bocatoma sobre el río Cali (1982-2021).	63
Figura 43. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual bajo escenarios de El Niño (1982-2021).	63
Figura 44. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual bajo escenarios de La Niña (1982-2021).	64
Figura 45. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual (1982-2021) bajo series del fenómeno ENOS.	64
Figura 46. Comportamiento de la precipitación media mensual en la cuenca media-alta del río Cali (1982-2021).	65
Figura 47. Comportamiento del caudal medio mensual. Estación Bocatoma (1982-2021).	66
Figura 48. Comparación del caudal medio mensual bajo escenarios del fenómeno de El Niño (1982-2021).	67
Figura 49. Comparación del caudal medio mensual bajo escenarios del fenómeno de La Niña (1982-2021).	67
Figura 50. Comparación de la distribución temporal del caudal medio mensual (1982-2021) bajo series del fenómeno ENOS.	68
Figura 51. Comparación de las CDC bajo escenarios del fenómeno de El Niño (1982-2021).	69

Figura 52. Comparación de las CDC bajo escenarios del fenómeno de La Niña (1982-2021).....	69
Figura 53. Comparación de las CDC bajo escenarios ENOS incluyendo periodos neutros (1982-2021). ...	70
Figura 54. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de El Niño (1982-2021).....	72
Figura 55. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de La Niña (1982-2021).	73

Lista de Tablas

Tabla 1. Antecedentes.	8
Tabla 2. Características biofísicas más relevantes de la zona de estudio.	28
Tabla 3. Estaciones seleccionadas a partir de información proporcionada por CVC e IDEAM.	30
Tabla 4. Categorías del Índice de Regulación Hídrica. Fuente: IDEAM, 2022.	34
Tabla 5. Resumen de estudio estadístico descriptivo de la precipitación para cada estación.	40
Tabla 6. Resultados de la estimación del IRH.	57
Tabla 7. Balance hídrico en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali (1982-2021).	57
Tabla 8. Correlación de indicadores macroclimáticos.	62
Tabla 9. Resultados de la estimación del IRH bajo escenarios del fenómeno ENOS.	71
Tabla 10. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de El Niño (1982-2021).....	72
Tabla 11. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de La Niña (1982-2021).	73
Tabla 12. Estimación del caudal medio a través de consideraciones en la proyección de variables de Cambio Climático al año 2040.	74

1. Introducción

El agua como fuente de vida es indispensable para la humanidad y su desarrollo. Como es mencionado en la versión más reciente de El Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2022), la gestión adecuada de los recursos hídricos es fundamental para satisfacer las necesidades humanas, preservar la salud de los ecosistemas, planificar estrategias energéticas eficientes, así como proteger y preservar la vida como parte esencial de la sostenibilidad de los territorios y del planeta en su conjunto.

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO, 2020), en las últimas décadas el uso del agua a nivel global se ha multiplicado y seguirá creciendo a un ritmo constante de 1% hasta el año 2050, lo que representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel de uso actual. Los niveles de escasez seguirán aumentando a medida que crezca la demanda del recurso y se intensifiquen los efectos del Cambio Climático (CC). En Colombia, gran parte de las regiones gozan de un adecuado abastecimiento de agua, pero también se estima que en las próximas décadas este panorama puede variar notablemente como consecuencia del sometimiento a grandes presiones sobre el uso de los recursos y fuertes variaciones bajo escenarios de CC y VC que determinan su disponibilidad (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019).

Según el Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA, s.f), Santiago de Cali ha sufrido diferentes procesos de urbanización y situaciones críticas debido al desplazamiento de la población. Tradicionalmente los asentamientos comenzaron a desarrollarse alrededor de las fuentes hídricas superficiales, por lo que los ríos de la ciudad han servido como fuente de abastecimiento, recreación, elemento paisajístico y distintos procesos urbanísticos, siendo todos estos responsables de su deterioro. En este sentido, las actividades antrópicas que giran en torno al desarrollo habitacional y económico del ser humano presentan una estrecha relación con fenómenos que involucran cambios en las condiciones climáticas, dado que aumentan la presión sobre los diferentes recursos naturales y alteran

el ciclo hidrológico dentro de las cuencas hidrográficas por lo que en conjunto son causantes de los fuertes impactos ambientales que deterioran los ecosistemas y sus servicios.

En este trabajo, el área de estudio abarca la cuenca hidrográfica del río Cali en la zona media-alta. Esta cuenca se ubica dentro del área hidrográfica Magdalena-Cauca, en el municipio de Santiago de Cali, suroccidente del departamento del Valle del Cauca, en medio de dos zonas de reserva: el Parque Natural Nacional Farallones de Cali y la Reserva Forestal del Municipio de Cali (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca [CVC], 2017). La precipitación en esta zona se presenta en un régimen bimodal con registros promedio entre 1300 y 3000 mm/año, donde de acuerdo con los reportes, se ha registrado una mayor precipitación en las zonas rurales que en la zona urbana. En la cuenca la temperatura media oscila entre $<10^{\circ}\text{C}$ en las zonas altas y 24°C en la parte más baja. En este sentido su ubicación presenta una importancia estratégica en un contexto nacional y local en lo referente a recursos hídricos, paisajismo, recreación, biodiversidad, regulación del clima, entre otros.

Por consiguiente, es fundamental el cumplimiento del objetivo de este trabajo que busca estudiar la posible incidencia del Cambio Climático y la Variabilidad Climática sobre el comportamiento de la regulación hídrica en el área de estudio mencionada, identificando, desde una visión integral, los posibles impactos entorno al recurso hídrico a través del procesamiento de información hidro climatológica y estudios de prospectiva que permitan determinar variables hidrológicas importantes que pueden ampliar la perspectiva actual y a su vez, servir como base teórica para futuras decisiones.

2. Planteamiento del Problema

El deterioro y el manejo inadecuado de los recursos hídricos (RRHH) amenazan la estabilidad de los ecosistemas y el futuro de la humanidad producto del Cambio Climático (CC) y la Variabilidad Climática (VC). En la actualidad, se registran incrementos del nivel de temperatura que provocan alteraciones ecosistémicas acelerando la disminución de la disponibilidad de agua (Bárcena et al., 2020). Aunque la VC y el CC son reconocidos como el mayor problema ambiental del siglo XXI, la escasez de los RRHH y su uso inadecuado, agudizan la crisis a nivel global (Carvajal, 2011).

El Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2022) muestra que Colombia cuenta con una de las principales ofertas hídricas del planeta por su ubicación geográfica, variada topografía y régimen climático. Sin embargo, el agua no está distribuida homogéneamente en todas sus regiones, y está sometida a alteraciones que determinan su disponibilidad. Esto ha llevado a que la relación entre la demanda y oferta de los RRHH haya sido bastante compleja en las últimas décadas. La población es propensa a sufrir problemas de abastecimiento de agua a causa de las condiciones de disponibilidad, regulación y presión que existen sobre los sistemas hídricos que la atienden, sobre todo en periodos bajo condiciones climáticas extremas que se prolongan debido a la influencia del CC y la VC. En este sentido, el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cali (POMCA) elaborado por la CVC (2021) resalta el impacto en el ecosistema a causa de actividades agrícolas, pecuarias, recreativas, industriales y de urbanización.

En el marco de las alteraciones en el ciclo hidrológico en la región, es necesario profundizar en las afectaciones que se están generando, por tanto, en este trabajo se busca estudiar la posible incidencia del CC y la VC sobre el comportamiento de la regulación hídrica en la cuenca hidrográfica del río Cali en su zona media-alta. En este sentido, implica el desarrollo e implementación de una metodología basada en la caracterización hidrológica a partir del análisis de caudales y precipitaciones en el tiempo y el espacio, con el objetivo de determinar la regulación hídrica y analizarla bajo escenarios de VC y CC.

3. Justificación

El ciclo del agua es indispensable para el desarrollo de la vida y se caracteriza por tener una gran influencia en los sistemas naturales y productivos. Según la UNESCO (2020), el uso global del agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante de 1% anual debido al crecimiento demográfico, el desarrollo económico y los cambios en los patrones de consumo. De esta forma, las alteraciones del clima y un uso desproporcionado de los RRHH, con respecto a su capacidad de recarga, pondrían en riesgo su sostenibilidad y acentuaría las problemáticas actuales.

El CC continuará teniendo efectos importantes en los diferentes sistemas del planeta tierra. A medida que este fenómeno se intensifica, aumenta la incertidumbre en torno a las interacciones que podría tener el clima con los recursos naturales, esto se evidencia en el Quinto Informe presentado por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) en el que se anticipa que la variabilidad en el ciclo global del agua aumentará de manera desigual. Los cambios en el ciclo hidrológico darán lugar a un incremento en la frecuencia y en la magnitud de eventos climáticos extremos, como sequías en áreas agrícolas y ecológicas, incendios, tormentas e inundaciones, según el informe del IPCC en 2021, lo que dificultaría la capacidad de prever la disponibilidad de recursos hídricos y podría dar lugar a modificaciones y pérdidas en diversos ecosistemas tanto dentro como fuera de los cuerpos de agua (IDEAM, 2019).

En términos generales, América Latina se destaca por la abundancia global de agua, según estimaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el 32% de los RRHH renovables del mundo pueden encontrarse en esta región. A pesar de la gran variabilidad espacial en la distribución de este recurso que se traduce en contrastes muy marcados, la región enfrenta una creciente presión sobre los RRHH debido a su dependencia crítica de la agricultura y diversos sectores energéticos en expansión, lo que plantea desafíos significativos (Bretas et al., 2020). En esa misma línea, el IDEAM (2019) señala que actualmente Colombia cuenta con buena disponibilidad de RRHH, sólo un pequeño

porcentaje de los municipios presentan índices de escasez altos. Se estima que en un futuro próximo este panorama puede variar de manera notoria en especial en las áreas más densamente pobladas.

Ahora bien, la cuenca hidrográfica del río Cali en la zona media-alta no ha sido ajena a toda la problemática que han generado la VC y el CC. Santiago de Cali ha concentrado su desarrollo alrededor de los ríos que la abastecen, lo que significa que estas zonas han estado envueltas en diferentes dinámicas generadoras de impactos sobre los RRHH. Conforme con el escenario tendencial presentado en los diferentes Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), la inestabilidad climática asociada al agotamiento de los bosques por causa de las actividades antrópicas plantea escenarios de vulnerabilidad en donde las consecuencias directas son palpables como la escasez de agua, la ocurrencia de movimientos en masa en temporadas de invierno y las prolongadas etapas de verano (CVC, 2021). Además, los ríos que abastecen la ciudad para el año 2036 no mostrarán mejoras respecto a la calidad y disponibilidad del agua como resultado de la baja precipitación que disminuirá los caudales medios. También presentarán conflictos por el uso del agua y la oferta de servicios ecosistémicos derivados del aumento proyectado en la población de las cuencas y el cambio en el uso del suelo (CVC, 2018).

Finalmente, es indispensable conocer el estado y el comportamiento de los sistemas hidrológicos, climáticos y biofísicos para proponer alternativas de ordenamiento y manejo de los RRHH dentro de una zona o área hidrográfica. Por lo tanto, este proyecto toma una importancia significativa en el campo de la ingeniería agrícola ya que aportará información preliminar necesaria para el establecimiento de estrategias sostenibles en la gestión del recurso hídrico. De igual manera, brindará el conocimiento de información relacionada con el comportamiento y disponibilidad de los RRHH superficiales de la cuenca hidrográfica del río Cali en la zona media-alta, con fines en la agricultura y sus desarrollos, facilitando la colaboración futura de nuevos investigadores mediante una integración multi e interdisciplinar dentro de esta rama de la ciencia e ingeniería.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Estudiar la posible incidencia del Cambio Climático y la Variabilidad Climática sobre el comportamiento de la regulación hídrica en la cuenca hidrográfica del río Cali en la zona media-alta.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar hidrológicamente la cuenca media-alta del río Cali.
- Determinar la capacidad de la regulación hídrica de la cuenca media-alta del río Cali.
- Analizar la respuesta hidrológica de la cuenca media-alta del río Cali bajo escenarios de Variabilidad Climática y Cambio Climático.

5. Antecedentes

A continuación, en la Tabla 1 se presentan algunos estudios antecedentes desarrollados a nivel nacional, regional y local, organizados de manera ascendente de acuerdo con el año de publicación.

Autor (es)	Año	Descripción	Localización
IPCC	(1990) (1995) (2001) (2007) (2014) (2021)	El IPCC desde 1990 hasta la actualidad ha desarrollado una serie de informes de evaluación del Cambio Climático en una perspectiva global y regional que plantea las bases y lineamientos para los escenarios de Cambio Climático que se emplean en los diferentes trabajos de investigación actuales.	Global y regional.
Montoya, A., & Carvajal, Y.	(1998)	Se determinaron los parámetros fisiográficos, morfológicos e hidrológicos de la cuenca del río Cali. Combinando las variables de precipitación, evapotranspiración y escurrimiento para determinar el balance hídrico, y así, analizar la dinámica espacial y temporal de la producción hídrica.	Cuenca hidrográfica del río Cali. Municipio de Santiago de Cali.
IDEAM	(2010) (2014) (2018) (2022)	Expone la situación actual y futura del agua en el país, teniendo en cuenta factores importantes sobre el recurso hídrico de acuerdo con los fenómenos naturales y las afectaciones relacionadas con el entorno y la sociedad.	Colombia.
CVC	(2011) (2021)	Proceso de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Cali mediante la ejecución de lo recomendado en la guía técnico-científica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM.	Cuenca hidrográfica del río Cali. Municipio de Santiago de Cali.
Díaz, A., Carvajal, Y., & Gutiérrez, S.	(2014)	Determinación del grado de correlación temporal de las fases extremas del fenómeno ENOS y las variables de precipitación y caudal mensual, a través de la selección de variables macro climáticas encargadas del monitoreo ENOS en el océano Pacífico tropical para asociarlas con variables hidrometeorológicas en la cuenca de estudio a una escala temporal mensual.	Cuenca hidrográfica del río Cali. Municipio de Santiago de Cali.
CVC & CIAT	(2015)	Portafolio de estrategias para la mitigación y adaptación del Cambio Climático donde se realiza un análisis del contexto global, nacional y local de los escenarios actuales y futuros del municipio teniendo en cuenta las proyecciones modeladas por el IDEAM debido al Cambio Climático.	Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Ávila, A., Cardona, F., Carvajal, Y., & Jiménez, H.	(2013)	Análisis de las tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia) mediante la utilización de índices climáticos extremos para detectar cambios en el comportamiento de esta variable hidrometeorológica y su posible incidencia en la afectación de la producción de escorrentía en las cuencas en el futuro.	Cuencas hidrográficas de los ríos Cali y Dagua, Valle del Cauca, Colombia.
CVC., Secretaría de Ambiente, Agricultura y Pesca., & CIAT	(2018)	Análisis de vulnerabilidad al Cambio Climático para los sectores priorizados por CVC (recurso hídrico y ecosistema de páramo) y del impacto del Cambio Climático para los sectores priorizados por la Secretaría de Ambiente, Agricultura y Pesca y CODEPARH (Agricultura y Salud) así como la estructuración de medidas de adaptación.	Departamento del Valle del Cauca.
CVC., CIAT., DAGMA., & Alcaldía de Santiago de Cali	(2020)	Plan Integral de Gestión del Cambio Climático - PIGCC como una herramienta fundamental que concreta la gestión del Cambio Climático en el territorio, generando y dinamizando procesos de interacción entre actores del sector público, privado y la comunidad en general.	Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.
Escobar, D.	(2019)	Se evaluó la incidencia del cambio de coberturas en los caudales generados por la cuenca del río Jamundí en inmediaciones de la estación limnigráfica al cierre de la cuenca, estableciendo escenarios positivos y negativos desde la conservación, mediante el software de modelación hidrológica SWAT.	Cuenca Hidrográfica del Río Jamundí. Municipio de Jamundí.
Castro, E.	(2022)	Determinación de la oferta hídrica en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali, localizado en el Suroccidente Colombiano, hasta la franja de protección ambiental donde inicia el control de la CVC hacia la ciudad de Cali.	Parque Nacional Natural Farallones de Cali en la vertiente oriental, Santiago de Cali.
Montenegro, D., Pérez, M. & Vargas, V.	(2022)	Análisis de la influencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur sobre la distribución espacial y temporal de la precipitación en la Cuenca Hidrográfica del río Cali.	Cuenca hidrográfica del río Cali. Municipio de Santiago de Cali.
Marulanda, R.	(2023)	Desarrollo de una metodología que permite evaluar el cambio del uso del suelo en la zona alta de la cuenca del río Pance, con relación a las prácticas y desarrollos que se han producido en los últimos veinte años en la cuenca.	Cuenca hidrográfica del río Pance. Corregimiento de Pance, Santiago de Cali.

Tabla 1. Antecedentes.

6. Marco Teórico

6.1. Marco de contexto

El IDEAM (s.f) señala que, los ríos que conforman la cuenca hidrográfica del río Cali hacen parte de la red hídrica que ha generado focos de desarrollo habitacional y económico en el municipio de Santiago de Cali desde las zonas altas de la cuenca hasta su desembocadura en la parte baja, es por esto, que en el municipio se presenta un índice de regulación natural afectado por el impacto a los bosques densos y coberturas naturales, dejando a sus ribereños en diferentes condiciones de vulnerabilidad.

De acuerdo con el informe publicado por la Personería Municipal (2013) sobre el estado de los RRHH, la cuenca hidrográfica del río Cali evidencia impactos asociados a un conjunto de actividades antrópicas. A pesar de la gran biodiversidad de fauna y flora en su parte alta, se han detectado desde esos puntos situaciones ambientales que generan alto impacto como la deforestación reflejada en la disminución y/o pérdida de zona de protección natural, manejo inadecuado del recurso hídrico por actividades de minería, agricultura e incremento de asentamientos humanos, entre otros procesos erosivos que disminuyen la oferta hídrica (Personería Municipal de Cali, 2013).

Actualmente, las condiciones ambientales de esta cuenca continúan desmejorando por los mismos problemas relacionados a la deforestación, la minería ilegal, y la expansión agrícola y urbanística. Esta situación pone en riesgo la disponibilidad de los RRHH y demás servicios ambientales que ofertan estos ecosistemas (Personería Distrital de Cali, 2020).

Adicionalmente, en el contexto específico de Colombia, particularmente en la cuenca de estudio, las proyecciones del IPCC se aplican de manera parcial, esto se debe a que los escenarios del IPCC se generan a nivel global y regional, lo que puede no captar las variaciones climáticas locales y las alteraciones específicas causadas por actividades humanas en la zona; por esta razón, las entidades locales tales como el IDEAM, CVC y CIAT adaptan estas proyecciones a las condiciones específicas de los departamentos y municipios. De acuerdo con el Plan Integral de Gestión del Cambio Climático de Santiago de Cali (CVC et

al., 2020), para el periodo 2011 – 2040 a través del RCP 4.5 se espera un aumento en la temperatura media entre 0.81 y 1 °C en el área oriental, que abarca la zona urbana, mientras que en la zona occidental se espera un aumento entre 0.51 y 0.8 °C; del mismo modo, para el año 2070 se estima un cambio de temperatura media en la región de 1.6°C y para fin de siglo podrá aumentar en 2.4°C (CVC et al., 2018).

6.2. Marco geográfico

La cuenca hidrográfica del río Cali se ubica dentro del área hidrográfica Magdalena-Cauca (CVC, 2017), en el noroccidente del municipio de Santiago de Cali, suroccidente del departamento del Valle del Cauca. Además, pertenece a dos zonas de reserva, el Parque Natural Nacional Farallones de Cali y la Reserva Forestal del Municipio de Cali, a lo que se debe la importancia estratégica en un contexto nacional y local en lo referente a recursos hídricos, paisajismo, recreación, biodiversidad, regulación del clima, entre otros. En la zona de estudio se pueden distinguir dos grandes afluentes que conforman dos subcuencas: subcuenca río Pichindé (5894.2 ha) y subcuenca río Felidia (4608.9 ha). Estas dos se originan en zona de montaña y a partir de su confluencia dan lugar (junto con el río Aguacatal) al río Cali que discurre por una zona topográfica más llana de la cuenca y coincide en su gran mayoría con la zona urbana de la ciudad de Cali. El río Cali nace en el alto del Buey en inmediaciones del Parque Natural Nacional Los Farallones a una altura aproximada de 4000 msnm, recorre una distancia cercana a los 50 km en jurisdicción del municipio de Cali y desemboca sobre la margen izquierda del río Cauca. (CVC, 2021).

La zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali, se extiende desde su nacimiento en el Parque Nacional Natural Farallones de Cali hasta la Estación Limnigráfica Cali-Bocatoma, localizada a una altura de 1073 msnm aproximadamente. A continuación, en la Figura 1 se puede observar la localización gráfica del área de estudio.

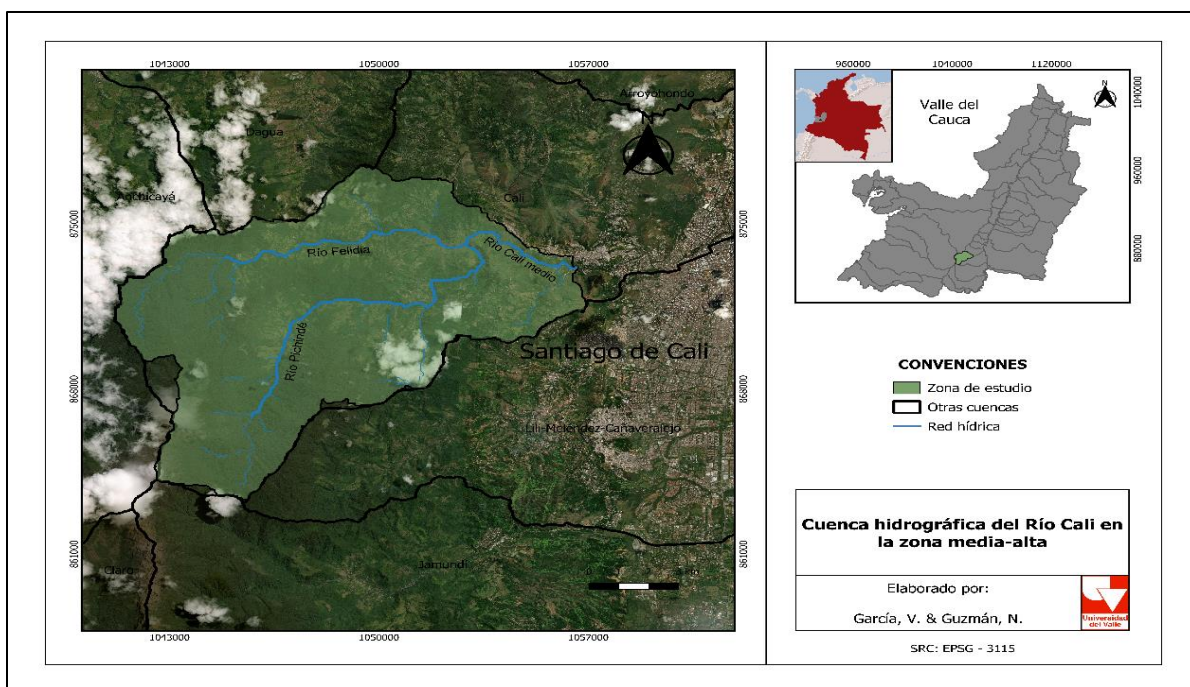


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con apoyo de cartografía digital de la CVC e IGAC.

La zona de interés se encuentra sobre una formación volcánica de edad cretácica y formaciones sedimentarias de edad terciaria conformadas esencialmente de areniscas y arcillositas con algunos mantos de carbón explotables. Estas unidades se encuentran recubiertas por depósitos cuaternarios de origen aluvial y de vertiente. (Hidroingeniería Ltda, 2000).

Para esta cuenca se distinguen dos provincias fisiográficas, la primera corresponde al flanco oriental de la cordillera occidental en su tramo sur y la segunda a la depresión Cauca-Patía en su parte meridional. El paisaje en esta zona se caracteriza en cinco (5) grandes grupos: relieve montañoso glaciárico, relieve montañoso fluvioerosional, piedemonte aluvial, planicie aluvial de piedemonte y llanura aluvial de desborde del río Cauca y tributarios (Petto et al, 2000). El uso actual del suelo y la cobertura vegetal en la zona es muy variado, allí se pueden encontrar áreas residenciales y de recreación, minería, zonas de cultivos, ganadería y grandes extensiones de bosques naturales, entre otros.

En cuanto a la distribución de precipitaciones, en la zona de estudio se presenta un régimen bimodal, donde los periodos lluviosos ocurren entre marzo-mayo y septiembre-noviembre y se ve influenciada por

la elevación que presente la cuenca, siendo mayor los reportes de precipitación en las zonas rurales que en la zona urbana. De acuerdo con el DAGMA (s.f), la precipitación en la zona plana del municipio varía entre 1300 mm/año en el sur y 1000 mm/año en el norte, en la parte montañosa esta varía entre los 1300 y 3000 mm/año. Cabe mencionar que, de manera general, las temperaturas promedio en el área de estudio oscilan entre los 24 °C en la parte más baja y los 10 °C en las zonas altas (DAGMA, s.f).

Con base en el sistema de información geográfica de la Unidad de Manejo de la Cuenca del río Cali (2001), se tiene que, en la cuenca de estudio, se encuentran las siguientes provincias de humedad: Superhúmedo (2.2%), Perhúmedo (15%), Húmedo (46.4%) y Subhúmedo (36.5%). Además, se encuentran zonas de vida desde el piso tropical (>24 °C) hasta el montano (entre 12 y 6°C), entre las que están: bosque seco tropical (26%), bosque seco premontano (10.3%), bosque húmedo tropical (2.1%), bosque húmedo premontano (35,6%), bosque húmedo montano bajo (8.5%), bosque muy húmedo premontano (1.8%), bosque muy húmedo montano (3%), bosque muy húmedo montano bajo (10%) y bosque pluvial montano (2.1%) (Petto et al, 2000).

A continuación, se exponen tres figuras obtenidas mediante el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS, que buscan sintetizar gráficamente la información presentada, estos mapas contienen algunas características ecosistémicas propias de la cuenca (Figura 2), cobertura del uso de suelo (Figura 3) y adicionalmente, rangos de pendiente del terreno cada 100 m (Figura 4). Estas figuras subrayan la complejidad y la interacción entre diferentes usos del suelo en esta zona específico de la cuenca. Ampliando la información proporcionada en la Figura 3, se observa una diversidad significativa en la cobertura de uso del suelo, pues de 11628 ha, aproximadamente el 75% del área está compuesto zonas boscosas, incluyendo zonas de reserva natural y/o de Parque Nacional Natural, lo que destaca la presencia de ecosistemas claves. Además, las áreas desnudas representan un 0.24%, mientras que los afloramientos rocosos comprenden un 0.63%, aportando características geológicas distintivas. Un considerable 21.80%

de la superficie se destina a actividades agrícolas y pecuarias, y por último, el 2.12% corresponde a zonas urbanas.

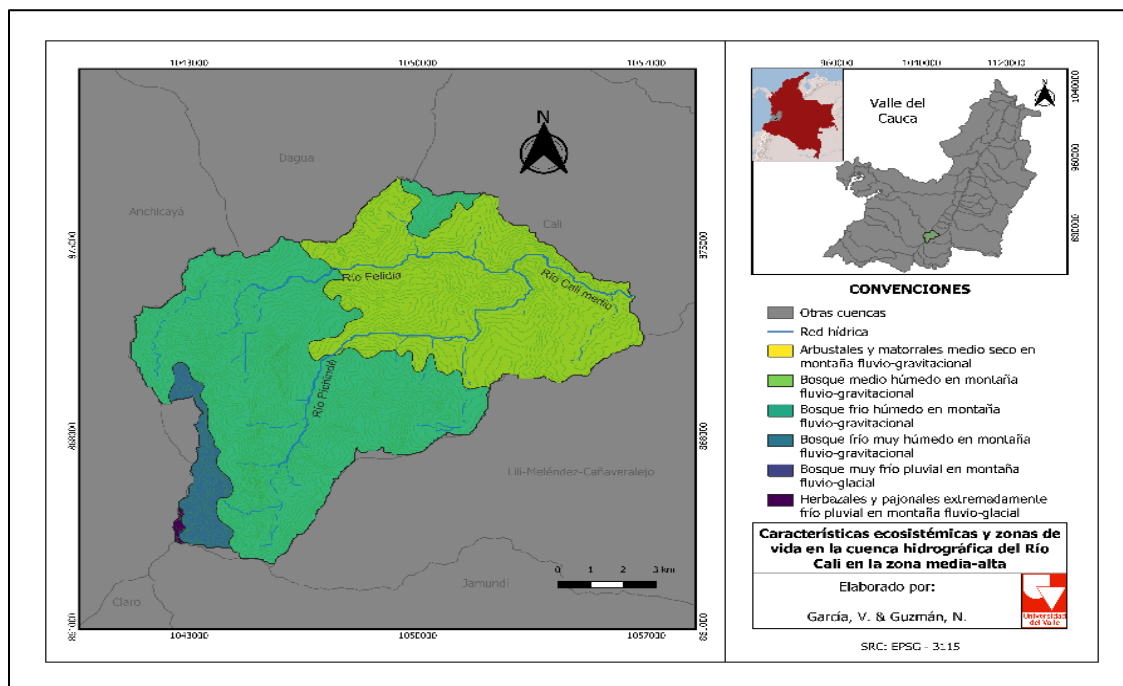


Figura 2. Mapa de características ecosistémicas y zonas de vida en la zona de estudio (2018). Fuente: elaboración propia con apoyo de cartografía digital de la CVC e IGAC.

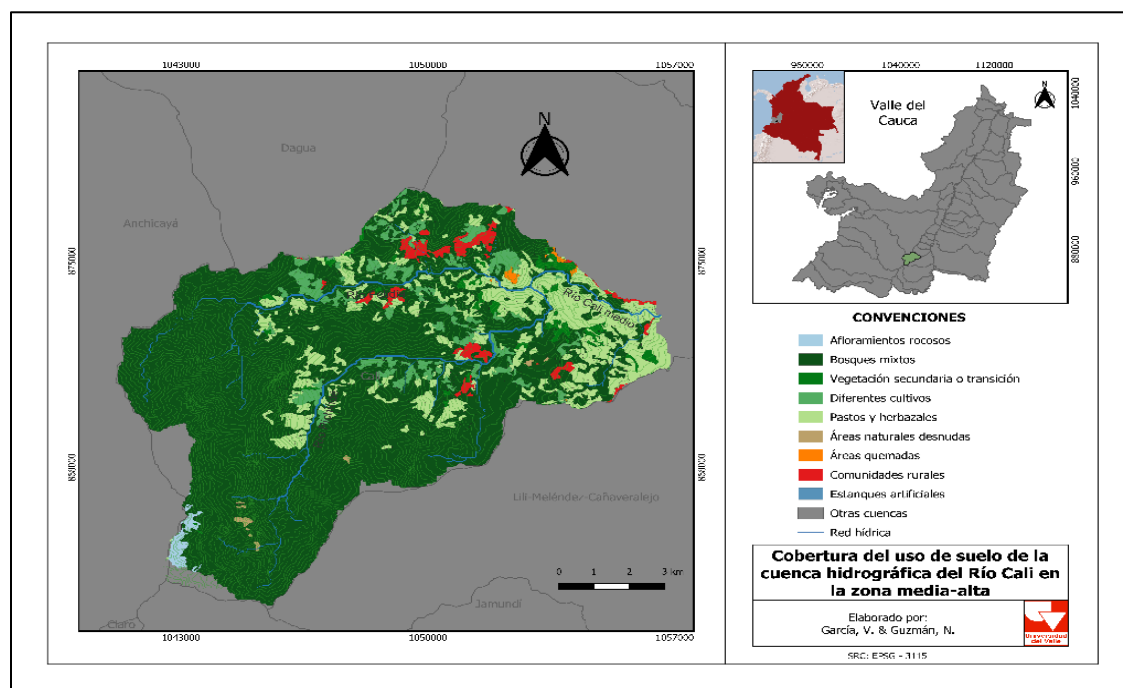


Figura 3. Mapa de cobertura de uso del suelo (2018) en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con apoyo de cartografía digital de la CVC e IGAC.

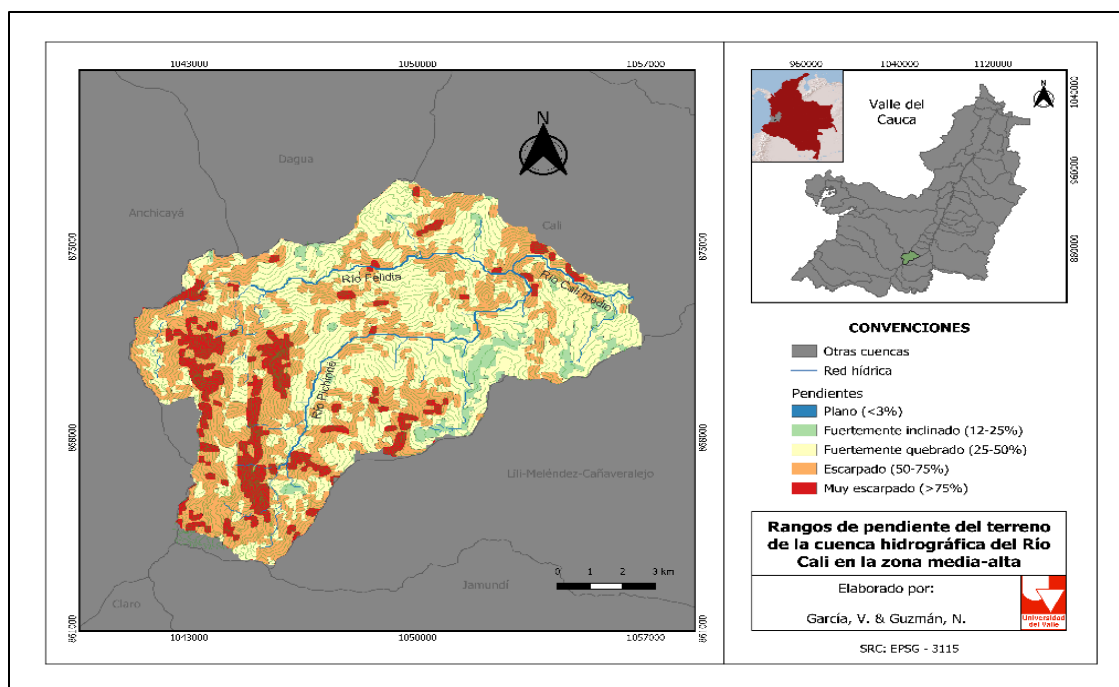


Figura 4. Mapa de rangos de pendiente del terreno (2018) en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia con apoyo de cartografía digital de la CVC e IGAC.

6.3. Marco conceptual

El **desarrollo económico** ha sido definido por Marrama (1964) como “el proceso mediante el cual una colectividad dada logra un aumento de renta nacional, y que el ritmo de desarrollo será tanto mayor cuanto más elevada sea la tasa de crecimiento de la renta” (p.162). Algunos economistas muestran el desarrollo económico como un incremento de la eficacia del sistema social de producción, la satisfacción de las necesidades básicas de los ciudadanos, y en la presencia y acción de grupos dominantes de la sociedad que compiten en la utilización de los recursos y bienes requeridos (Márquez et al., 2019).

El concepto anterior está relacionado con el proceso de **urbanización**, que concentra a la población y las actividades en las ciudades, lo que conlleva a cambios demográficos, económicos, culturales, sociales, ambientales, entre otros (Bottino, 2009), por ende, en la urbanización se produce un cambio constante en la presión sobre la utilización del suelo transformando su estado natural. Este proceso involucra la conversión de áreas previamente destinadas a usos naturales o de conservación hacia otros fines, y los

efectos negativos de este proceso incluyen la degradación y modificación del paisaje, lo que perturba tanto los sistemas biofísicos como los aspectos socioeconómicos en diversos niveles. (Soto, 2015).

La Convención Marco sobre el Cambio Climático de las Naciones Unidas (1992), en su artículo 1, define el **Cambio Climático (CC)** como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. A través del tiempo, el clima presenta fluctuaciones de diversa duración en diferentes años, los valores de las variables climatológicas varían presentando datos atípicos. La secuencia de estas oscilaciones es conocida como **Variabilidad Climática (VC)** (IDEAM & UNAL, 2018).

En la actualidad, uno de los desafíos más significativos que enfrenta la humanidad es afrontar las consecuencias del CC que están ocurriendo a un ritmo acelerado. Tanto la temperatura como la precipitación son indicadores claves del CC, causados por factores naturales y por las acciones antrópicas que han alterado el equilibrio del planeta. Según el IPCC en su Quinto (2014) y Sexto (2021) Informe de Reporte, prevé que el planeta experimentará un aumento significativo de la temperatura global (alrededor de 2°C) y alteraciones en los patrones e intensidad de las lluvias para el año 2100. Ahora bien, no toda la VC es consecuencia directa del CC, pero el CC puede influir en la VC, por este motivo es fundamental el análisis del comportamiento de los fenómenos del ciclo ENOS (Niño-Oscilación del Sur), que implica temperaturas oceánicas fluctuantes en el Pacífico Ecuatorial y están directamente relacionados con la VC (IDEAM & UNAL, 2018).

De acuerdo con OMM (2023), el fenómeno **ENOS** hace referencia a una fluctuación natural de las temperaturas oceánicas asociada a cambios en la atmósfera y tiene lugar en la parte central y oriental del Pacífico ecuatorial. El aumento de estas temperaturas corresponde a la fase conocida como **El Niño** y produce cambios en la climatología de las diferentes regiones del planeta, en la región Andina colombiana suele generar disminución en las precipitaciones y aumentos leves de temperatura (IDEAM, s.f) que, a su

vez, tienen un impacto notable durante las estaciones secas, ya que incrementan la frecuencia de incendios en la vegetación y da lugar a diversas problemáticas asociadas a la escasez de agua. En contraste, **La Niña** se utiliza para describir el evento climático opuesto a El Niño, caracterizado por un enfriamiento de las temperaturas en el océano tropical. Las condiciones de La Niña son más frías en comparación con la normalidad en el Pacífico Oriental, mientras que, en la zona oeste del Pacífico, se presentan condiciones más húmedas y cálidas que las normales (Castro, 2022), haciendo que en la región Andina colombiana se presenten incrementos en las precipitaciones medias mensuales y disminuciones de las temperaturas locales.

Dado que los fenómenos climáticos tienen una influencia profunda y diversa en el mundo, afectando tanto a las sociedades humanas como a los ecosistemas naturales, ha surgido la necesidad de desarrollar herramientas que describan o predigan la situación climática global. Esta demanda ha llevado a la creación de diversos índices, considerando la naturaleza no estacional de estos fenómenos (Montenegro et al., 2022); existen varios índices macro climáticos, no obstante, hay unos que mejor representan el fenómeno ENOS en Colombia (Ávila et al., 2014). A continuación, se presentan los tres índices macro climáticos más representativos en la región:

- **Índice de Oscilación del Sur (SOI):** que se basa en la observación de las diferencias de presión a nivel del mar entre Tahití y Darwin (Australia), y su fase negativa representa la presión del aire por debajo de lo normal en Tahití y por encima de lo normal en Darwin, dando esto cabida al fenómeno del Niño, y en la fase opuesta, al fenómeno de la Niña (NOAA, 2017).
- **Índice Oceánico del Niño (ONI):** se utiliza para identificar eventos fríos (Niña) y cálidos (Niño) en el océano Pacífico tropical. Teniendo en cuenta que sus valores oscilan entre +1 y -1, se comprende que cuando se obtienen resultados por encima de +0.5 hace referencia al Niño y cuando son inferiores a -0.5 se relaciona con el fenómeno de la Niña (NOAA, s.f.).

- **Índice Multivariado ENOS (MEI):** está relacionado con las variables de interacción océano-atmósfera más relevante para el análisis del comportamiento anómalo en el Pacífico tropical. Cuando este índice toma un valor negativo significa enfriamiento, contrario a esto, se refiere al calentamiento, siendo estos relacionados a los fenómenos Niña y Niño respectivamente (NOAA, 2018).

Los cambios y desequilibrios climáticos mencionados con anterioridad han generado un gran impacto sobre los recursos naturales, entre ellos los **recursos hídricos (RRHH)**, definidos en el Glosario Hidrológico Internacional (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2012) como “los recursos disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo dado, apropiados para satisfacer una demanda identificable” (p.377). El **agua** es el recurso más abundante en la Tierra, es fuente de vida y una fuerza que mantiene en un cambio constante a la superficie terrestre, además de su importancia en la climatización del planeta y la influencia en el progreso de la civilización (Chow et al., 1994).

En este sentido, es indispensable abordar la **hidrología**, una rama de la ciencia muy importante para la vida, y que es conceptualizada por Dingman (1994) como la geociencia que describe y predice la aparición y circulación del agua dulce de la Tierra, que tiene como principales enfoques la distribución y el movimiento del agua sobre y bajo las superficies terrestres, incluyendo sus intercambios con la atmósfera; sus interacciones físicas y químicas con los materiales de la tierra; y los procesos biológicos junto con las actividades humanas que afectan a su movimiento, distribución y calidad.

En la hidrología es necesario definir el espacio geográfico a estudiar, como lo es la **cuenca hidrográfica**, que es el área que posee una salida única para su escorrentía superficial (OMM, 2012). De la misma manera, en el Decreto 1729 de 2002 se define como “el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor con posterior desembocadura”. Además, es importante reconocer que dentro de una cuenca hidrográfica hay variaciones en los elementos naturales, físicos, sociales, económicos y políticos, que afectan el manejo y comportamiento del ecosistema (Cantera et al., 2009). Es

así como, para todo estudio hidrológico de una cuenca hidrográfica es importante efectuar una adecuada **caracterización o análisis biofísico** de la misma. El estudio biofísico proporciona información valiosa sobre las características de drenaje de una cuenca; es un indicador importante de la estructura del relieve, los procesos hidrogeológicos, las pérdidas de materiales, propiedades físicas del suelo, procesos de la tierra y características de erosión (Asfaw & Workineh, 2019).

En el análisis de cuencas hidrográficas, también son importantes el **coeficiente de escurrimiento** y el **número de curva de escorrentía**. El primero se utiliza para establecer una relación entre la cantidad de agua de lluvia que se acumula y la que fluye superficialmente. Además, es una variable que presenta una alta incertidumbre en su determinación, y su valor cambia según la inclinación del terreno, las condiciones de la superficie y la vegetación, así como el tipo de suelo hidrológico presente (Chiarito et al., 2018). Por otro lado, el número de curva de escorrentía es un método empírico desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos, que se expresa como un parámetro hidrológico. Su función es evaluar y caracterizar la capacidad de una cuenca para generar escorrentía en función de ciertas características físicas, como la densidad de la vegetación, el tipo y grupo hidrológico del suelo, y las condiciones de la superficie del terreno (Chow et al., 1994).

Una vez realizada la caracterización biofísica de la cuenca, el objetivo en los estudios hidrológicos es determinar las diferentes variables que conforman el **ciclo hidrológico**, siendo este el foco central de la hidrología, y una sofisticada red de distribución y desplazamiento del agua en diversas formas, tanto en el subsuelo como en la superficie terrestre, implica una constante transformación de grandes volúmenes de agua y su transporte de un punto a otro (Ordoñez, 2011). Complementando lo anterior, Sánchez (2017) relaciona el ciclo hidrológico al movimiento general del agua, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea.

La **precipitación**: incluye la lluvia, la neblina y otros procesos donde el agua impacta en la superficie terrestre; su formación requiere la elevación de una masa de agua en la atmósfera de tal

manera que se enfríe y parte de su humedad se condense. Los tres mecanismos principales para la elevación de estas masas son la elevación frontal, orográfica y convectiva (Chow et al., 1994).

En el proceso de **análisis de la distribución de lluvias en el tiempo y en el espacio**, toman relevancia las representaciones gráficas que permitan observar la distribución y frecuencia de la precipitación, además de su comportamiento y/o tendencias para un periodo de tiempo determinado (IDEAM, 2016). Para lo anterior es importante entender la influencia de la **Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT)**, esta es una franja donde se encuentran las corrientes de aire cálido y húmedo provenientes de los cinturones de alta presión situados en la zona subtropical de los hemisferios norte y sur, y dan origen a grandes masas de nubes y abundantes precipitaciones (Jaramillo & Chaves, 2000).

Para la determinación de la precipitación media de una cuenca son utilizadas las **Isoyetas**, ya que permiten usar e interpretar todos los datos disponibles, tomando en cuenta efectos orográficos y morfología de las lluvias cuando se elaboran los mapas. Por otro lado, está el método de **Thiessen**, que admite una distribución no uniforme de pluviómetros, afectando de un peso a los valores de cada una. Este método presenta como principal limitación la falta de flexibilidad cuando se producen variaciones en la red pluviométrica (Legarda & Viveros, 1996).

La **infiltración**: es el volumen de agua procedente de las precipitaciones que atraviesa la superficie del terreno y ocupa total o parcialmente los poros del suelo y del subsuelo. Entre los factores que afectan la capacidad de infiltración se tienen, la entrada superficial, la acumulación en la capacidad de almacenamiento, las características del medio permeable y del fluido (Ordoñez, 2011).

La **evapotranspiración**: Es la combinación de dos procesos separados por los que el agua presenta pérdidas a través de la superficie del suelo mediante la evaporación y transpiración de la cobertura vegetal (FAO, 2006). En la práctica, se hace difícil la separación del volumen de agua que pasa a la atmósfera por evaporación del que lo hace por transpiración, por eso ambos se estudian en conjunto (Martínez, 2006).

Aunque la evapotranspiración es uno de los términos más importantes en un balance hidrológico, en la actualidad no existe una metodología para medirla a escala de cuenca, por eso se estima a partir de diferentes modelos (Ordoñez, 2012).

La evapotranspiración requiere de datos meteorológicos para su determinación. El método de FAO Penman-Monteith es el recomendado como el método estándar para la definición y cálculo de evapotranspiración (FAO, 2006). No obstante, métodos como el de Thornthwaite o el de Hargreaves son ampliamente utilizados en estudios donde hay ausencia de mediciones o registros de datos, siempre y cuando se tengan en cuenta sus limitaciones.

El **escurrimiento**: es la porción de la precipitación pluvial que ocurre en una zona o cuenca hidrológica, circula sobre o debajo de la superficie terrestre y llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de la cuenca. Ahora bien, el escurrimiento que se presenta en un cauce es alimentado por cuatro fuentes diferentes como la precipitación directa, el flujo subsuperficial, el flujo base y el escurrimiento directo (Breña & Jacobo, 2006). De acuerdo con lo descrito por Legarda y Viveros (1996), el escurrimiento como proceso de transferencia de ciclo hidrológico debe conocerse para aprovechar los RRHH.

Otra herramienta que toma importancia en el estudio del comportamiento del ciclo hidrológico es el **balance hídrico**, conceptualizado como una formulación matemática de la interrelación y distribución espacial del agua en sus diferentes fases (IDEAM, 2001), este balance se calcula a partir de la igualdad del cambio en el almacenamiento con la diferencia entre las entradas y las salidas, es decir, la suma de la precipitación y entradas adicionales menos la evapotranspiración y demás salidas como escurrimiento superficial, igualando todo esto al cambio en el almacenamiento de agua en el sistema (ver Ecuación 1).

Ecuación 1. Cálculo del Balance Hídrico (Carvajal & Montoya, 1998).

$$P - EVT - Q = \delta A$$

Donde,

P = Precipitación media (mm).

EVT = Evapotranspiración potencial media (mm).

Q = Caudal medio (mm).

δA = Cambio en el almacenamiento.

De igual modo, conforme con lo descrito en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2019), un elemento útil para caracterizar el régimen hidrológico en una unidad hidrográfica definida es el **análisis de frecuencias de caudales**, que puede ser abordado con la construcción de la **Curva de Duración de Caudales** (ver Figura 5) para reconocer las condiciones de regulación de la cuenca y los valores característicos de caudales medios y estables, que por medio de su análisis facilita la interpretación de las características del régimen hidrológico de un río, y el comportamiento de la retención y la regulación de humedad en la cuenca.

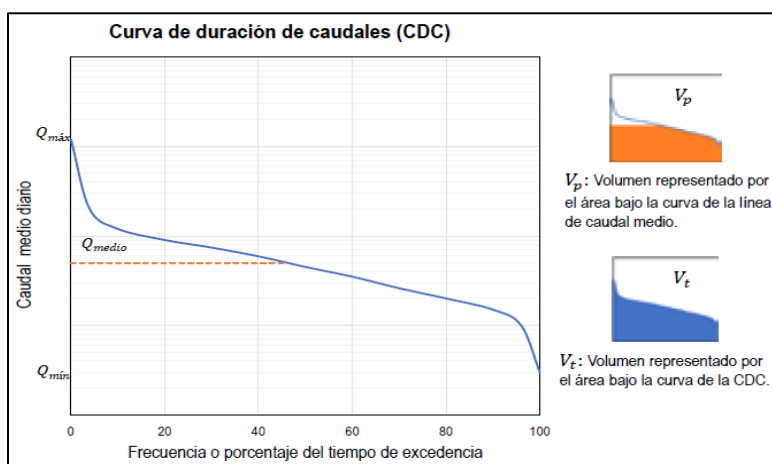


Figura 5. Esquematización de la CDC y los volúmenes para el cálculo del IRH. Fuente: IDEAM, 2022.

Tal y como señala Pardo (2022), la regulación hídrica implica el almacenamiento y la liberación gradual del agua, beneficiando tanto a las necesidades humanas como a la conservación de los ecosistemas. Para evaluar esta capacidad de regulación en una cuenca, se utiliza el **índice de retención y regulación hídrica (IRH)**, que considera la interacción del sistema suelo-vegetación con las condiciones climáticas y las características biofísicas de la cuenca, su determinación implica el uso de la curva de duración de caudales, y se calcula mediante la Ecuación 2.

Ecuación 2. Determinación del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IDEAM, 2022).

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde,

IRH: Índice de Regulación Hídrica

V_p : Volumen representado por el área que se encuentra bajo la línea de caudal medio en la CDC

V_t : Volumen total equivalente al área bajo la CDC.

No obstante, el papel que juega la estadística en la hidrología es esencial, ya que todo parte de un buen análisis exploratorio de datos y una confiable estimación de datos faltantes para su posterior procesamiento de acuerdo con las necesidades e intereses del investigador. De acuerdo con la Oficina del Dato de España (2021), **el análisis exploratorio de datos** es un conjunto de técnicas estadísticas que se utilizan para investigar, describir y resumir la naturaleza de los datos, así como para comprender las relaciones entre las variables de interés. Su objetivo principal es mejorar la comprensión del conjunto de datos con apoyo de herramientas como gráficos y estadísticas, que facilitan la evaluación de la calidad de los datos e identificación de características como valores inusuales, cambios bruscos o patrones de concentración en los datos, entre otros.

Antes de realizar cualquier tipo de análisis climatológico, la información debe ser ampliamente explorada usando métodos gráficos y estadísticos (cuantitativos); si ello no se realiza se pueden hacer suposiciones que no son ciertas con respecto a la independencia, normalidad, homocedasticidad, entre otras (Castro, 2022).

Los **métodos cuantitativos** incluyen pruebas paramétricas y no paramétricas utilizadas para analizar la estacionariedad en la media y la varianza de las series de datos, así como su consistencia y uniformidad. A menudo, se aplican estas pruebas sin realizar una verificación previa de normalidad, lo que puede presentar problemas, en algunas ocasiones, la suposición de normalidad no es válida, especialmente con muestras pequeñas. Ante estas situaciones, existen dos opciones: transformar los datos para que se ajusten a una distribución normal o emplear pruebas estadísticas que no requieran suposiciones sobre la distribución de probabilidad de los datos, conocidas como pruebas no paramétricas o de distribución libre (Castro & Carvajal, 2006).

Larrahondo y Russi (2019) resaltan la existencia de situaciones puntuales que pueden distorsionar la calidad de los datos o registros de las variables de estudio, enfatizando en la información hidrológica, las series históricas elaboradas a partir de las mediciones en las estaciones meteorológicas correspondientes pueden verse alteradas por errores ya sean del instrumento o del personal encargado de tomar el registro, siendo estos causantes principales de inconsistencias o falta de datos e información.

Dado que en los registros es común encontrarse con datos faltantes, se hace imperativo realizar estimaciones para determinarlos (Marulanda, 2023). Para abordar este problema, se emplean diversos métodos, entre ellos el método de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) (ver Ecuación 3). Este método implica calcular un promedio ponderado, donde los pesos se asignan en función de la distancia de las observaciones a la ubicación de interpolación. La veracidad del método puede ser comprobada con la evaluación del indicador de desempeño conocido como Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), que se utiliza para evaluar la precisión de los resultados en el análisis de series de tiempo (Larrahondo & Russi, 2019).

Ecuación 3. Ecuación de la Raíz del Error Cuadrático Medio (Larrahondo & Russi, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}},$$

Donde:

RMSE: Raíz de error cuadrado medio.

$\hat{y}_i$: Valor estimado con el método.

y_i : Valor real.

n: Número total de datos.

7. Metodología

7.1. Recopilación de información

Para investigar en profundidad la influencia del CC y la VC en la regulación hídrica de la cuenca media-alta del río Cali, se recopiló información de la zona de estudio como bases de datos hidroclimatológicas, estudios técnicos, documentos académicos y cartografías digitales enfocados en el área de estudio o en temáticas relacionadas con el análisis del comportamiento de la regulación hídrica bajo escenarios de CC y VC, con el fin de realizar la caracterización hidrológica de la cuenca y el posterior estudio del comportamiento de las diferentes variables que hacen parte del ciclo hidrológico. También se consultó información como las proyecciones del CC en la región y los datos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) para detectar períodos asociados a las fases extremas del ENOS (El Niño, La Niña), durante los cuales se producen variaciones climáticas que alteran la dinámica general del ciclo hidrológico en la zona de estudio.

Asimismo, se buscaron metodologías y enfoques adecuados para llevar a cabo los diferentes análisis del presente estudio, con el objetivo de fomentar nuevas ideas y perspectivas en el desarrollo de la investigación, de modo que los resultados generen confiabilidad.

7.1.1. Visitas de campo

Con el fin de observar factores que pueden alterar la dinámica hidrológica y ser tenidos en cuenta en el análisis de los resultados, conclusiones y recomendaciones de este trabajo, se visitaron la vereda Pilas del Cabuyal, donde se encuentra la quebrada El Cabuyal vertiente del río Cali (ver Figura 6); y las instalaciones de la estación limnigráfica Bocatoma ($76^{\circ} 34' 5.57''$ W, $03^{\circ} 26' 57.06''$ N) la cual se encuentra aproximadamente a 2 km aguas arriba del río Cali desde el Zoológico de Cali sobre la Avenida 1 Oeste (ver Figura 7). Las visitas se llevaron a cabo en compañía de miembros de la comunidad de la vereda y de personal encargado de la estación respectivamente.

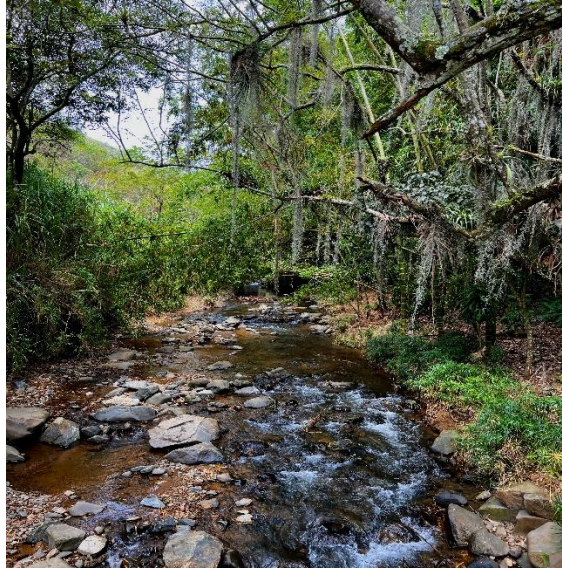


Figura 6. Quebrada "El Cabuyal". Fotografía tomada por: Nicolás Guzmán.

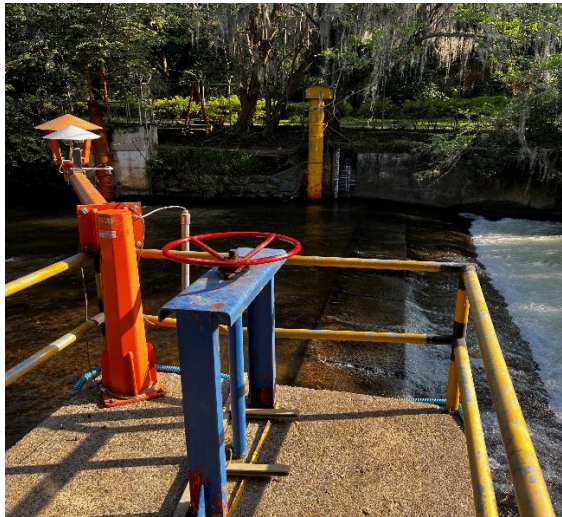


Figura 7. Sección de aforo de la estación limnigráfica Bocatoma sobre el río Cali. Fotografía tomada por: Nicolás Guzmán.

Junto con eso, y considerando que las consecuencias o impactos por el comportamiento del caudal en el río Cali se ven reflejadas también aguas abajo de la estación limnigráfica Bocatoma, se realizó un recorrido desde el Zoológico de Cali sobre las márgenes del río hasta el sector denominado Boulevard del Río con el objetivo de observar posibles focos de riesgo en caso de eventos extremos, especialmente desbordamientos por precipitaciones intensas. También es importante destacar la visita al Centro de Monitoreo y Control Hidroclimatológico de la CVC (ver Figura 8) realizada con el fin de profundizar el

conocimiento sobre el estado actual del sistema de alertas tempranas y la toma de decisiones ante situaciones de riesgo.



Figura 8. Visita al Centro de Monitoreo y Control Hidroclimatológico de la CVC. Fotografía tomada por: Henry Jiménez.

7.2. Caracterización biofísica

El funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento, dependiendo de sus características biofísicas y de las condiciones climáticas (Gaspari et al., 2013); de esta forma, las propiedades biofísicas proporcionan una descripción física-espacial que permite inferir indirecta y cualitativamente sobre la estructura, características y respuesta hidrológica. También, facilitan el análisis y comprensión de los elementos geométricos básicos del sistema que, ante la presencia de precipitaciones extremas, interactúan para originar y/o activar procesos geomorfológicos de vertientes y aludes torrenciales (Barroso et al., 2010).

En coherencia con lo planteado, conocer el área y la red hídrica de una cuenca es importante para comprender la topografía, los patrones de precipitación y el flujo del agua de escorrentía, de esta manera prever impactos negativos a través de la gestión efectiva de los RRHH y preservando los ecosistemas (IPCC, 2014). De este modo, se delimitó la red hídrica y el parteaguas como punto de partida de la caracterización y posteriores análisis de la dinámica hidrológica de la cuenca media-alta del río Cali, haciendo uso de los programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) QGIS y ArcGIS junto con un Modelo de Elevación

Digital (DEM) de la zona de estudio, obtenido de la plataforma Earth Data, tomando como punto de cierre las coordenadas de la estación limnigráfica Cali-Bocatoma, tal cual lo descrito en la Figura 9.

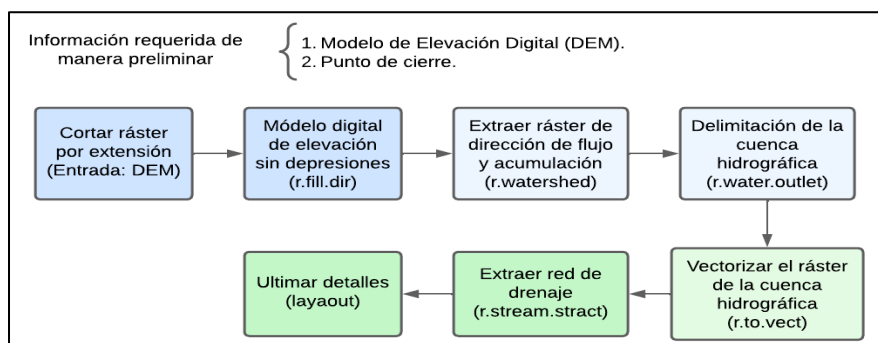


Figura 9. Procedimiento para delimitación de la cuenca hidrográfica y su red de drenaje en QGIS.

Una vez delimitada la cuenca con punto de cierre la estación Bocatoma del río Cali, mediante herramientas propias de los programas mencionados, se determinaron los parámetros geométricos básicos de forma como el área, el perímetro y la longitud, los cuales fueron útiles para calcular otros índices relacionados con la forma de la cuenca, el relieve y la red de drenaje (ver Tabla 2).

Parámetro	Unidad	Valor	Parámetro	Unidad	Valor
Morfometría general					
Área	km ²	116.28	Ancho máximo de la cuenca	km	15.19
Perímetro	km	59.46	Desnivel altitudinal	m	2682
Longitud máxima de la cuenca	km	16.75	Longitud del cauce principal	km	23.69
Morfometría asociada al relieve					
Altitud máxima	msnm	3767	Altitud máxima del cauce	msnm	3205
Altitud mínima	msnm	1085	Altitud mínima del cauce	msnm	1085
Altitud media	msnm	2180	Desnivel altitudinal del cauce	msnm	2120
Pendiente media de la cuenca	%	40.8			
Morfometría asociada a la forma y a la red de drenaje					
Factor de forma		0.53	Longitud total de drenajes	km	119.05

Coeficiente de compacidad o Gravelius		1.54	Densidad de drenajes	km/km^2	1.02
Índice de alargamiento		1.10	Tiempo de concentración*	h	1.92
Constante de estabilidad del río	km^2/km	0.98	Tiempo de concentración**	h	1.92
Pendiente del cauce	%	8.9	Tiempo de concentración***	h	1.58
Orden de la cuenca		6	Tiempo de concentración****	h	1.91

Tabla 2. Características biofísicas más relevantes de la zona de estudio.

*Calculado mediante fórmula de Kirpich

**Calculado mediante fórmula de California Culverts Practice

***Calculado mediante fórmula de Guaire

****Calculado mediante fórmula de Bureau of Reclamation

Los parámetros biofísicos asociados a la forma y a la red de drenaje indican que se trata de una cuenca alargada, oval oblonga a rectangular oblonga (Reyes et al., 2017), por lo que presenta baja susceptibilidad para concentrar grandes volúmenes de agua en eventos de avenidas torrenciales, debido al tiempo que tarde en concentrarse el agua desde los diferentes puntos de la cuenca hasta el punto de desfogue en el cauce principal.

La red hidrográfica está conformada por cauces perennes e intermitentes que se juntan en el río Felidia y Pichindé para formar el río Cali, esta red es de sexto orden, de tipo dendrítica angulada correspondiente con pendientes moderadas, mediana pluviosidad y litología con baja permeabilidad (Londoño, 2001) y de acuerdo con la longitud total de los cauces y la densidad de drenaje sugiere un drenaje moderado que no responde de manera inmediata ante un evento de precipitación extrema. Se infiere que el río en estudio se encuentra en etapa de equilibrio y madurez con estabilización de los procesos de erosión del suelo (Gaspari et al., 2012).

El tiempo de concentración de la cuenca indica que la respuesta a eventos de lluvia es moderada debido a la forma alargada de la cuenca, lo que permite una concentración de flujo más uniforme. Sin embargo,

este tiempo varía según fórmulas empíricas que consideran factores geomorfológicos que afectan estos sistemas hídricos. Ecuaciones como Kirpich y Bureau fueron diseñadas para situaciones de impermeabilización y retención natural, las cuales pueden estar influenciadas por las condiciones de saturación del suelo. Esto se debe a que no siempre un evento de lluvia extrema coincide con caudales extremos (Castillo et al., 2021; Barroso et al., 2017).

Conocer el tiempo de concentración es fundamental para, entre otros, la gestión de los recursos hídricos, la planificación urbana, la toma de decisiones y protección contra inundaciones a través de alertas tempranas que ayuden a prever y responder adecuadamente en áreas propensas a desbordamientos, sobre todo aguas abajo de la estación limnigráfica Bocatoma, que es donde el río atraviesa el área urbana de la ciudad y durante diferentes eventos de lluvias intensas ha presentado inundaciones afectando la población.

7.3. Recopilación de información hidrológica

En concordancia con la recopilación de información, se conformaron bases de datos hidrológicas construidas a partir de los registros históricos de la red de estaciones hidrometeorológicas de la CVC y el IDEAM que se encuentran en el área de estudio y en la zona circundante, como se muestra en la Figura 10. Estos registros fueron proporcionados, mediante radicados y solicitudes, por las mismas entidades. A su vez, la red de estaciones se determinó bajo un conjunto de criterios que tienen en cuenta el tipo de estación, la localización, el estado actual y la continuidad del registro de datos reflejado en el porcentaje de datos faltantes inferior al 15% del total (ver Tabla 3).

Estación	Este (X)	Norte (Y)	Altitud (msnm)	Categoría	Datos faltantes (1982 – 2021)
Peñas Blancas (PB)	1046119.11	869462.54	2158	Pluviográfica	12%
La Teresita (LT)	1046071.19	873234.96	1950	Climatológica	14%
San Pablo (SP)	1050759.76	880677.32	1871	Pluviométrica	3%
Brasilia (BRA)	1049902.3	873547.87	1864	Pluviográfica	4%
La Argentina (LA)	1047378.91	859711.22	1794	Pluviográfica	14%
Yanaconas (YN)	1052861.97	871956.36	1730	Pluviométrica	4%

Pichindé (PD)	1052888.65	871961.15	1637	Pluviométrica	0.5%
Pichindé	1051712.16	871601.87	1501	Limnigráfica	9%
Los Cristales (LC)	1056527.91	870803.34	1312	Pluviométrica	3%
La Fonda (LF)	1054080.38	866787.33	1298	Pluviométrica	2%
Aguacatal Montebello (AM)	1058550	877405.61	1260	Pluviométrica	1%
Las Brisas (LB)	1054315.22	868345.91	1228	Pluviométrica	6%
Cali Bocatoma	1056592.88	873178.34	1074	Limnigráfica	4%
Edificio CVC (CVC)	1059854.91	868389.07	985	Climatológica	11%

Tabla 3. Estaciones seleccionadas a partir de información proporcionada por CVC e IDEAM.

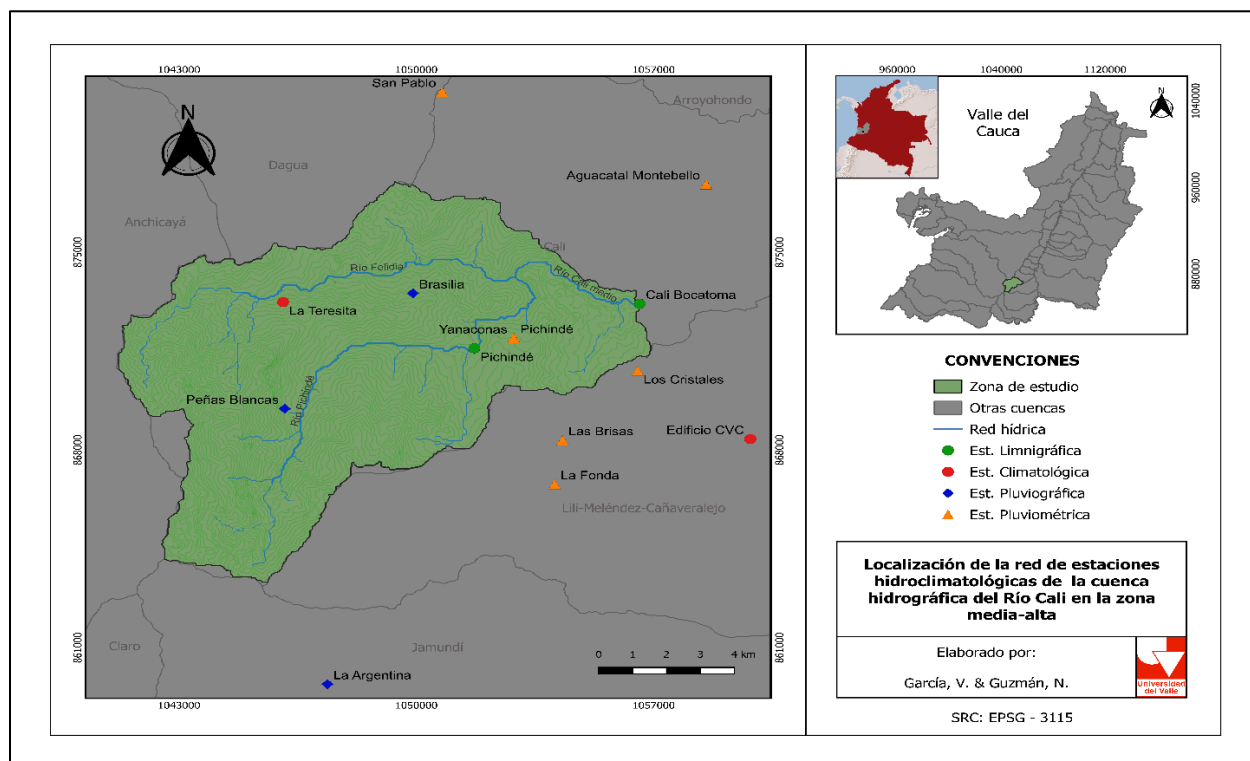


Figura 10. Mapa de la red de estaciones en la zona de estudio elaborado a partir de información de la CVC y el IDEAM.

De esta manera, en cada estación seleccionada en el periodo comprendido entre 1982 y 2021, se hizo una revisión detallada de la disponibilidad de información mensual multianual, partiendo desde el análisis estadístico correspondiente, la estimación de los datos faltantes para la conformación de bases de datos sólidas y completas, el análisis de precipitaciones y caudales, hasta la estimación de la regulación hídrica y la incidencia, en el comportamiento hidrológico, del CC y la VC a través del fenómeno ENOS y las proyecciones realizadas para la región y/o el departamento.

7.4. Análisis exploratorio de datos y estimación de datos faltantes

La recolección de información hidrometeorológica ha mejorado con el paso de los años y los avances tecnológicos que permiten cada vez ser más rápidos en el reporte del dato; sin embargo, los registros en los que se basa la meteorología aplicada son deficientes, tanto en calidad como en cantidad, ya que las series pluviométricas, y en general las series meteorológicas, siguen presentando falta de información, cambios, tendencias y datos atípicos; estas condiciones pueden afectar los resultados obtenidos en la modelación o análisis. Para el uso correcto de la información meteorológica en la ingeniería de los recursos hídricos, esta debe cumplir con el supuesto de estacionariedad, consistencia y homogeneidad, sin dejar aparte la independencia (Carvajal et al., 2012).

De acuerdo con los reportes mensuales multianuales de cada estación se realizó un Análisis Exploratorio de Datos (EDA, por sus siglas en inglés) a la información hidrológica recopilada, este análisis consistió en la obtención de los estadísticos descriptivos de los datos como promedio, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos, acompañado de gráficos como diagramas de cajas y bigotes e histogramas. Lo anterior permitió establecer relaciones entre variables, determinar datos atípicos y conocer patrones objeto de análisis teniendo en cuenta el área de influencia de cada estación a través de polígonos de Thiessen.

Considerando el EDA, se realizó la correlación de variables, también se llevaron a cabo pruebas estadísticas no paramétricas y pruebas confirmatorias de normalidad gráficas mediante el software estadístico R para comprender y utilizar de manera efectiva los datos de entrada en la aplicación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW) como método para la estimación de los datos faltantes.

La estimación de los datos faltantes se llevó a cabo a través del método determinístico de interpolación IDW, dado que no se contaban con los elementos necesarios para estimarlos a través de algún método geoestadístico robusto como el método Kriging, o por la practicidad en comparación con el método de Proporciones Normales. En el procedimiento se implementó el uso de la herramienta *Model Builder* en

ArcGIS, como se puede ver en la Figura 11, facilitando la optimización del proceso de reconocimiento del dato faltante y la influencia de las estaciones según su localización.

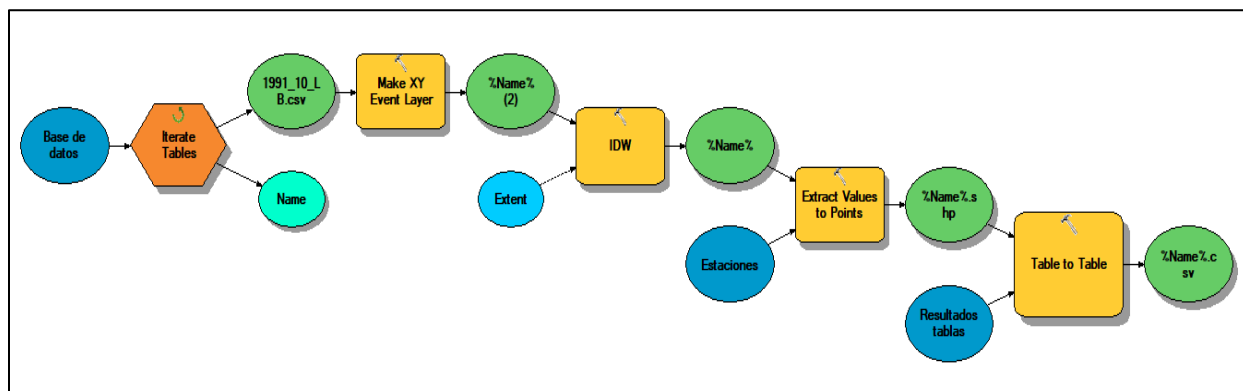


Figura 11. Procedimiento para estimación de datos faltantes con el método IDW a través de ArcGIS.

Ahora bien, como complemento del procedimiento anterior, se desarrolló el método RMSE para evaluar la precisión de la estimación de los datos. La metodología de esta evaluación consistió en la selección del 10% de los puntos (estaciones) y repitiendo la interpolación sin ellos, siendo sometidos sus resultados individualmente a la Ecuación 3. Posteriormente, la estimación de datos faltantes de caudal se realizó, por medio del método de interpolación lineal, partiendo de la base de datos completa de precipitaciones y los polígonos de Thiessen.

7.5. Caracterización hidrológica

Se llevó a cabo el análisis de la distribución temporal y espacial de la precipitación y el caudal durante el período de estudio. Para este propósito, se confirmó la presencia de un patrón de precipitación bimodal mediante la representación de curvas de variación estacional y la elaboración de isoyetas a partir de los registros completos en cada una de las estaciones seleccionadas. La construcción de las curvas isoyetas se realizó a través del método de interpolación IDW por medio de ArcGIS utilizando los registros completos de precipitación de la red de estaciones. El método IDW fue utilizado para este objetivo por ser una técnica útil y accesible, resaltando que representa muy bien la distribución espacial de la precipitación en la región (Castro, 2022).

Además, se construyeron gráficas que muestran la distribución temporal de la precipitación y el caudal (medios) en la zona de estudio considerando el área de influencia proporcionada por los polígonos de Thiessen para el periodo de estudio (40 años) junto con dos intervalos de tiempo (1982-2001 y 2002-2021) para ampliar los análisis debido a la disponibilidad continua de datos, ya que no se contaba con información diaria, lo que pudo haber resultado en una pérdida de detalle en el procesamiento de los datos y sus resultados. Finalmente, y para aterrizar la relación entre las dos variables hidrológicas mencionadas, se desarrolló la estimación del coeficiente de escurrimiento medio considerando la respuesta hidrológica de la cuenca.

7.6. Determinación de la capacidad de la regulación hídrica

7.6.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

El objetivo principal del Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) es proporcionar una representación de la capacidad de regulación del agua en determinadas áreas, mostrando las zonas que cuentan con condiciones más estables en términos de flujo y control de caudales. Además, a través de la Curva de Duración de Caudales (CDC) medios se puede observar la proporción de ocurrencia de caudales altos y bajos en dichas zonas (IDEAM, s.f.)

El IRH se estimó utilizando las CDC medias mensuales, que representan la proporción de tiempo en la que los caudales son iguales o superiores a un valor específico. Este cálculo se realizó para dos períodos de 20 años cada uno (1982-2001 y 2002-2021), siguiendo la metodología del IDEAM aplicada en el Estudio Nacional del Agua (2022) y utilizando la Tabla 4 para realizar la clasificación cualitativa a partir de los valores estimados. De acuerdo con el IDEAM, la forma y la pendiente de la CDC indican la duración de los caudales en un curso de agua, y la relación de las áreas bajo la curva define su capacidad de regulación, como se ilustra en la Figura 5 que representa un esquema de la CDC y los volúmenes utilizados en el cálculo del IRH mediante la Ecuación 2.

IRH	Categoría
$IRH \leq 0,50$	Muy Baja
$0,50 < IRH \leq 0,65$	Baja
$0,65 < IRH \leq 0,75$	Moderada
$0,75 < IRH \leq 0,85$	Alta
$IRH > 0,85$	Muy Alta

Tabla 4. Categorías del Índice de Regulación Hídrica. Fuente: IDEAM, 2022.

7.6.2. Balance hídrico

El balance hídrico constituye una herramienta básica para estimar la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas y sus componentes permiten evaluar los elementos relevantes que rigen el sistema hidrológico de la cuenca. El análisis del balance hídrico explica el comportamiento de las magnitudes fundamentales de la cuenca como: disponibilidad natural del agua, explotación de acuíferos, déficit de transvase y fugas en las redes de distribución, entre otras variables (Gómez-Reyes, 2013).

Continuando con el enfoque establecido, el balance hídrico se desarrolló para los 40 años observados y dividido en dos periodos de tiempo iguales. El cálculo partió de la igualdad del cambio en el almacenamiento con la diferencia entre las entradas y las salidas como lo muestra la Ecuación 1, utilizando los datos completos de precipitaciones y caudales medios, así como información climatológica de la estación La Teresita para estimaciones de evapotranspiración aplicando el método empírico de Thornthwaite, esto debido a las limitaciones en disponibilidad de la información de las variables hidrológicas necesarias para emplear métodos más robustos como el de Penman Monteith, no obstante, el método empleado proporciona resultados confiables en condiciones climáticas húmedas con abundante vegetación (Duque - Sarango et al., 2019).

Cabe resaltar que las teorías y los cálculos de evapotranspiración están mejor adaptados para cultivos agrícolas que para áreas forestales como lo son las cuencas hidrográficas. Es de importancia resaltar que La Teresita fue la estación de referencia debido a su influencia en la zona y no contar con disponibilidad de registros climatológicos en las demás estaciones de la red seleccionada para este trabajo.

7.7. Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad

Climática

Sumando a lo expuesto anteriormente, se analizaron los patrones de comportamiento de algunas variables del ciclo hidrológico (precipitación y caudal) y de retención y regulación hídrica (IRH y balance hídrico) bajo escenarios de VC como lo son El Niño y La Niña, relacionándolos con diferentes índices macro climáticos (ONI, MEI y SOI). Aunque estos índices se enfocan en patrones climáticos a gran escala, muestran una mayor correspondencia con las variaciones porcentuales derivadas de las lluvias y caudales en la cuenca del río Cali; destacándose el ONI como uno de los más exhaustivos para supervisar el fenómeno ENOS por la cantidad de variables que considera y representa con precisión la variable de precipitación y caudal mensual en la zona de estudio (Ávila et al., 2014) (Montenegro et al., 2022). En la Tabla 5 se observan los registros históricos de los valores del ONI desde 1982 hasta 2021, los cuales fueron referencia para identificar los meses o periodos bajo escenarios de Niño y Niña. La Niña se caracteriza por un ONI negativo menor o igual a -0.5 °C (azul) o período frío y El Niño se caracteriza por un ONI positivo mayor o igual a +0.5 °C (rojo) (Marulanda, 2023).

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
1982	0	0.1	0.2	0.5	0.7	0.7	0.8	1.1	1.6	2	2.2	2.2
1983	2.2	1.9	1.5	1.3	1.1	0.7	0.3	-0.1	-1	-1	-1	-1
1984	-1	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-1	-1	-1
1985	-1	-1	-1	-0.8	-1	-1	-1	-1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4
1986	-0.5	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.2	0.4	0.7	0.9	1.1	1.2
1987	1.2	1.2	1.1	0.9	1	1.2	1.5	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1
1988	0.8	0.5	0.1	-0.3	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2
1989	-2	-1	-1	-0.8	-1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.6	0.6	0.8	1.2	1.5
1992	1.7	1.6	1.5	1.3	1.1	0.7	0.4	0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.1
1993	0.1	0.3	0.5	0.7	0.7	0.6	0.3	0.3	0.2	0.1	0	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7	1	1.1
1995	1	0.7	0.5	0.3	0.1	0	-0.2	-1	-1	-1	-1	-1
1996	-1	-1	-1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.3	0.8	1.2	1.6	1.9	2.1	2.3	2.4	2.4
1998	2.2	1.9	1.4	1	0.5	-0.1	-1	-1	-1	-1	-2	-2
1999	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2
2000	-2	-1	-1	-0.8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2001	-1	-1	-0.4	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3
2002	-0.1	0	0.1	0.2	0.4	0.7	0.8	0.9	1	1.2	1.3	1.1
2003	0.9	0.6	0.4	0	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4
2004	0.4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.6	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.3	-1	-1
2006	-1	-1	-1	-0.4	-0.1	0	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9	0.9
2007	0.7	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2
2008	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-1	-1
2009	-1	-1	-1	-0.3	0	0.3	0.5	0.6	0.7	1	1.4	1.6
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2
2011	-1	-1	-1	-0.7	-1	-0.4	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2012	-1	-1	-1	-0.5	-0.3	0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0	0.2	0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-1	-1	-1	-1	-1
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-1	-1	-1
2018	-1	-1	-1	-0.5	-0.2	0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-1	-1	-1	-1	-1
2021	-1	-1	-1	-0.7	-1	-0.4	-0.4	-1	-1	-1	-1	-1

Tabla 5. Presentación de los valores del ONI entre los años 1982 y 2021. Fuente: NOAA.

A su vez, la temperatura y la precipitación son elementos climáticos esenciales y están estrechamente relacionados en el contexto de las proyecciones sobre el CC. Su relevancia radica en su influencia y en cómo afectan tanto al sistema climático como a los sistemas naturales y humanos (CVC et al., 2018). En el marco de este estudio, se llevó a cabo un análisis del comportamiento hidrológico en la zona de estudio, estableciendo conexiones entre los factores mencionados y su relación con el IRH y el balance hídrico (asumiendo un régimen de almacenamiento sin cambios al año 2040) en diversos escenarios futuros planteados. Estos análisis se basaron en los resultados de las proyecciones que examinaron el impacto del CC en los patrones climáticos y los ecosistemas del departamento en su conjunto.

8. Resultados y Análisis

8.1. Antecedentes históricos

Las visitas fueron de utilidad para conocer el funcionamiento de la estación hidrométrica y observar distintos factores que pueden alterar las mediciones y/o registros, en el lugar se observaron algunas situaciones que pueden desestabilizar de cierta forma los caudales como desvíos del flujo para la generación eléctrica por parte de la hidroeléctrica de Celsia (ubicada a pocos metros aguas arriba de la estación limnigráfica) e impactos por las actividades de recreación, urbanización, entre otras intervenciones antrópicas. Complementando el reconocimiento de la zona, el acercamiento a la vereda Pilas del Cabuyal, donde se encuentra la quebrada El Cabuyal vertiente del río Cali, permitió observar, a menor escala, el aprovechamiento que se ejerce sobre los recursos hídricos por parte del acueducto comunitario, actividades económicas y de recreación.

Con respecto al recorrido aguas abajo de la estación Bocatoma, la relación directa entre el río y la urbanización es evidente, ya que la zona sobre la margen del río en ese trayecto se caracteriza por la presencia de actividad comercial, hotelera, turística, residencial, entre otras, además de la presencia de la obra del hundimiento de la Avenida Colombia y el edificio del Centro Administrativo Municipal CAM (ver Figura 12).



Figura 12. Boulevard del río Cali y alrededores. Fotografía suministrada por: Diego Guerrero, 2015.

Toda esa zona, a pesar de las obras de prevención, podría presentar un riesgo potencial durante eventos extremos por desbordamientos e inundaciones como ocurrió en julio de 1984 (ver Figura 13) y en mayo del 2006 (ver Figura 14) que, según el Grupo de Sistema de Información Ambiental de la CVC (2006), deben esperarse crecientes iguales o superiores a las de la época si se tiene en cuenta que los fenómenos macroclimáticos están influenciando la ocurrencia cada vez más frecuente de eventos extremos, bien sea de exceso o de déficit.



Figura 13. Inundaciones en el CAM. Tomada de El País (03 de julio de 1984).



Figura 14. Inundaciones por el sector del zoológico. Tomada de El País (08 de mayo del 2006).

Por otra parte, es importante destacar que la problemática de incendios forestales en la cuenca durante periodos de sequía (ver Figura 15) representa otro factor crítico que puede influir significativamente en el equilibrio hidrológico, ya que la ocurrencia de estos eventos, la cual tiene una estrecha relación con la

disminución de precipitaciones y la presencia de actividades antrópicas en la zona (Jiménez et. al, 2018), puede tener consecuencias devastadoras en los diferentes sistemas bióticos y abióticos de la cuenca, tales como pérdida de vegetación, alteración de la cobertura del suelo, aumento del riesgo de erosión, disminución de la capacidad de retención de agua y disminución en los flujos superficiales (ver Figura 16). Este tipo de eventos resalta la importancia de abordar de manera integral los desafíos asociados a los cambios del clima y su comportamiento a través de una adecuada gestión del riesgo, a pesar de ser una labor compleja debido al componente social, en la visita al nuevo centro de monitoreo de la CVC se pudo observar un gran avance en cuanto al sistema de alertas tempranas y la toma de decisiones ante situaciones de riesgo.



Figura 15. Incendio forestal en los Farallones de Cali. Tomada de El Tiempo, 2015.



Figura 16, Sequía en el río Cali a la altura de la estación Bocatoma. Fotografía suministrada por el DAGMA, 2023.

8.2. Análisis exploratorio de datos y estimación de datos faltantes

El análisis exploratorio de datos permitió la comprensión de la estructura y el comportamiento de los registros. Una vez organizadas las bases de datos de los registros de precipitación proporcionados por la CVC y el IDEAM, se aplicaron medidas y tendencias de estadística descriptiva enfocadas en la obtención de un resumen y de patrones iniciales de los datos sin necesidad de inferencias o generalizaciones más allá de la muestra observada (ver Tabla 6).

Medidas de Estadística Descriptiva Básicas												
	AM	BRA	CVC	LA	LF	LT	LB	LC	PB	SP	PD	YN
Mínimo	0	0	0.8	3	1	4	0	0	3	0	0	0
Máximo	395	388	340	622	587	477	522	607	498	539	496	499
Rango	395	388	339.2	619	586	473	522	607	495	539	496	499
Mediana	95	114	82.4	230	154	131	154	135	155	115	135	135
Promedio	102.8	122.1	97.9	234.5	160.8	139.4	163.8	147.8	162.0	126.8	146.4	146.1
D.Estándar	67.4	68.7	73.6	128.7	100.1	79.1	104.3	92.0	92.6	86.7	85.7	87.2
C.Variación	66%	56%	75%	55%	62%	57%	64%	62%	57%	68%	59%	60%
% Datos faltantes	1%	4%	11%	14%	2%	14%	6%	3%	12%	3%	1%	4%

Tabla 6. Resumen de estudio estadístico descriptivo de la precipitación para cada estación.

A su vez, los gráficos y representaciones visuales fueron útiles para observar los datos de manera clara y comprensible. Se implementaron los histogramas para representar la distribución de frecuencia de la precipitación, el diagrama de cajas y bigotes (box plot) para observar los datos atípicos, también los gráficos Q-Q o Quantil-Quantil utilizados para validar el ajuste de los datos a una distribución normal. Adicionalmente, se desarrolló el método de Spearman para evaluar o medir el nivel de correlación de la variable de precipitación entre las estaciones seleccionadas.

Teniendo en cuenta la reciente investigación de Montenegro et al. (2022), en los resultados del análisis estadístico, los valores altos del coeficiente de variación se deben a que la cuenca pertenece a una región

con estacionalidad pronunciada; a la ocurrencia de eventos de precipitación extremos; a los efectos orográficos causados por la topografía de la zona y a los demás factores climáticos variables en el tiempo y en el espacio.

Por otra parte, los histogramas (ver Figuras 17, 18 y 19) proporcionan una visualización efectiva de distribución de las cantidades de precipitación, en estos gráficos se observa un claro sesgo hacia la derecha, lo que significa que los intervalos de frecuencias bajas con valores altos están ligados a la ocurrencia de eventos extremos de precipitación intensa. Como complemento de los histogramas, en el diagrama de cajas y bigotes (ver Figura 20) se observan valores que están por fuera del rango en el que se encuentra el 50% central de los datos y de la extensión de valores de precipitación dentro de un rango aceptable, lo que reconfirma la presencia de eventos extremos de precipitación relacionados con sequías y lluvias intensas.

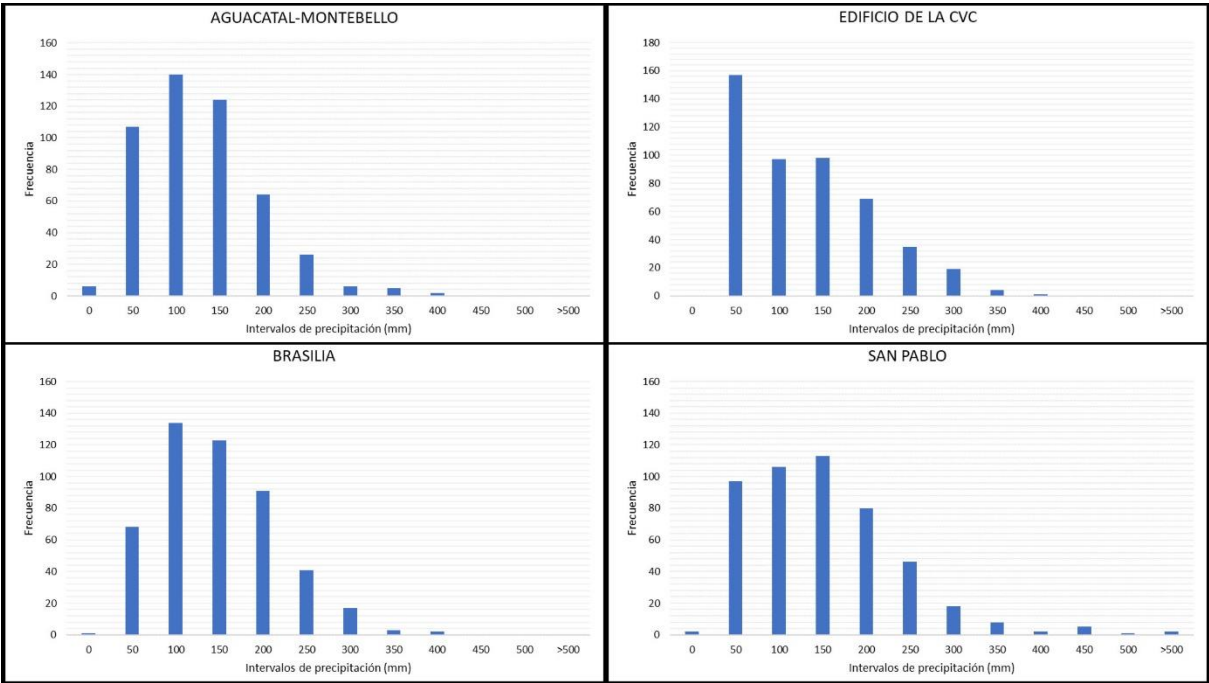


Figura 17. Histogramas de precipitación media mensual para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones Aguacatal – Montebello (AM), Edificio de la CVC (CVC), Brasilia (BRA) y San Pablo (SP).

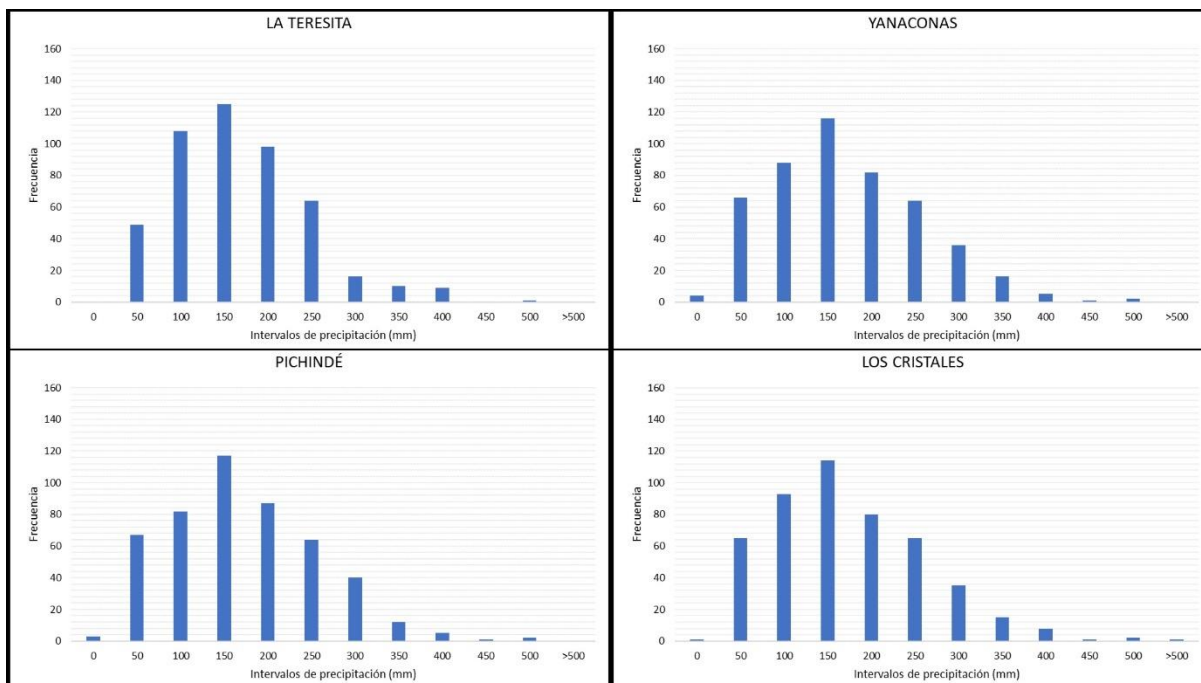


Figura 18. Histogramas de precipitación media mensual para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones La Teresita (LT), Yanaconas (YN), Pichindé (PD) y Los Cristales (LC).

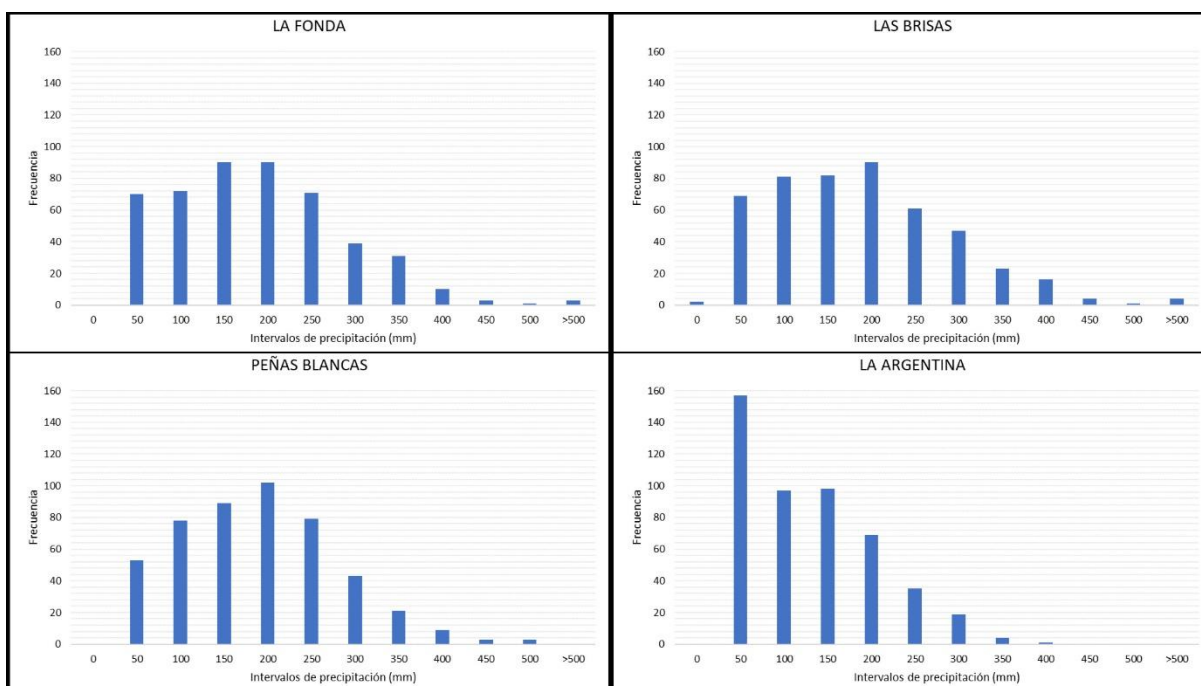


Figura 19. Histogramas de precipitación media mensual para los años comprendidos entre 1982 – 2021 de las estaciones La Fonda (LF), Las Brisas (LB), Peñas Blancas (PB) y La Argentina (LA).

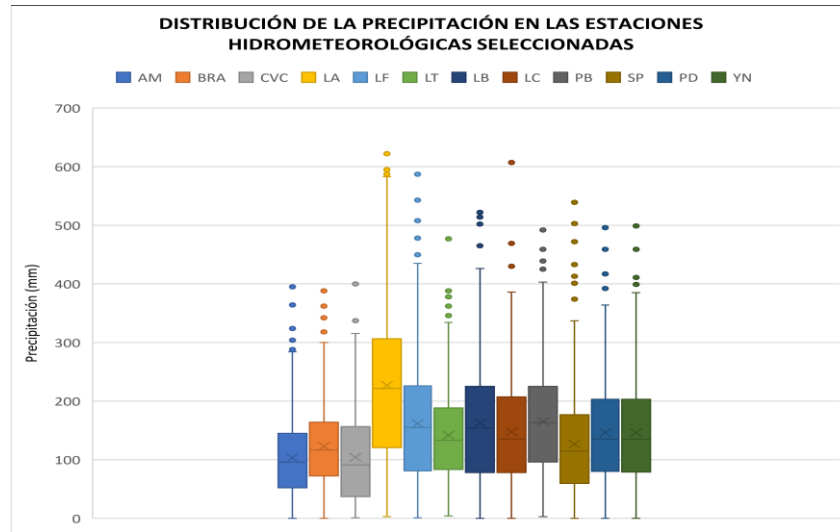


Figura 20. Boxplot de precipitación para las estaciones seleccionadas en el periodo 1982 – 2021.

Cabe aclarar que, en algunos casos la presencia de eventos extremos puede darse por errores humanos en el registro o digitación del dato, por lo que fueron validados previo a la estimación de datos faltantes con los registros de las anomalías de la temperatura representadas por índices macro climáticos como ONI, MEI y SOI, y que tienen relación con el comportamiento de la precipitación en la zona de estudio (Montenegro et al., 2022).

Complementando este análisis, los gráficos Q-Q (ver Figuras 21, 22 y 23) confirmaron que los datos observados no se ajustan a la distribución normal. Lo anterior facilitó la escogencia del método de Spearman (ver Figura 24) como evaluador de la relación entre las estaciones, pues es un método menos sensible a los valores atípicos y válido cuando los datos no cumplen con los requisitos de normalidad (Martínez et al, 2009). Los resultados de la correlación en su mayoría fueron >70%, siendo un indicador aceptable para el proceso de estimación de datos faltantes.

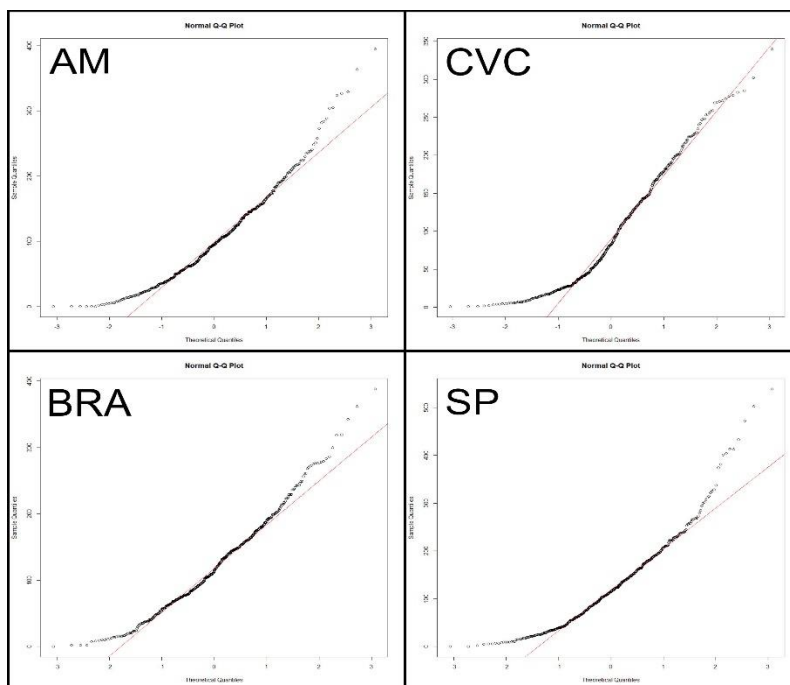


Figura 21. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones Aguacatal – Montebello (AM), Edificio de la CVC (CVC), Brasilia (BRA) y San Pablo (SP) en el periodo 1982 – 2021.

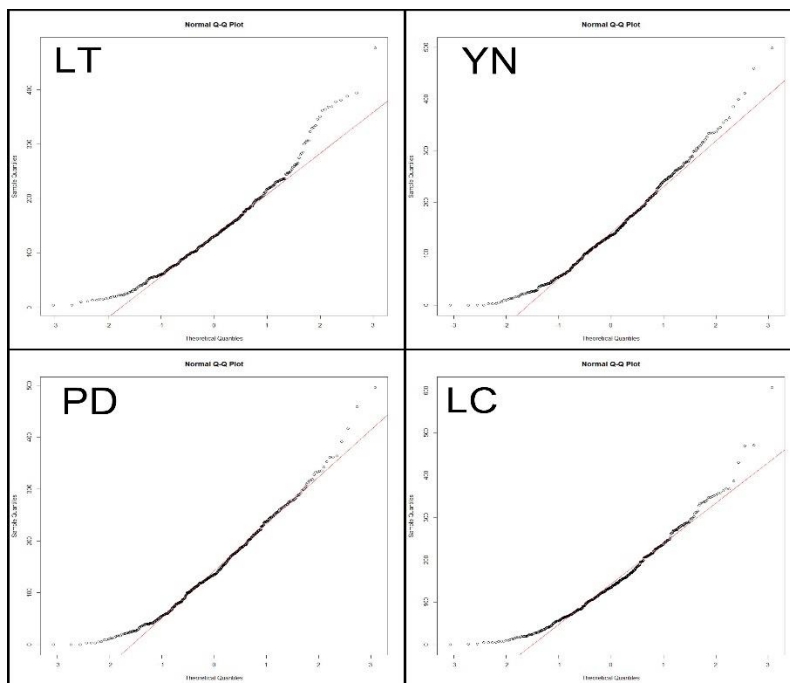


Figura 22. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones La Teresita (LT), Yanaconas (YN), Pichindé (PD) y Los Cristales (LC) en el periodo 1982 – 2021.

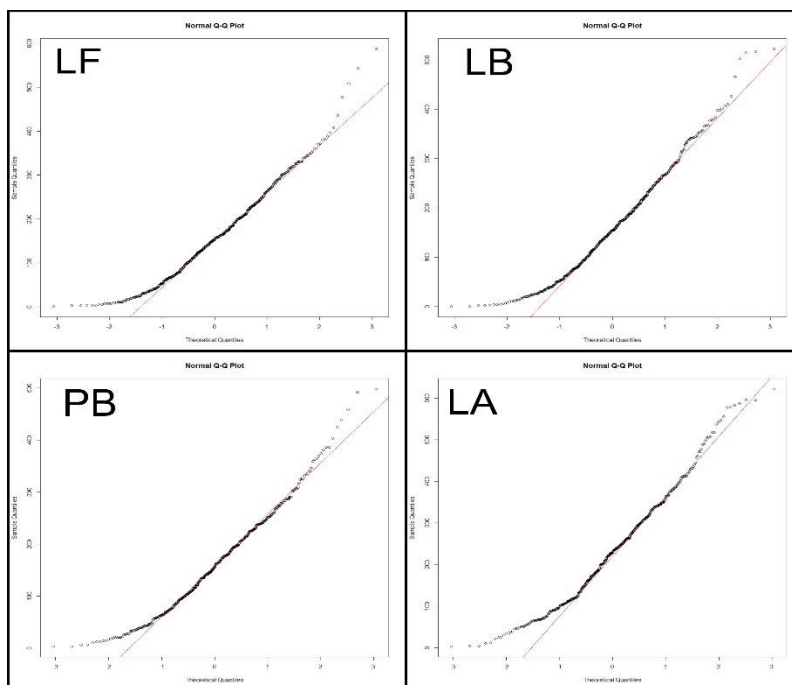


Figura 23. Gráficos Q-Q de precipitación para las estaciones La Fonda (LF), Las Brisas (LB), Peñas Blancas (PB) y La Argentina (LA) en el periodo 1982 – 2021.

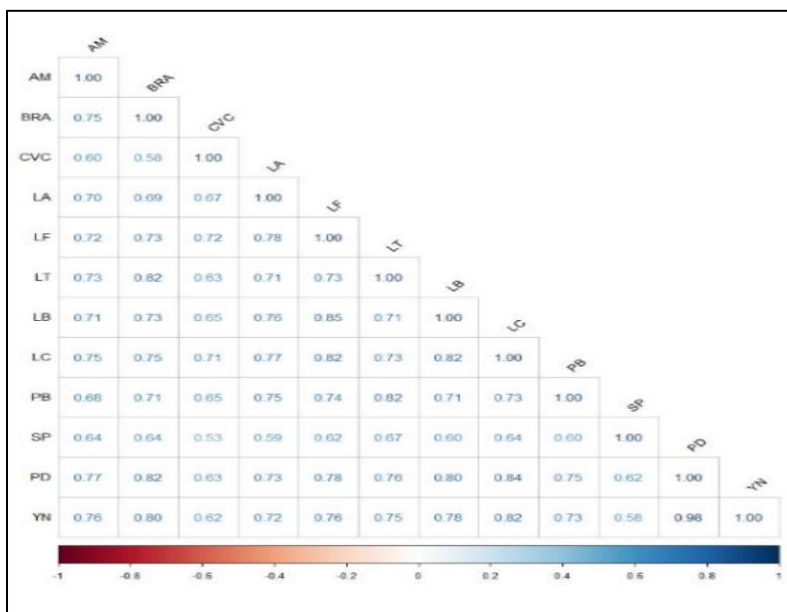


Figura 24. Resultados de correlación de Spearman para las estaciones de estudio.

Una vez realizado el correspondiente análisis estadístico a los datos de precipitación, se estimaron los datos faltantes aplicando el método IDW, consolidando una base de datos con el 100% de los registros mensuales multianuales de las lluvias desde enero de 1982 hasta diciembre de 2021 para toda la red de

estaciones utilizada en este estudio. A partir de los datos de precipitación completos, se determinó la precipitación media aplicando polígonos de Thiessen y así, lograr la estimación del caudal medio mensual en la estación Cali-Bocatoma para el mismo periodo de tiempo.

Cabe mencionar que el método RMSE evaluó la precisión y calidad de la estimación de la precipitación, arrojando como resultado del promedio de la totalidad de estimaciones un valor inferior a la unidad. En concordancia con Larrahondo & Russi (2017), un RMSE bajo en datos hidrológicos indica que la interpolación puede capturar las variaciones y patrones en los datos observados de manera efectiva ya que las estimaciones están en buena concordancia con los datos reales, lo que incrementa la confianza en la aplicación del método.

8.3. Caracterización hidrológica

8.3.1. Distribución de la precipitación

Basándose en los registros históricos de las estaciones seleccionadas se construyó la Figura 25, en la cual se puede observar la distribución espacial de la precipitación media mensual. Es evidente que la estación La Argentina tiene un promedio mensual multianual de precipitación por encima de las demás estaciones utilizadas en este estudio, sin embargo, fue utilizada debido a la escasez de registros o información en la zona alta y sur de la cuenca.

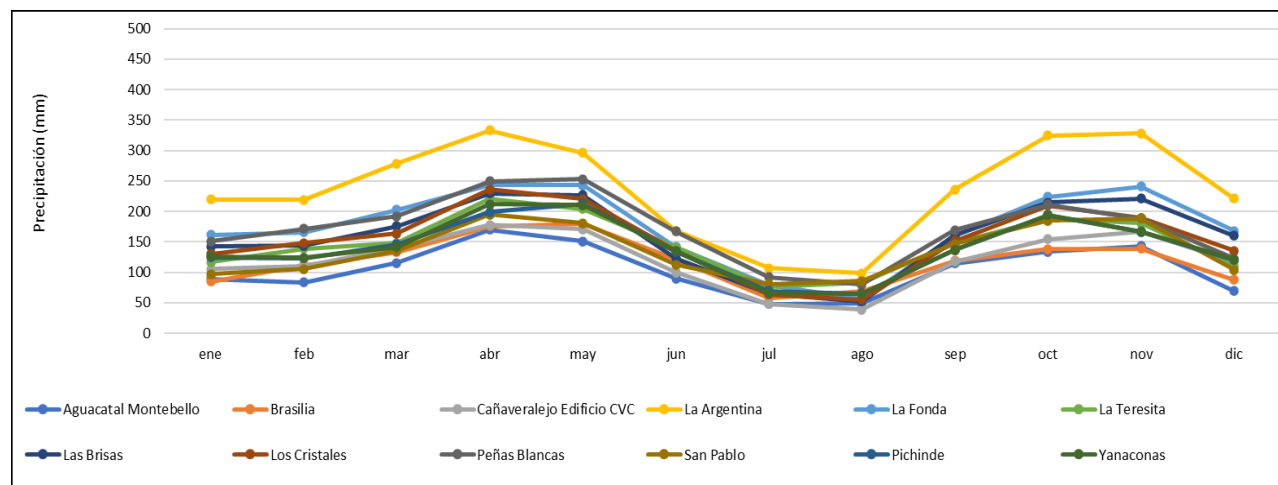


Figura 25. Promedio mensual multianual (1982 – 2021) de precipitación en las estaciones de la zona de estudio.

Considerando la influencia de los procesos orográficos y convectivos en la distribución temporal y espacial de la precipitación en la zona de estudio, Peñas Blancas (2158 msnm) presenta diferencias significativas de altitud en comparación con las estaciones Las Brisas (1228 msnm) y La Fonda (1298 msnm), pero con similares valores de precipitación anual (alrededor de 1950mm/año). Del mismo modo, La Argentina (1794 msnm), con 2721.9 mm/año, es la estación que presenta el valor total anual de precipitación más alto, contrastando con Brasilia (1864 msnm) que registra 1476.8 mm/año siendo uno de los totales anuales más bajos (ver Figura 26). Además, se observa un comportamiento decreciente de la precipitación en sentido Sur-Norte y Oeste-Este.

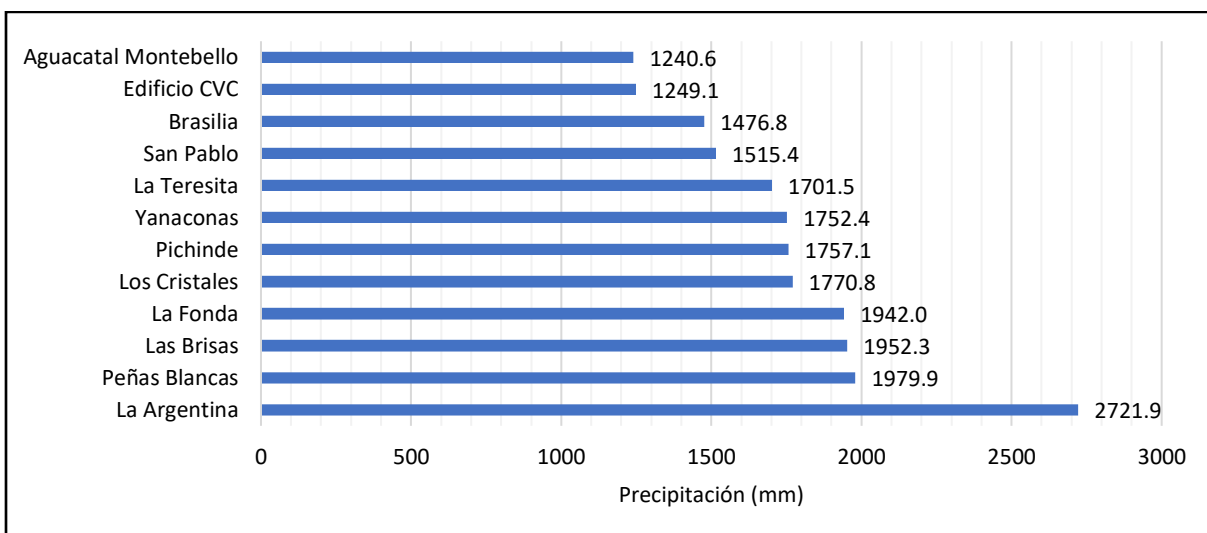


Figura 26. Precipitación anual multianual en las estaciones seleccionadas para el periodo 1982-2021.

8.3.2. Isoyetas

Las isoyetas generadas por el método IDW evidenciaron el análisis de la distribución y confirmaron el comportamiento bimodal de la precipitación (ver Figuras 27, 28 y 29).

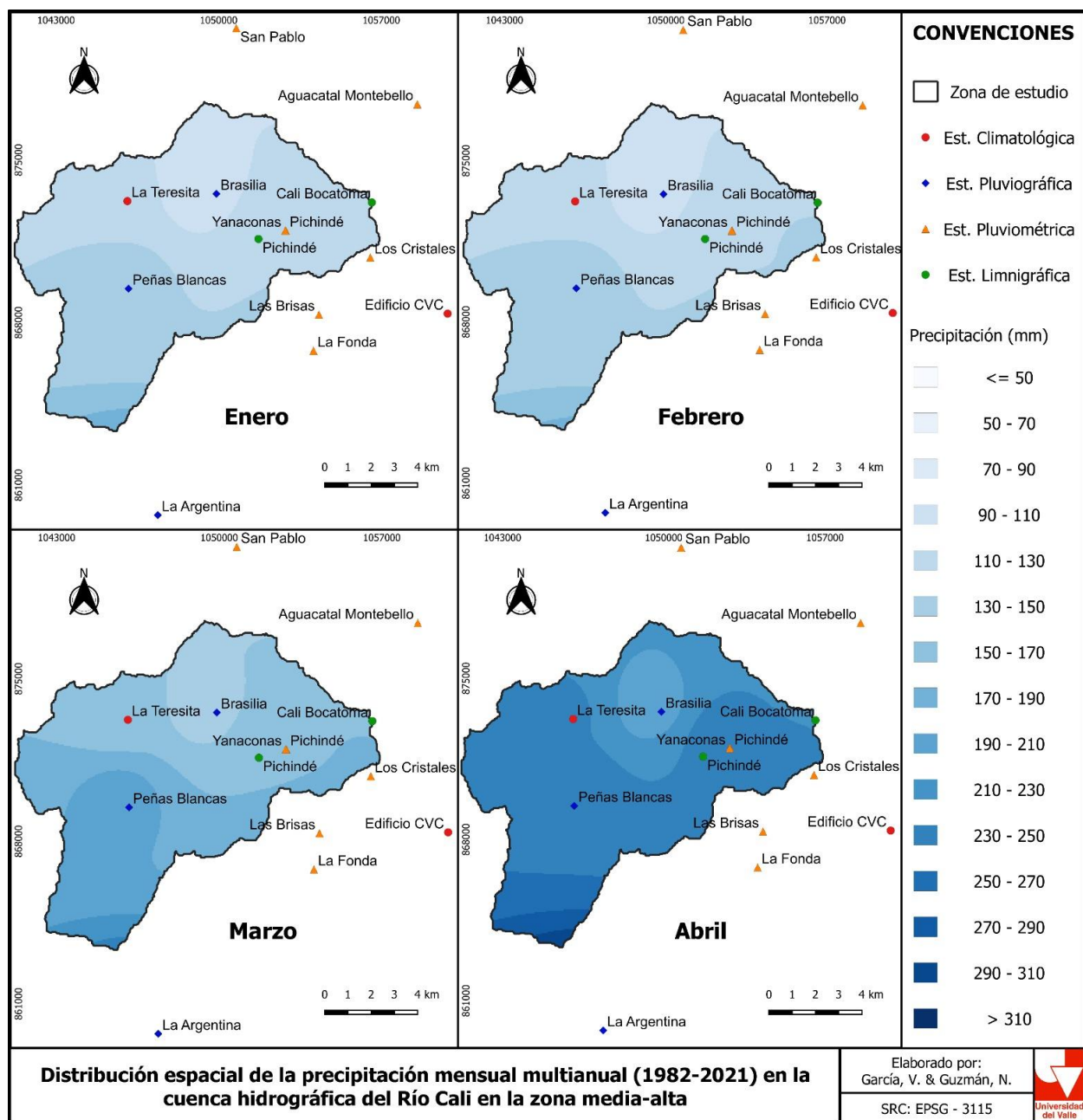


Figura 27. Isoyetas (ene-feb-mar-abr) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).

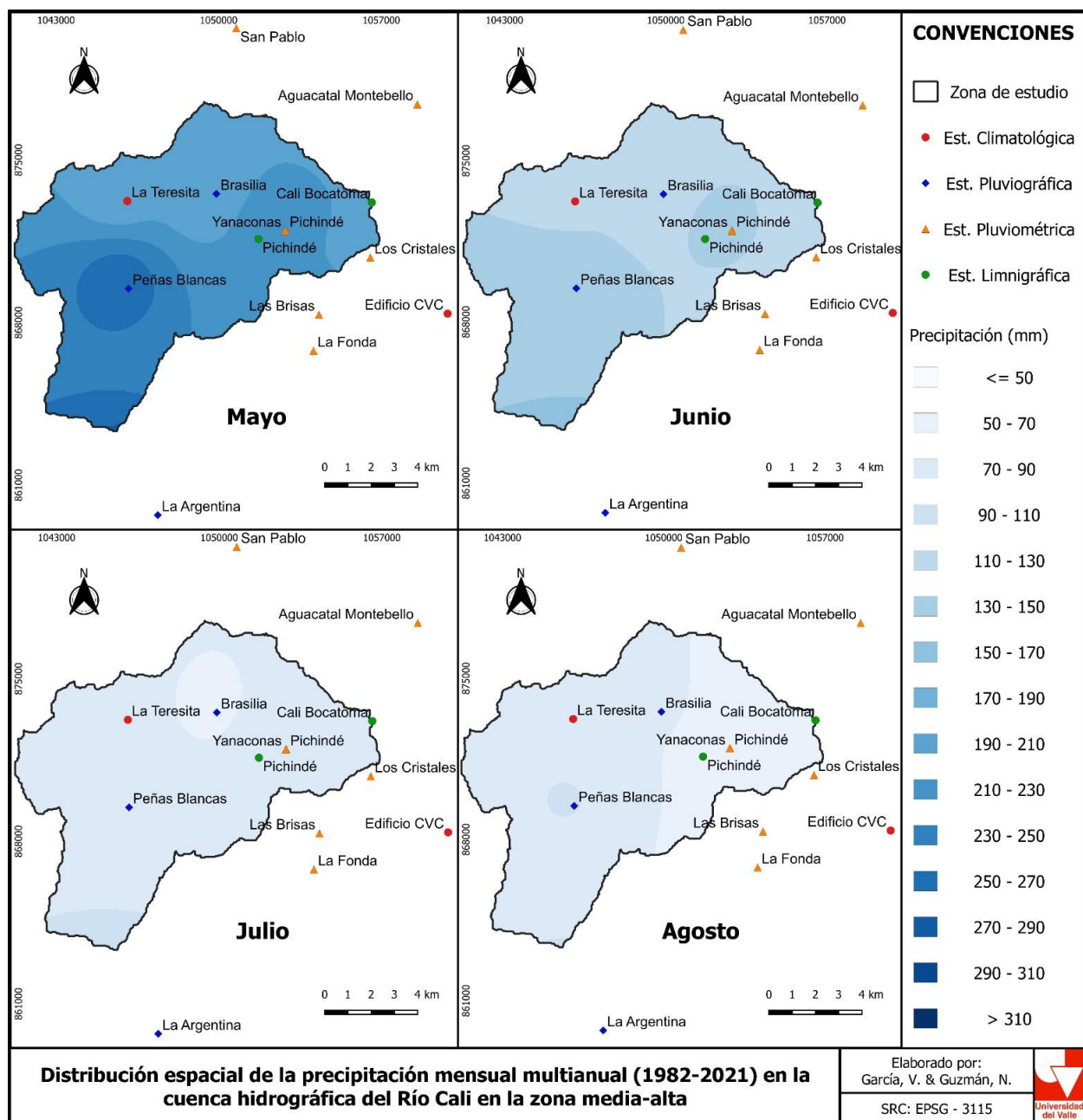


Figura 28. Isoyetas (may-jun-jul-ago) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).

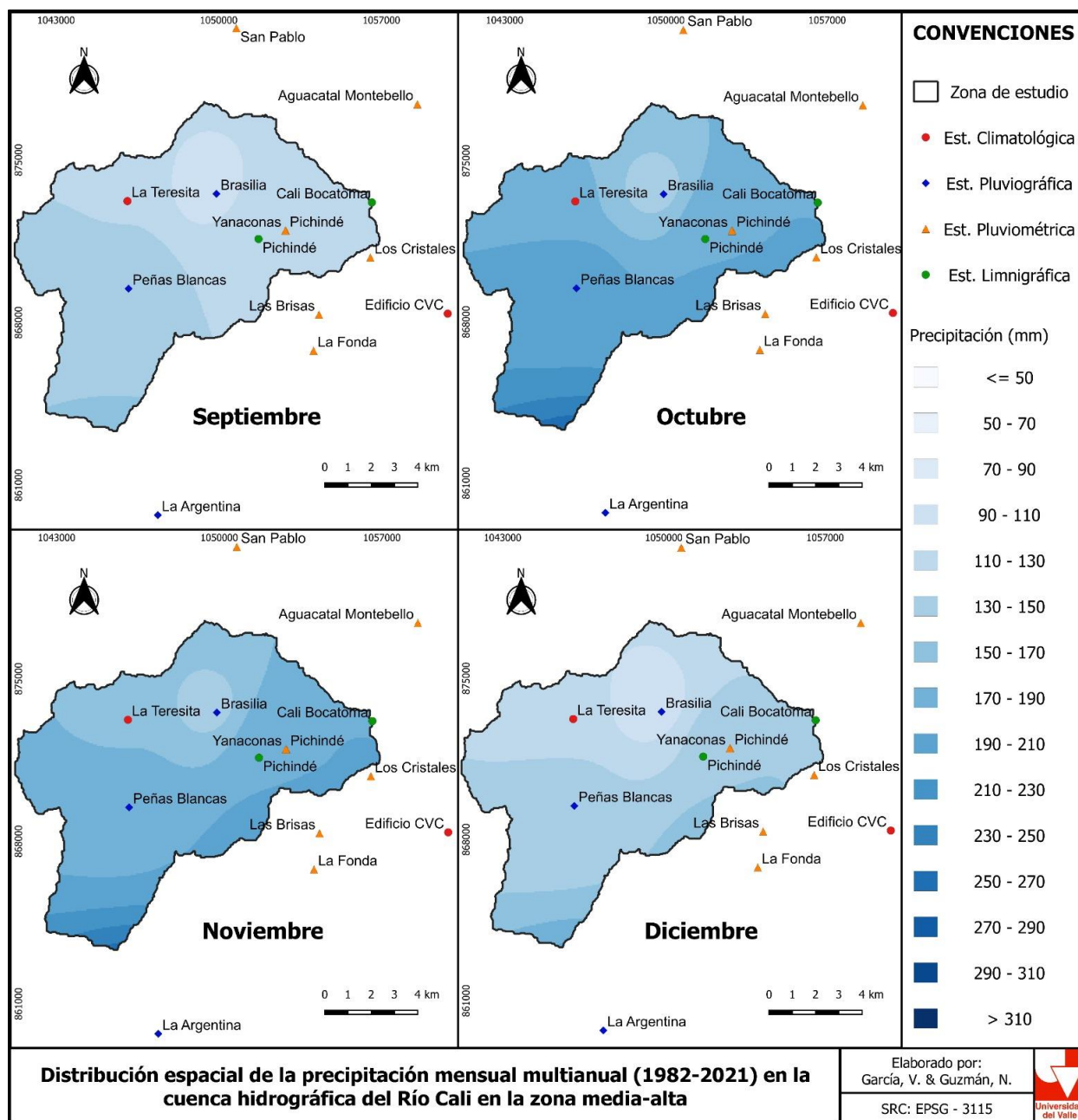


Figura 29. Isoyetas (sep-oct-nov-dic) de la precipitación mensual multianual (1982-2021).

8.3.3 Polígonos de Thiessen

Los polígonos de Thiessen (ver Figura 30) demostraron que, Peñas Blancas (PB), Brasilia (BRA) y La Teresita (LT) son las estaciones con mayor área de influencia (36.2%, 20.5% y 17.8%, respectivamente), mientras que, las estaciones con menor influencia son La Fonda (LF) y San Pablo (SP) con un porcentaje inferior a la unidad (0.3% y 0.1%, respectivamente). Conforme a lo anterior, es necesario fortalecer la red de

monitoreo mediante la instalación de estaciones hidrometeorológicas, especialmente en la zona alta de la cuenca, puesto que el inicio de la cuenca se ubica por encima de los 4000 msnm, y no se disponen de registros más allá de la elevación de la estación de Peñas Blancas. Además, la heterogeneidad espacial de los diferentes factores bióticos y abióticos en la cuenca con sólo tres estaciones abarcando más del 70% de la influencia del área, plantea desafíos para el monitoreo y análisis de variables hidroclimáticas, obstaculizando una gestión integrada eficaz de los recursos naturales.

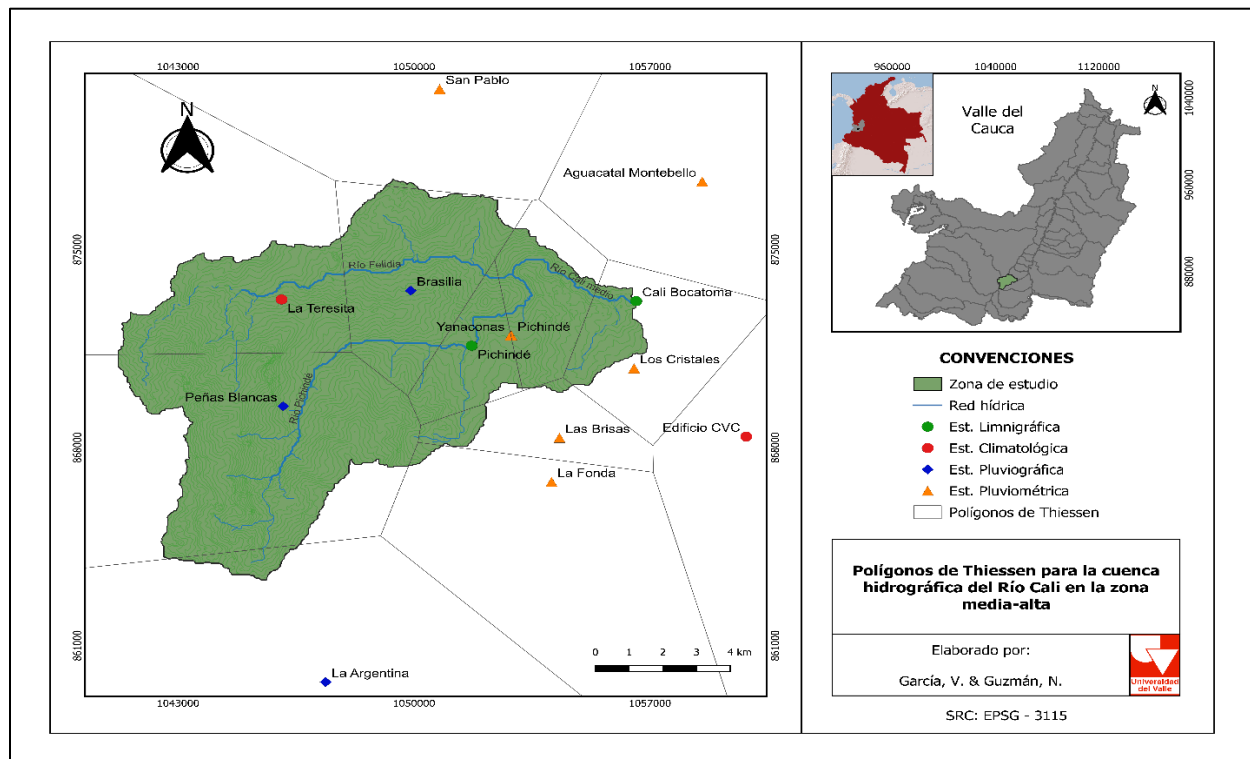


Figura 30. Polígonos de Thiessen para la red de estaciones en la zona de estudio.

En términos generales, la precipitación media ponderada con el área de influencia de las estaciones, confirman que, la zona de estudio sigue un patrón de comportamiento de régimen bimodal independientemente del periodo analizado como lo muestra la Figura 31. En esta región el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) determina el régimen bimodal de precipitación (Cadena et al., 2014). Lo anterior da lugar a que el comportamiento de la precipitación se defina en cuatro periodos,

dos de estiaje (dic-feb y jun-ago) y dos de invierno (mar-may y sept-nov) (Castro, 2022), los valores máximos se presentan en abr/may y en oct/nov, en tanto que la mínima pluviosidad se registra en jul/ago.

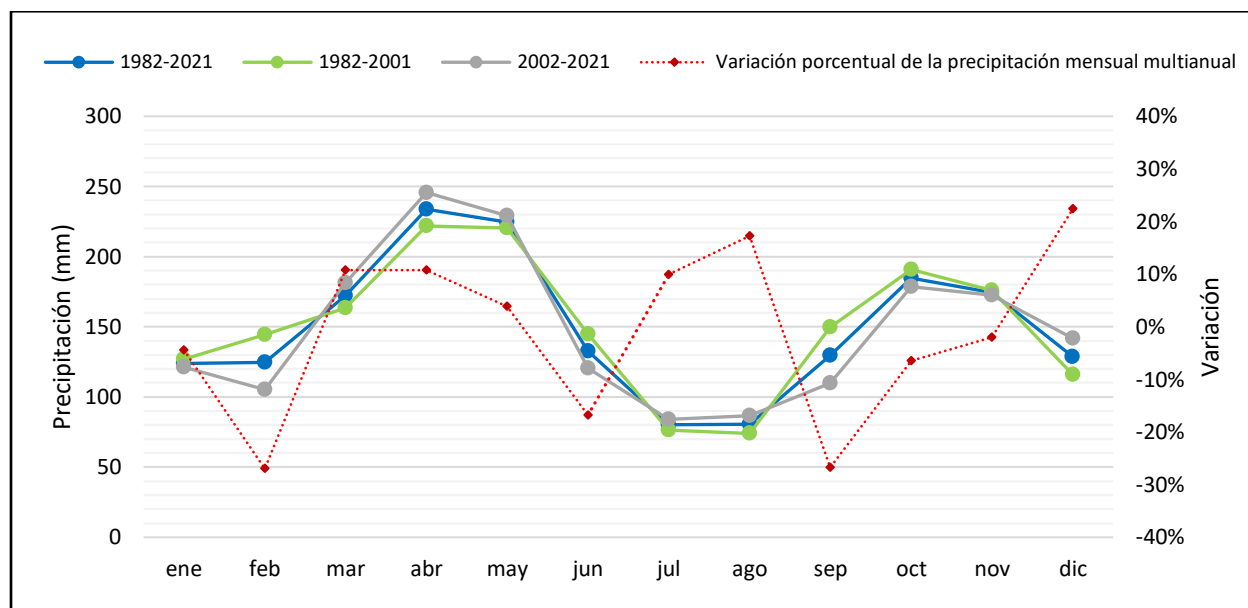


Figura 31. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual en la zona de estudio para distintos periodos de tiempo.

De acuerdo con la variación porcentual de la precipitación presentada en la figura anterior, los meses de transición como febrero, junio y septiembre presentan disminuciones hasta del 25% aproximadamente en los valores medios de precipitación, sin embargo, en el primer periodo de lluvias del año (abril y mayo) junto con los meses que normalmente son característicos por sequías y temperaturas alta (julio y agosto) se observan incrementos porcentuales entre el 5% y 18% del valor medio de las lluvias.

8.3.4. Comportamiento del caudal

A partir de los valores de precipitación media de la cuenca y los registros mensuales de caudal para la estación limnigráfica Bocatoma, se realizó una interpolación (ver Figura 32) con el fin de completar los datos faltantes de la serie comprendida entre 1982-2021 analizando el comportamiento del caudal en la zona de interés. De acuerdo con la Figura 32, se puede observar que, si bien los datos no siguen estrictamente la linealidad, en general, guardan una relación coherente entre la precipitación caída y lo escurrido por la cuenca teniendo en cuenta las condiciones geomorfológicas de la zona. No obstante, se

evidencian algunos puntos donde valores bajos de caudal corresponden a precipitaciones altas y viceversa.

Para ejemplificar lo expuesto anteriormente, se tiene el punto que registra 44.8 mm de precipitación con un caudal de 8.8 m³/s, dicho punto corresponde a junio de 1994, mes caracterizado por ser de transición hacia meses más secos dado el comportamiento bimodal de la pluviosidad en la zona, sin embargo, lo anteceden meses con altos registros de precipitación, por lo que la cuenca puede haber retenido un porcentaje de dichas lluvias y generar escurrimientos altos debido a la saturación del suelo.

A diferencia de lo anterior, se observa otro punto en el cual se presenta una alta precipitación (315.7 mm) para un caudal de 2.8 m³/s ocurrido en octubre del 2014, mes correspondiente a un periodo seco (Niño) donde un evento de excedencia de precipitación no iba a verse reflejado en los niveles del caudal sino hasta el mes siguiente donde el valor medio estuvo cerca de los 5 m³/s. De esta forma, el caudal tiende a ser más representativo del comportamiento lluvioso de los meses o el mes inmediatamente anterior. Según Castro (2022), la excedencia en la precipitación a pesar de que el caudal se categorice como deficitario, se deba probablemente por la retención de la cuenca o por el efecto localizado de la precipitación.

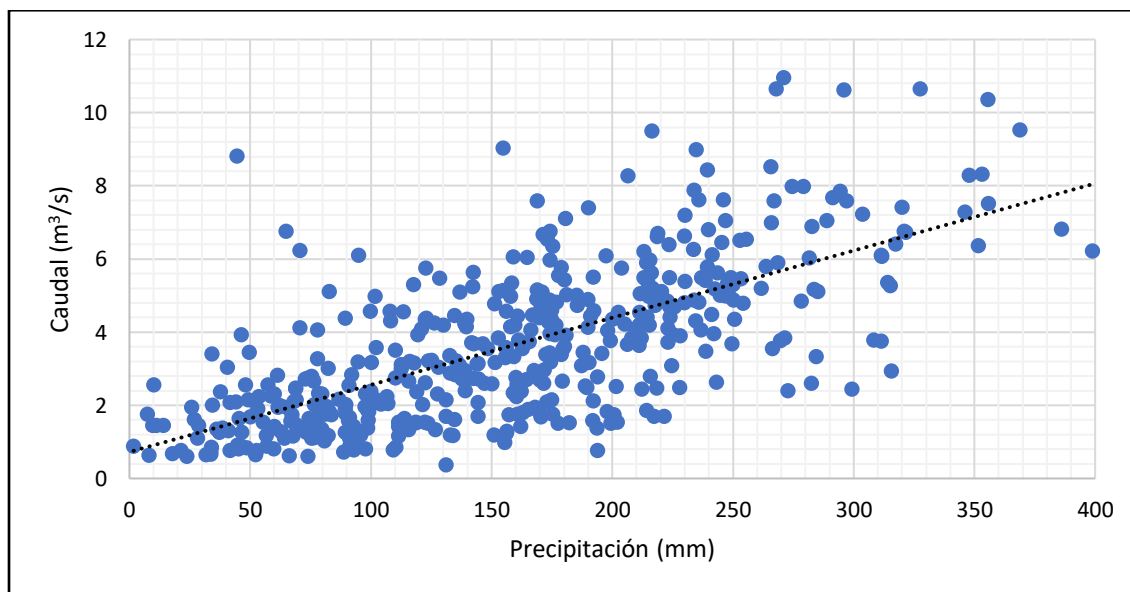


Figura 32. Interpolación lineal para estimación de datos faltantes de caudal medio mensual de la estación limnigráfica Cali – Bocatoma en el periodo 1982 – 2021.

A esto se suma la Figura 33, que evidencia un patrón de comportamiento propio del régimen bimodal en el caudal al igual que la precipitación, por lo que la principal fuente de alimentación del caudal son las lluvias y el sistema hidrológico en la zona puede responder a las variaciones en la precipitación, tomando esta última como posible indicador del comportamiento del flujo superficial.

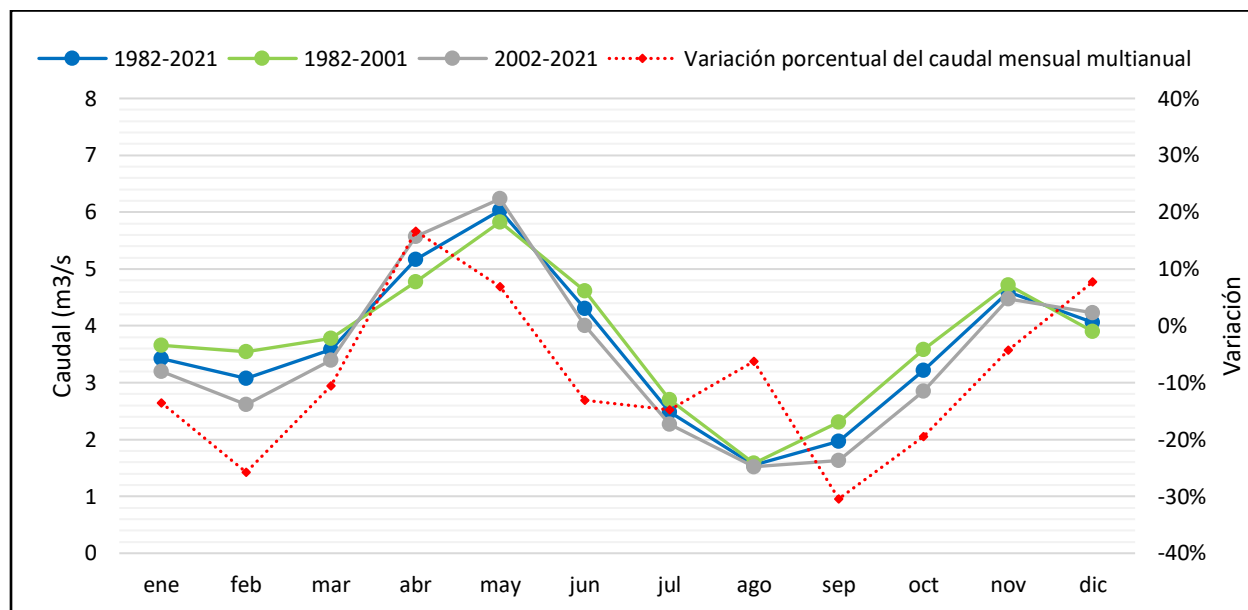


Figura 33. Comparación de la distribución temporal del caudal medio mensual en el punto de cierre de la zona de estudio para distintos periodos de tiempo.

Tal como mencionan Carvajal & Marulanda (1995), el caudal medio mensual del río Cali se compone del escurrimiento superficial propio de las lluvias del mes y del escurrimiento subsuperficial propio de las lluvias del mismo mes y de los que le anteceden, por tanto, las grandes variaciones en la precipitación de un mes se reflejan en las variaciones del caudal medio mensual de los siguientes. En contraste, al final de una época húmeda, el flujo mensual medio disminuye significativamente a medida que las reservas de agua en el suelo se agotan (Ávila et al., 2014). Considerando lo descrito por los anteriores autores, se estimó el coeficiente de escurrimiento (C) medio (ver Figura 34) para observar la relación del comportamiento de la precipitación y el caudal confirmando que, la cuenca responde con un desfase de aproximadamente un mes. Cabe aclarar que este coeficiente varía según condiciones

hidrometeorológicas y características propias del suelo, por lo que se recomienda realizar análisis más detallados en áreas específicas y obtener mayor precisión en los resultados.

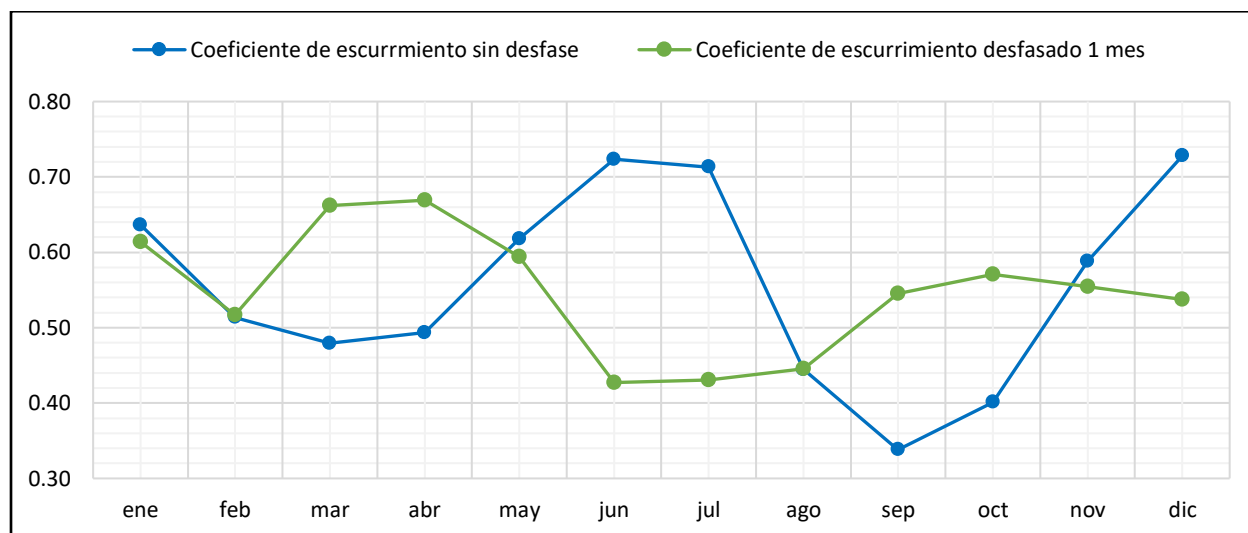


Figura 34. Estimación del coeficiente de escurrimiento medio en la zona media-alta de la cuenca del río Cali (1982-2021).

Sumando al análisis previo, a partir de los registros de caudales de la estación Bocatoma, se elaboraron las CDC (ver Figura 35) para visualizar la variación del flujo en función del porcentaje acumulado de tiempo en los dos periodos estudiados entre 1982 y finales del 2021 con el objetivo de proporcionar información esencial sobre la variabilidad temporal del caudal en el río y obtener una mejor comprensión de la dinámica hidrológica de la cuenca.

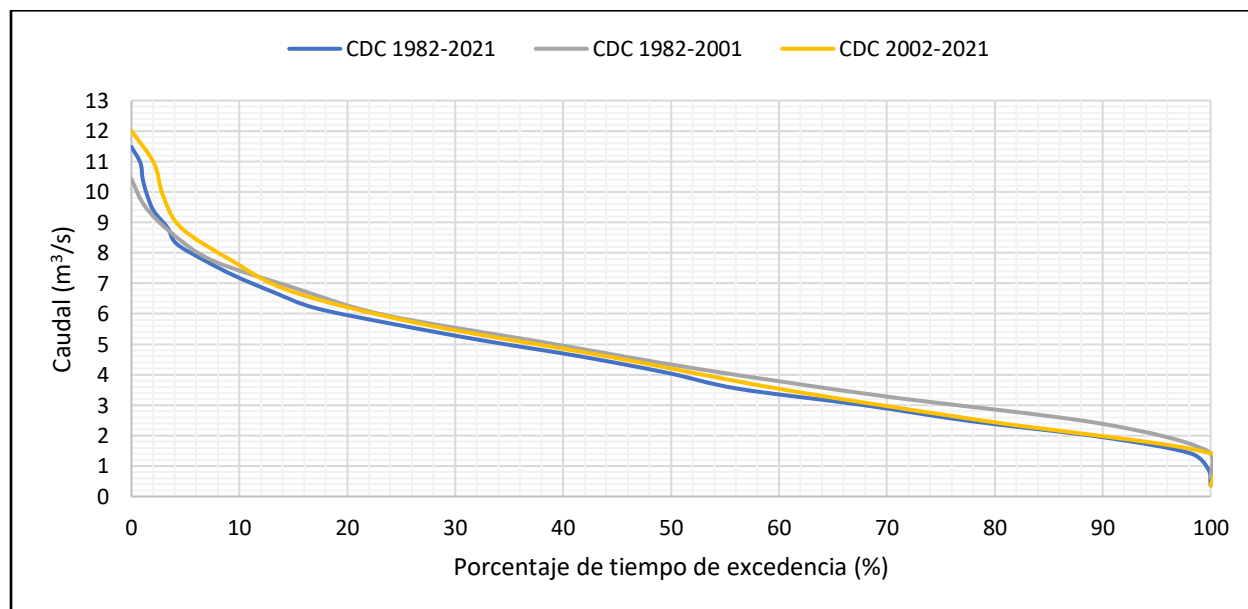


Figura 35. Comparación de la CDC para los periodos de estudio (1982-2001 y 2002-2021).

Según lo descrito por Monsalve (2004), esta representación proporciona una visión integral de la distribución de caudales; la interpretación de esta curva permite deducir algunas características propias de la cuenca hidrográfica, que, en este caso describe la poca duración de las crecientes, correspondiendo a la presencia de un río y un área pequeña de buen drenaje, lo que implica que la cuenca se encuentra en zona montañosa y puede aportar a procesos hidrológicos relacionados con la regulación hídrica.

Además, en las diferentes CDC elaboradas se notaron alteraciones en la pendiente de la curva para los dos períodos analizados. Estas alteraciones se concentran en pendientes más pronunciadas en los extremos de la curva, y que están asociadas a la fluctuación en el caudal a lo largo del tiempo, como posible resultado de diversos factores relacionados con el cambio en las condiciones climáticas, patrones estacionales y la influencia de actividades antrópicas (Álvarez et al., 2021), sin embargo, no es posible determinar con alta precisión hasta qué punto llega la influencia del clima con las actividades socioeconómicas desarrolladas en la cuenca, por lo que sería pertinente profundizar este análisis en futuros trabajos acompañado de información diaria de caudales considerando valores mínimo y máximos para obtener mayor detalle en los resultados.

8.4. Determinación de la capacidad de regulación hídrica

8.4.1. Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH)

Los datos presentados en la Tabla 7 representan el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) estimado para los dos períodos de tiempo analizados (1982-2001 y 2002-2021). Estos valores muestran una disminución en la capacidad de la cuenca media-alta del río Cali para retener y regular el agua. Sin embargo, esta capacidad se debe a la preservación de la cobertura vegetal en gran parte del área de la cuenca alta, en especial la que corresponde a zonas del Parque Nacional Natural y de protección forestal con suelos profundos y un buen drenaje (Vargas, 2019), por esta razón los valores de IRH en la cuenca del río Pichindé son mayores, pues esta zona presenta una intervención antrópica inferior, menos presión sobre los RRHH y mayor área con cobertura vegetal.

PERIODO	CH	IRH	CATEGORÍA
1982-2021	Cali (Bocatoma)	0.78	Alta
	Pichindé	0.83	Alta
1982-2001	Cali (Bocatoma)	0.80	Alta
	Pichindé	0.85	Alta
2002-2021	Cali (Bocatoma)	0.75	Moderada
	Pichindé	0.82	Alta

Tabla 7. Resultados de la estimación del IRH.

Tal como lo indica el estudio realizado por Álvarez et. al (2021), la dinámica de las coberturas de la tierra tiene relación directa con la capacidad de regulación hídrica en la cuenca hidrográfica, la cual se va desmejorando, entre otros, con la reducción significativa de coberturas boscosas. De acuerdo con Vargas (2019), hay un conjunto de actividades antrópicas observadas en la cuenca media-alta del río Cali con un impacto potencial sobre sus componentes naturales, así, de las actividades registradas en la zona, la ganadería extensiva y la agricultura en sitios inadecuados son las de mayor aporte potencial a la pérdida de área natural.

8.4.2. Balance hídrico

Con el fin de ampliar el análisis del comportamiento de la regulación hídrica, la Tabla 8 y la Figura 36 representan la variación de la cantidad de agua almacenada en el sistema hidrológico durante el período estudiado. En el balance hídrico desarrollado se observa un cambio estacional, pues el almacenamiento aumenta durante la temporada de lluvias (recarga) y disminuye durante la temporada seca (descarga).

BALANCE HIDRICO												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP media (mm)	124.0	124.7	172.3	233.7	224.8	132.7	80.2	80.4	129.7	184.7	174.2	128.7
Q medio (mm)	78.9	64.1	82.6	115.3	138.9	96.0	57.2	35.7	43.8	74.0	102.5	93.6
ETo (mm)	62.7	56.9	63.5	63.6	64.9	63.3	64.7	65.3	61.9	62.8	59.5	62.5
ΔA (mm)	-17.6	3.8	26.3	54.9	21.0	-26.5	-41.7	-20.7	24.0	47.9	12.3	-27.5

Tabla 8. Balance hídrico en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali (1982-2021).

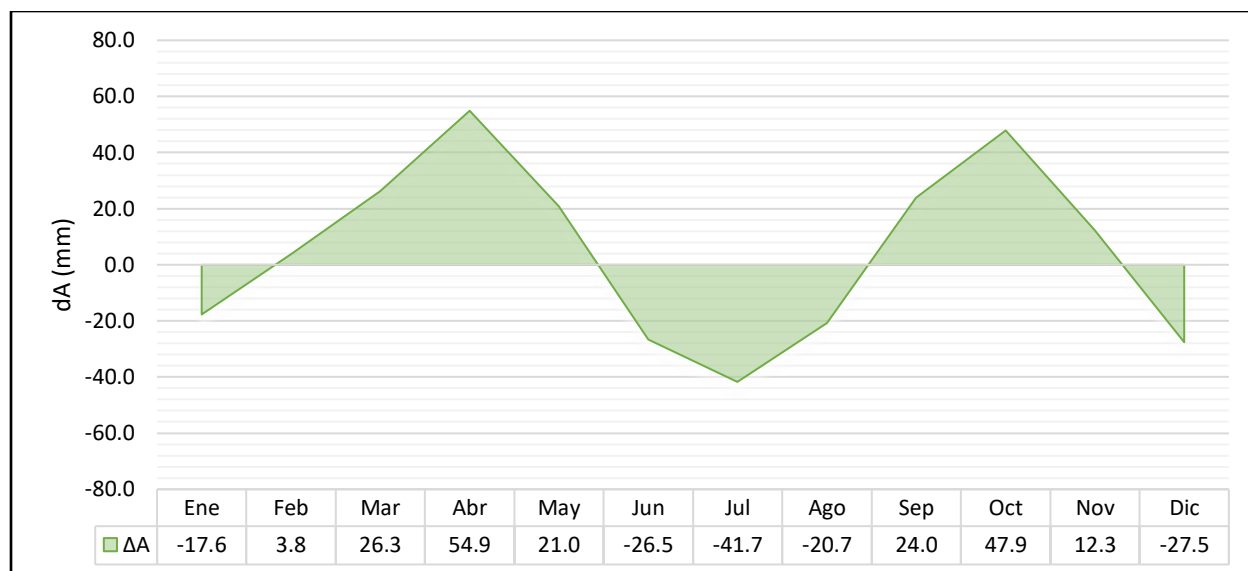


Figura 36. Cambio de almacenamiento en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali (1982-2021).

Conforme con los resultados obtenidos en la determinación del régimen de almacenamiento, el área de interés presenta dos periodos de recarga y dos de descarga y están ligados al comportamiento bimodal de precipitación en la cuenca. Los periodos de recarga son de magnitud similar y sustancialmente mayores que los periodos de descarga lo que genera un remanente aproximado de $6.5 \times 10^6 \text{m}^3$ (no se consideró las entradas por lluvia horizontal, es decir, neblina) y conforme al análisis desarrollado por Carvajal & Montoya (1998), la cuenca no presenta un desabastecimiento absoluto del recurso hídrico a lo largo del tiempo a causa de su capacidad de retención y regulación hídrica, pues el bajo aporte al caudal en periodos de sequía es compensado por el suministro de la reserva almacenada durante los periodos de invierno.

8.5. Análisis del comportamiento de las variables hidrometeorológicas bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad Climática

El análisis del comportamiento de la temperatura en la zona media-alta de la cuenca a partir de los registros históricos de la estación La Teresita marca una tendencia hacia el incremento en el valor medio (3%) a lo largo de los 40 años de estudio (ver Figura 37) presentando mayor cantidad de anomalías por encima de la media en los últimos 20 años (ver Figura 38). Este comportamiento tiene relación con el

patrón de aumento sostenido de las temperaturas en la región y en el mundo; según el sexto informe de evaluación del IPCC (2022) y el último informe sobre el CC (IPCC, 2023), se espera un aumento de temperatura a nivel global que varía de 1.5 a 4°C, dependiendo de la Trayectoria de Concentración Representativa (RCP) utilizada. Estas trayectorias, que van desde RCP 2.6 hasta RCP 8.5, están vinculadas directamente con el nivel de forzamiento radiativo y tienen implicaciones directas en la magnitud de los impactos esperados.

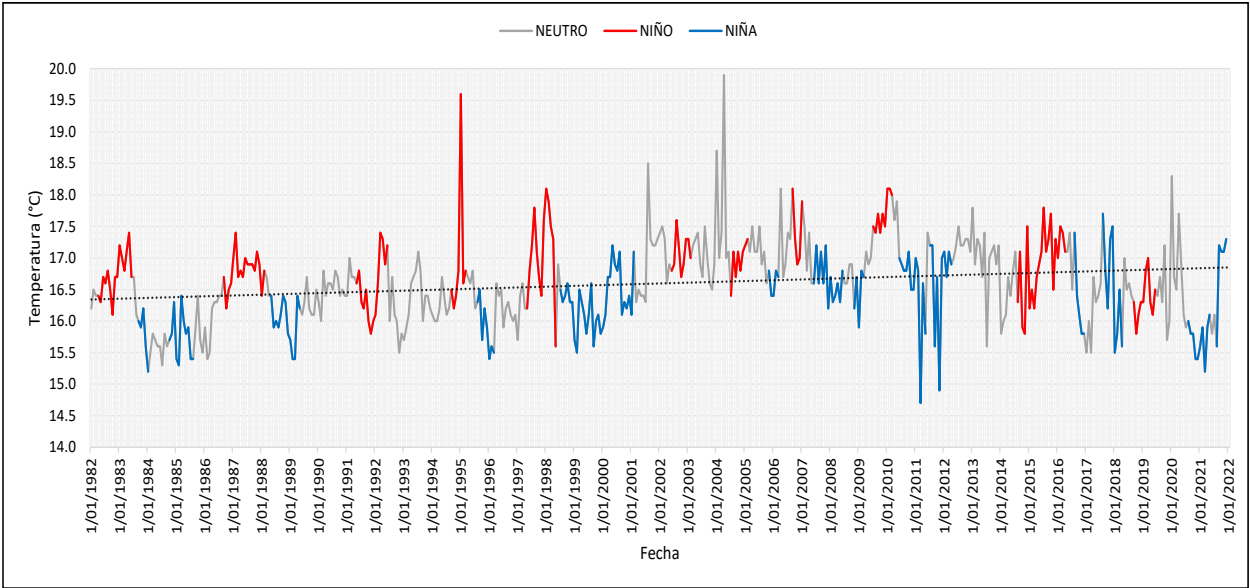


Figura 37. Comportamiento de la temperatura media mensual en la estación La Teresita (1982-2021).

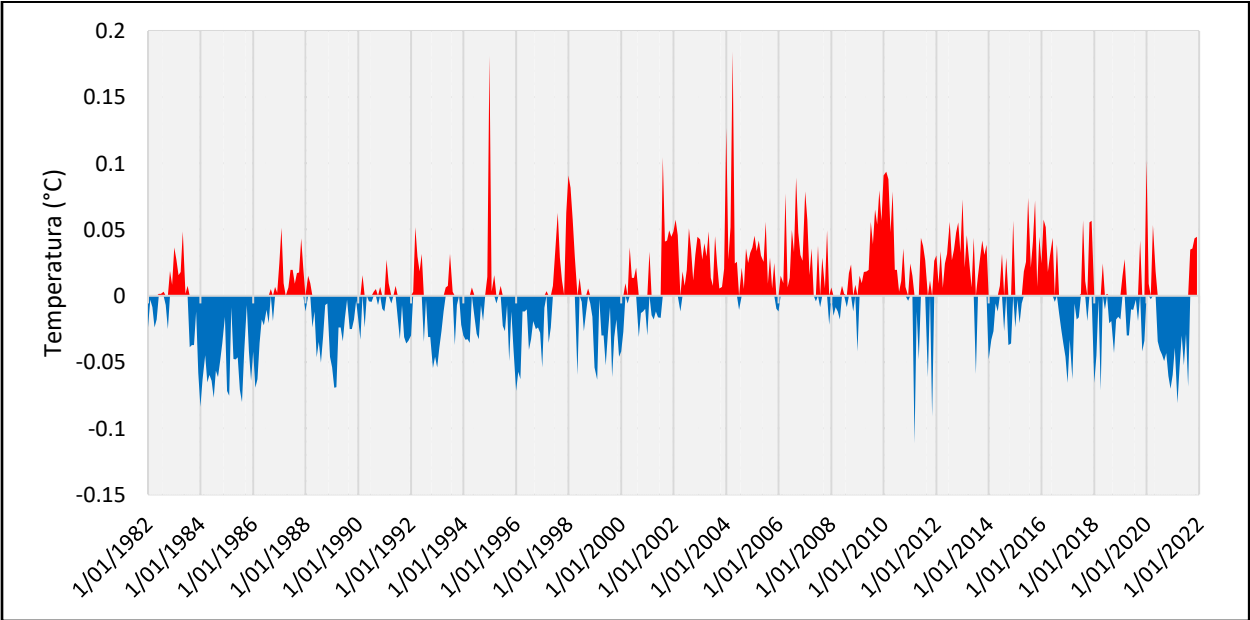


Figura 38. Anomalías de temperatura media en la estación La Teresita (1982-2021).

Considerando las adaptaciones de las proyecciones del IPCC realizadas por el IDEAM, CVC y CIAT a nivel regional y local, se obtuvo como resultado la Figura 39 partiendo de los valores medios de temperatura obtenidos en este estudio, en ella se pueden observar incrementos notorios a partir del 2041 viéndose afectadas las principales zonas de recarga.

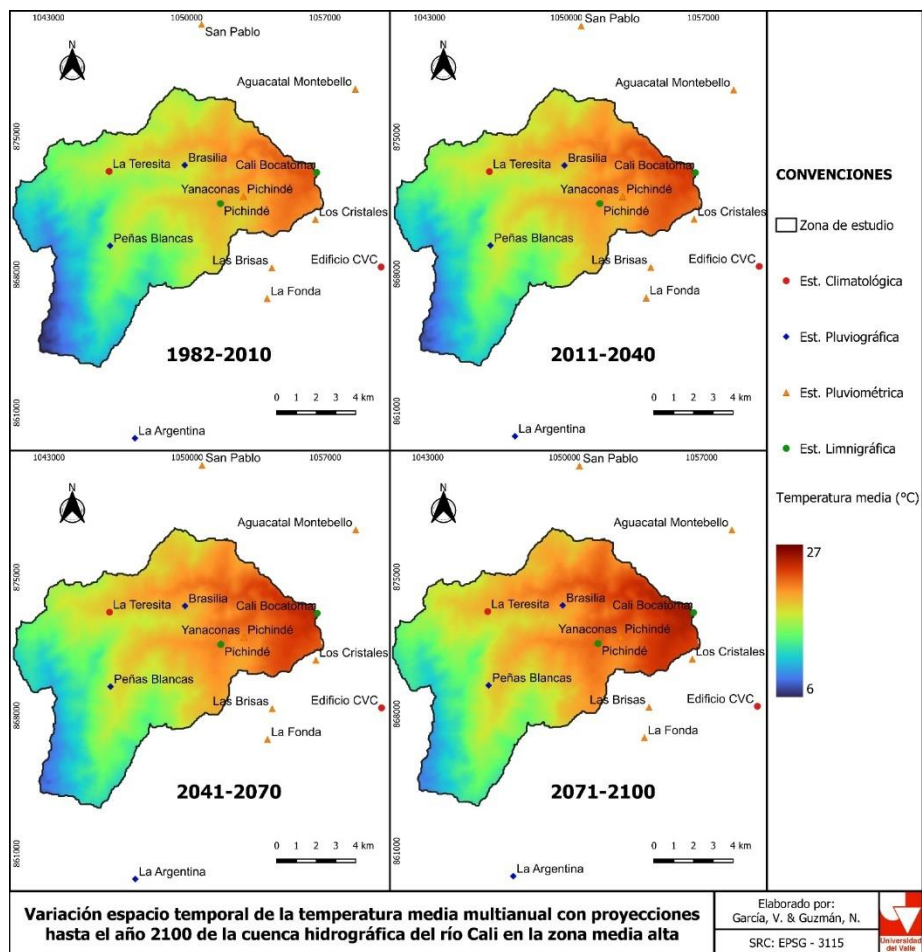


Figura 39. Cambios de la temperatura media en la zona de estudio de acuerdo con proyecciones de cambio climático por el IDEAM.

El calentamiento global puede intensificar el ciclo del agua en la atmósfera al generar temperaturas más altas, lo que conduce a una mayor evaporación del agua de la superficie terrestre (ver Figura 40), esta agua evaporada se transforma en nubes y eventualmente puede caer como lluvia (Díaz, 2012). En el caso específico de la zona de estudio, los modelos climáticos sugieren que, debido al CC, algunas áreas tropicales podrían experimentar lluvias más intensas y frecuentes. En conformidad con los escenarios de

CC para el periodo 2011-2040, los cambios en la precipitación serán alrededor del 10% mayores que en el periodo de referencia en la zona media-alta de la cuenca hidrográfica del río Cali (CVC et al., 2020).

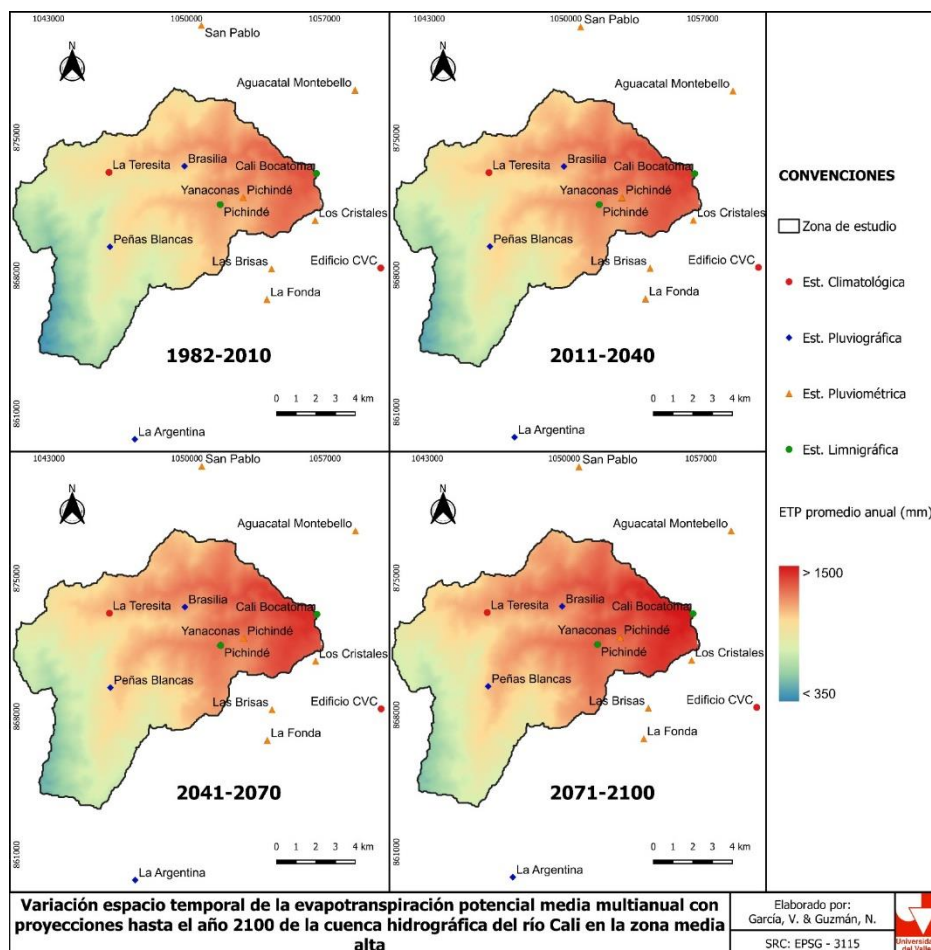


Figura 40. Incremento de la evapotranspiración potencial media anual a partir de las proyecciones de cambio climático por el IDEAM.

El CC puede influir en ciertos aspectos de la VC al alterar los patrones climáticos normales y aumentar la frecuencia e intensidad de eventos extremos (IDEAM, 2018). A escala interanual, el fenómeno ENOS (El Niño y la Niña) es la causa de la mayor señal de VC en la franja tropical del Océano Pacífico (IDEAM, 2014), puesto que la correlación moderada de los índices macro climáticos con el comportamiento de la precipitación y el caudal en la zona de estudio se encuentran entre el 29% y 38% para los índices ONI y MEI (ver Tabla 9), lo que significa que la VC puede estar en la capacidad de generar alteraciones en la magnitud y respuesta de los componentes del ciclo hidrológico (Ávila et al., 2014).

Indicador	Temperatura media	Precipitación media	Caudal medio
ONI	0.41	-0.29	-0.38
MEI	0.32	-0.29	-0.38
SOI	-0.26	0.25	0.35

Tabla 9. Correlación de indicadores macroclimáticos.

Considerando que durante los registros se presentaron variaciones importantes en las precipitaciones y caudales con incrementos que no están bajo fases de La Niña y déficits por fuera de periodos de El Niño, se optó por la construcción de gráficos que representen las anomalías de las lluvias (ver Figura 41) y el flujo superficial (ver Figura 42), dado que, a pesar de haber relación entre las variables hidrológicas estudiadas con algunos índices macro climáticos, hay que tener en cuenta que el 70% restante de la correlación con la variabilidad no permite ser explicado por estos índices y puede estar influenciado por otros factores climáticos o ambientales e incluso, pueden ser atribuibles a intervenciones antrópicas directas como en el caso del caudal, donde las anomalías por debajo de la media cada vez resaltan más y las anomalías positivas disminuyen con el paso del tiempo, mientras que las de precipitación no presentan, de manera general, alteraciones tan marcadas.

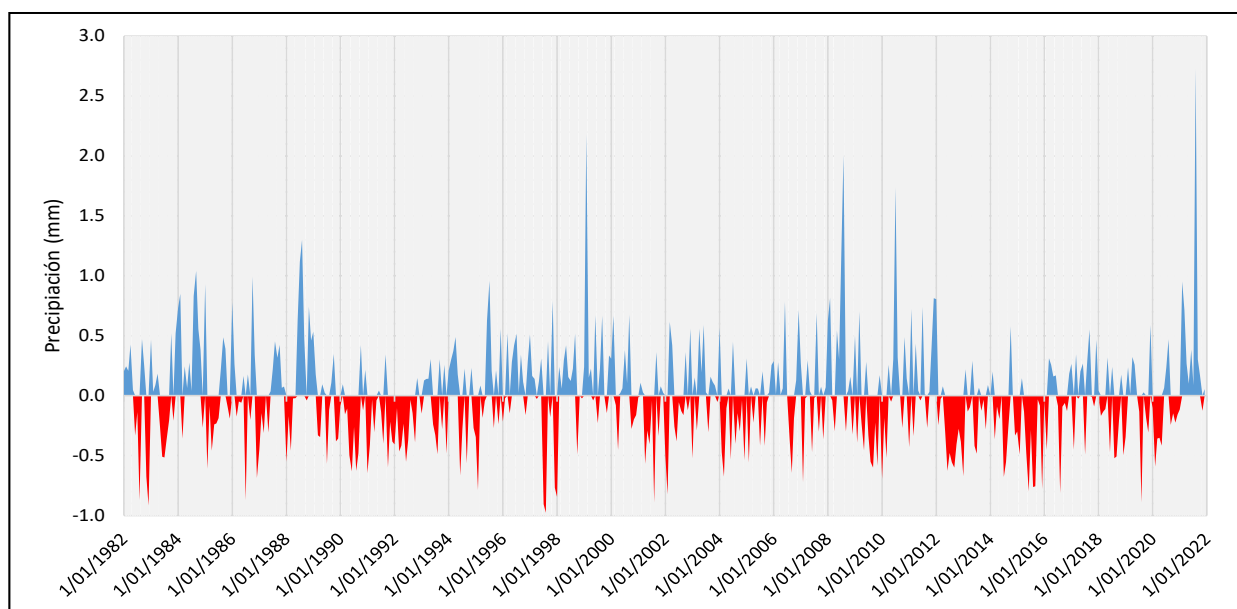


Figura 41. Anomalías de precipitación media mensual en la cuenca media-alta del río Cali (1982-2021).

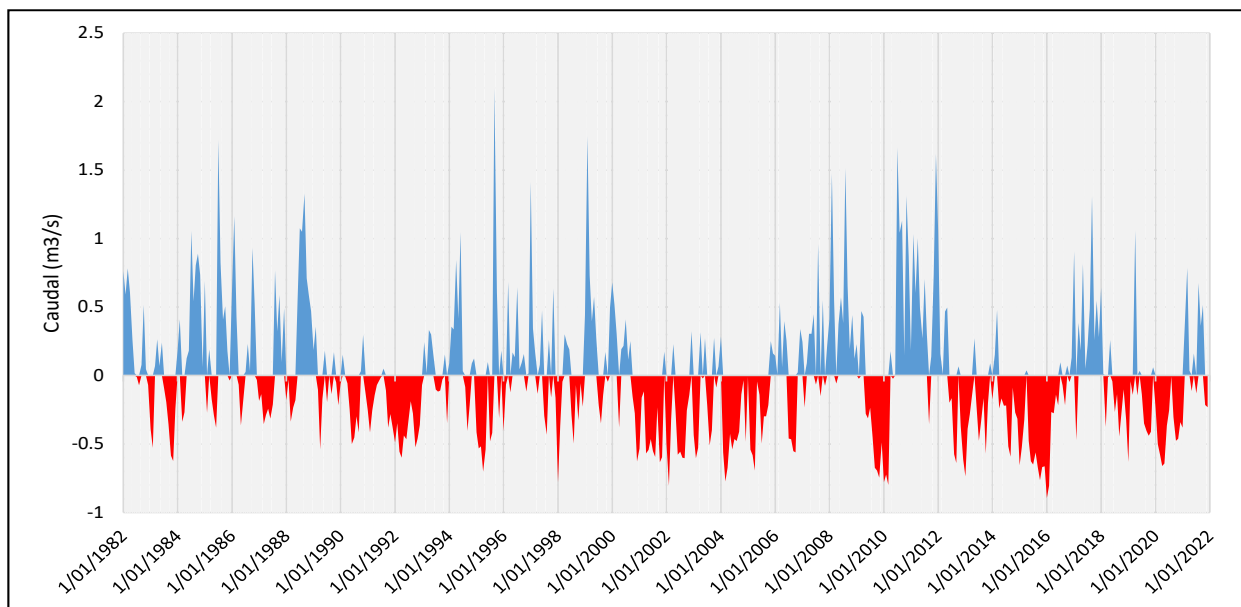


Figura 42. Anomalías de caudal medio mensual en la estación Bocatoma sobre el río Cali (1982-2021).

En adición a lo previamente expresado, se realizaron comparaciones entre los patrones que siguen El Niño (Figura 43) y La Niña (Figura 44) durante los dos periodos de tiempo seleccionados (1982-2001 y 2002-2021) y se encontró que, a pesar de que los regímenes de lluvia sobre la cuenca del río Cali a lo largo de todos los años estudiados se comportan de igual manera, la influencia que tiene la presencia del ENOS en la zona de estudio es evidente y se generan variaciones más extremas en las variables macroclimáticas en las fases de El Niño que en las de La Niña (Figura 45).

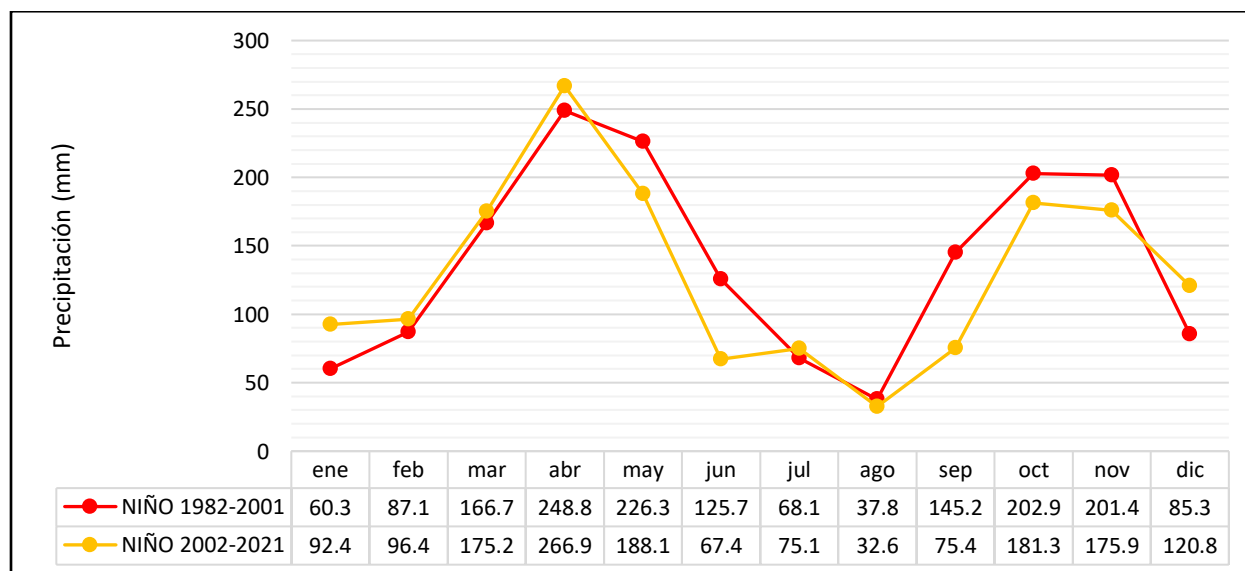


Figura 43. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual bajo escenarios de El Niño (1982-2021).

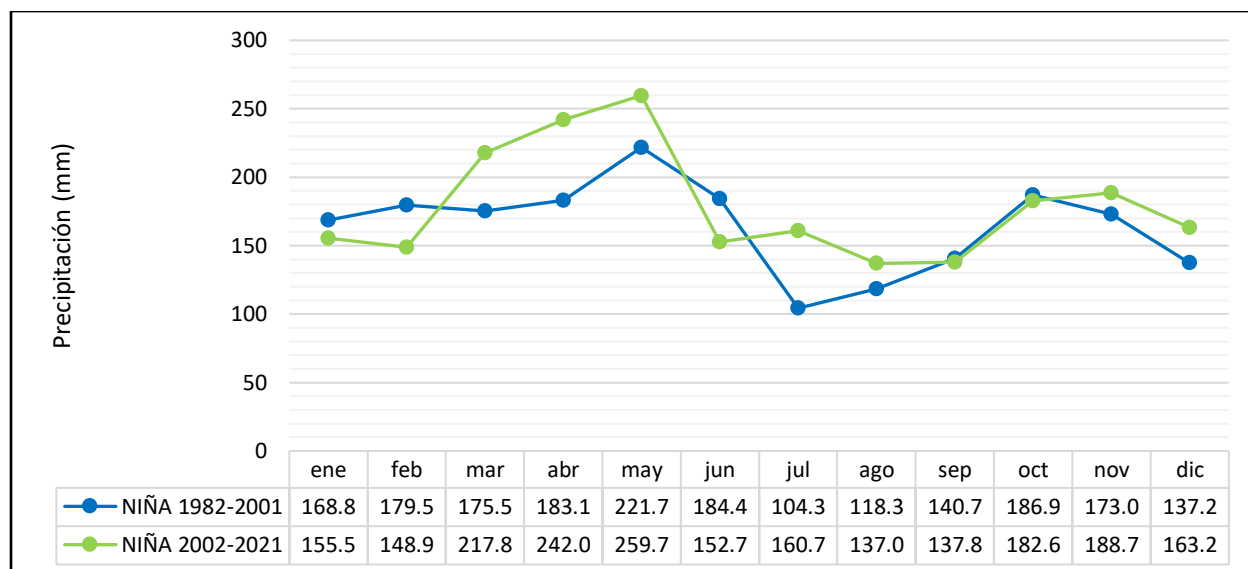


Figura 44. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual bajo escenarios de La Niña (1982-2021).

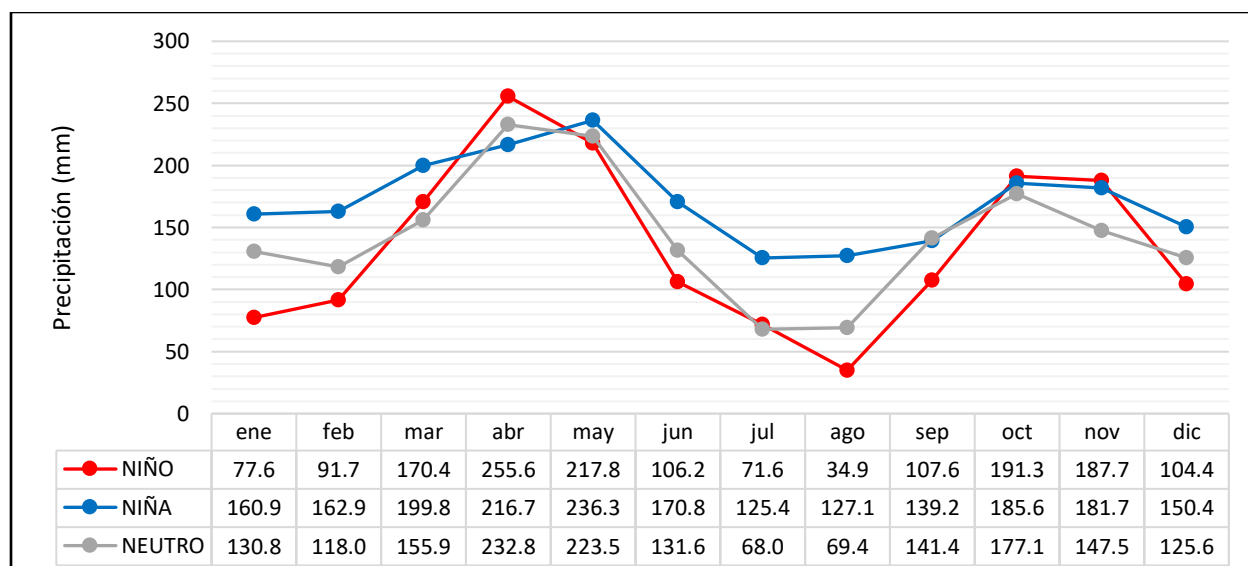


Figura 45. Comparación de la distribución temporal de la precipitación media mensual (1982-2021) bajo series del fenómeno ENOS.

En las anteriores figuras se observa que en el segundo periodo de tiempo estudiado (2002-2021) hay mayor volumen precipitado en los meses típicamente lluviosos y de sequía en cuanto a la ocurrencia del fenómeno de la Niña, por otro lado, bajo escenarios del Niño, se hacen más notorios o marcados los extremos, pues el contraste entre los meses lluviosos y secos es mucho más amplio.

El comportamiento de la precipitación (ver Figura 46), muestra estabilidad en el valor medio a lo largo del periodo estudiado, pues no ha disminuido más del 5% en su valor medio. De acuerdo con Montenegro et.

al (2022), hay periodos donde la lámina de precipitación de la cuenca tiende a disminuir, presentándose periodos marcados y/o prolongados relacionados con sequías que pueden ocasionar efectos negativos en la agricultura, degradación de los suelos, riesgo de incendios forestales que afectan la biodiversidad, disminución de caudales, entre otros. Por su parte, hay periodos donde son protagonistas las lluvias fuertes y prolongadas que pueden traer efectos tanto beneficiosos como desafiantes, ya que puede ser positivo para agricultores y recarga de RRHH, pero también existe la posibilidad de desencadenar movimientos de masa e inundaciones provocando daños a las poblaciones aledañas e infraestructura incrementando los índices de vulnerabilidad y disminuyendo la capacidad de reacción de los organismos de gestión del riesgo.

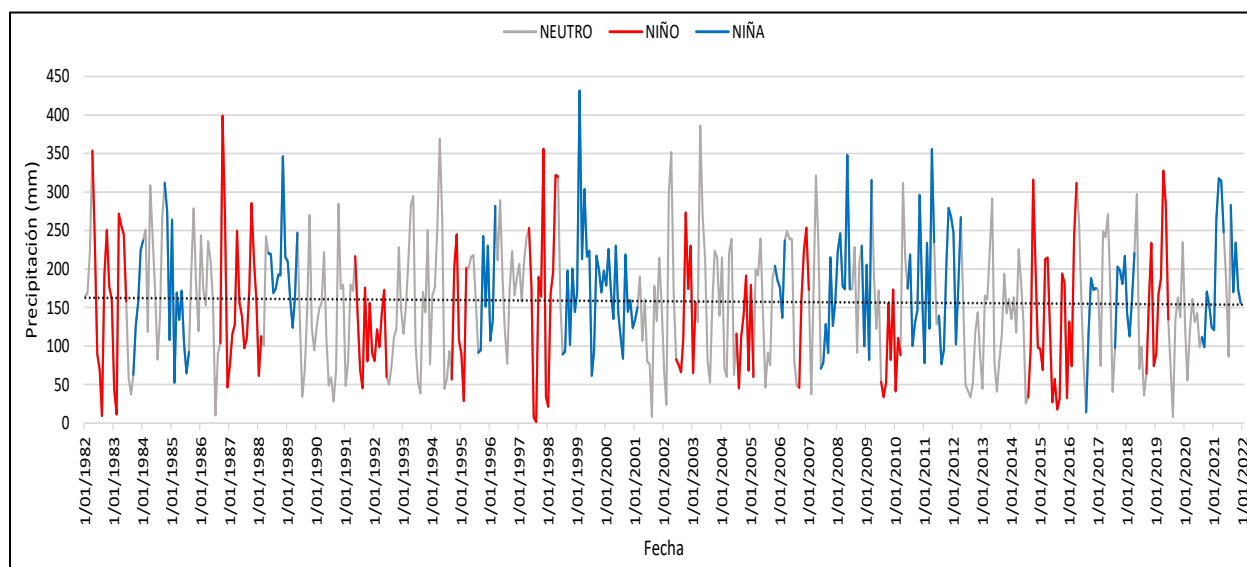


Figura 46. Comportamiento de la precipitación media mensual en la cuenca media-alta del río Cali (1982-2021).

De esta manera, las fluctuaciones estacionales de temperatura y precipitación (en conjunto con alteraciones en las coberturas naturales) han afectado el flujo medio de agua en la zona de estudio con una disminución de alrededor del 15% en su valor. La Figura 47 ilustra la tendencia del caudal medio mensual multianual y la influencia de eventos del fenómeno ENOS, presentando picos más pronunciados durante las últimas dos décadas que alcanzan valores máximos y mínimo históricos y reduciendo los periodos de neutralidad.

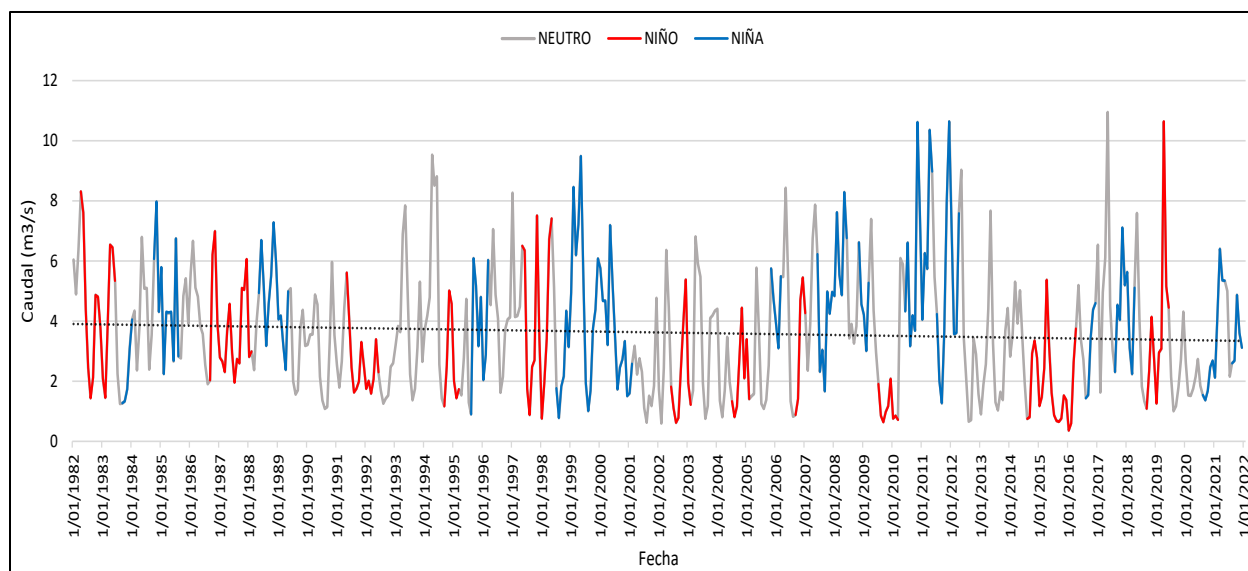


Figura 47. Comportamiento del caudal medio mensual. Estación Bocatoma (1982-2021).

Siguiendo la línea de lo expuesto anteriormente, el IDEAM (2012) señala que se ha reportado el incremento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos extremos de VC y que los efectos de El Niño y La Niña sobre los caudales de las corrientes de agua en la región no son despreciables. En términos generales, esto es consecuente con el estudio realizado por investigadores del grupo IREHISA (2014), donde demuestran que las principales afectaciones frente al fenómeno de El Niño se presentan en la reducción del caudal medio, mientras tanto, con el fenómeno de La Niña el porcentaje en el aumento de caudales es una consecuencia evidente. En este trabajo se determinó que la oferta hídrica superficial puede disminuir hasta un 43% en fases de El Niño e incrementar hasta 62% en periodos de La Niña.

Considerando lo anterior, se representó, a través de las Figuras 48, 49 y 50 el comportamiento del caudal bajo escenarios del fenómeno ENOS para distintas configuraciones del periodo de tiempo estudiado, en los gráficos se observa que la estacionalidad del flujo ha incrementado y es más marcada bajo influencia de periodos Niño y Niña, pues se pronuncian más en los meses húmedos y son mucho más bajos durante los meses más secos.

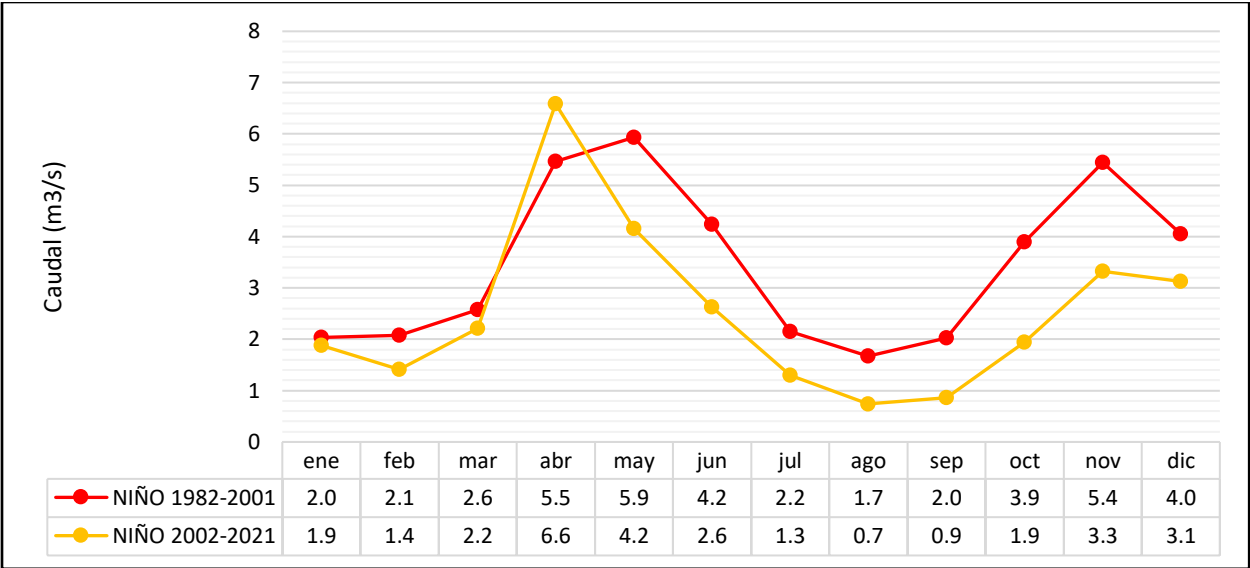


Figura 48. Comparación del caudal medio mensual bajo escenarios del fenómeno de El Niño (1982-2021).

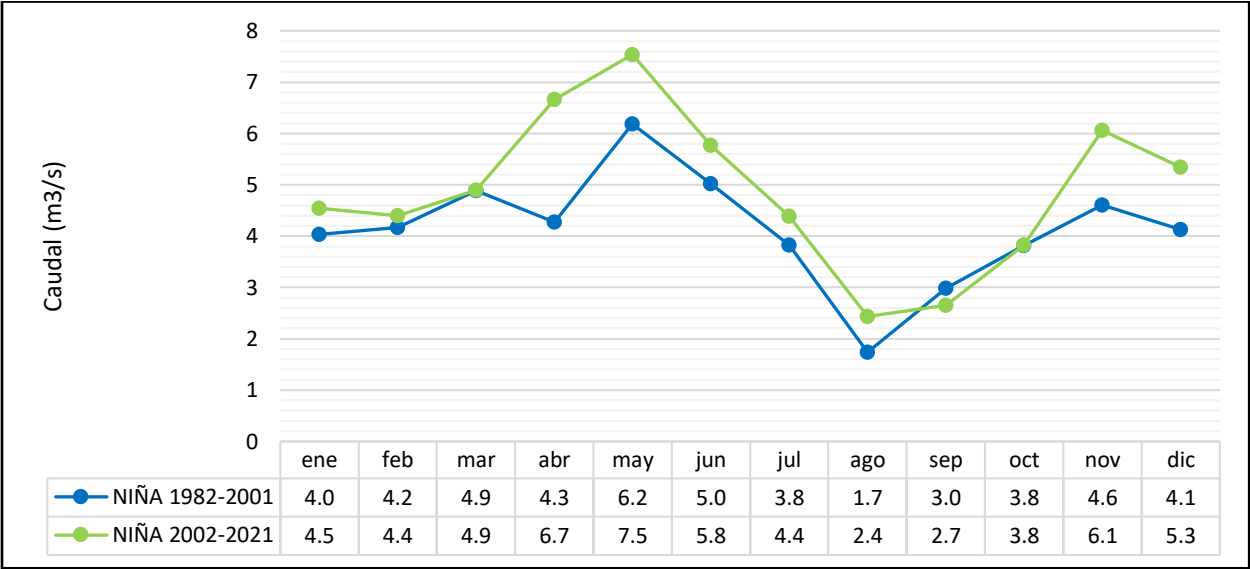


Figura 49. Comparación del caudal medio mensual bajo escenarios del fenómeno de La Niña (1982-2021).

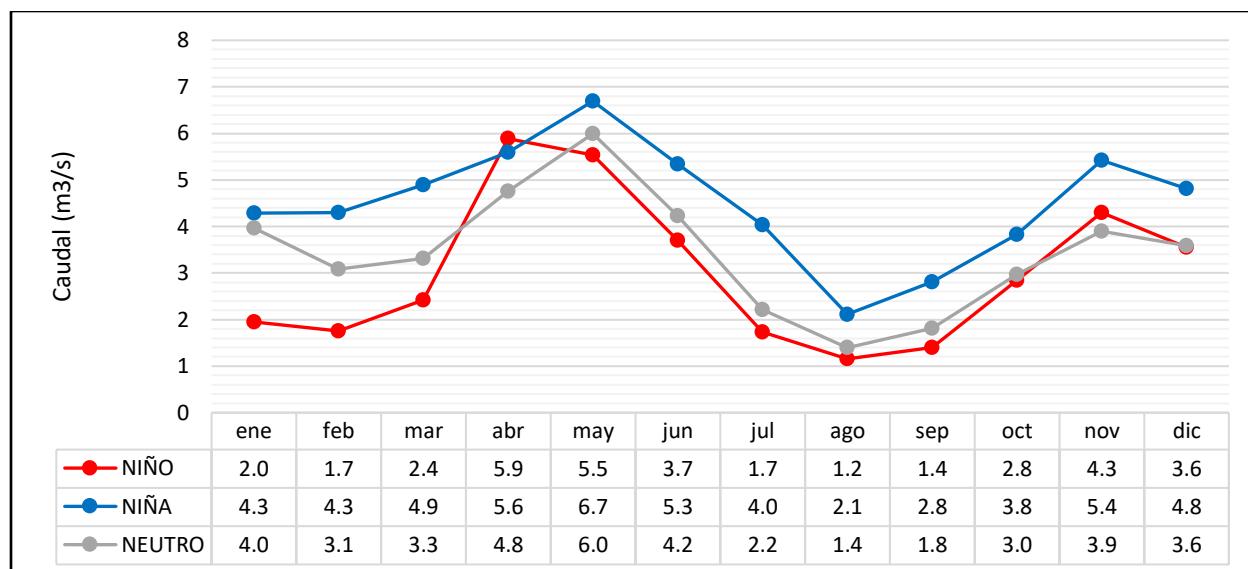


Figura 50. Comparación de la distribución temporal del caudal medio mensual (1982-2021) bajo series del fenómeno ENOS.

De acuerdo con las anteriores figuras, durante la ocurrencia del fenómeno del Niño se evidencia una clara afectación sobre los caudales que está relacionada con la disminución de los eventos de precipitación y, por ende, disminución en la oferta hídrica de la cuenca, no obstante, el uso o presión sobre el recurso va a aumentar por los factores ligados a las altas temperaturas como lo son el riego agrícola, la recreación y uso del agua por parte de la población en general. En contraste con este escenario, durante la presencia de la Niña los valores medios de caudal se han incrementado posiblemente por la disminución de la capacidad de regulación de la cuenca, en especial en el segundo periodo de estudio (2002-2021).

Continuando con el análisis, se realizaron las CDC (ver Figura 53) teniendo en cuenta la ocurrencia de eventos relacionados a los fenómenos de El Niño (ver Figura 51) y La Niña (ver Figura 52). Se puede observar que, si bien durante periodos bajo influencia de La Niña el caudal es significativamente mayor, se distribuye de manera más homogénea y no se marcan tanto los periodos extremos, mientras que con El Niño se producen cambios abruptos que afectan la capacidad de reacción y regulación de la cuenca.

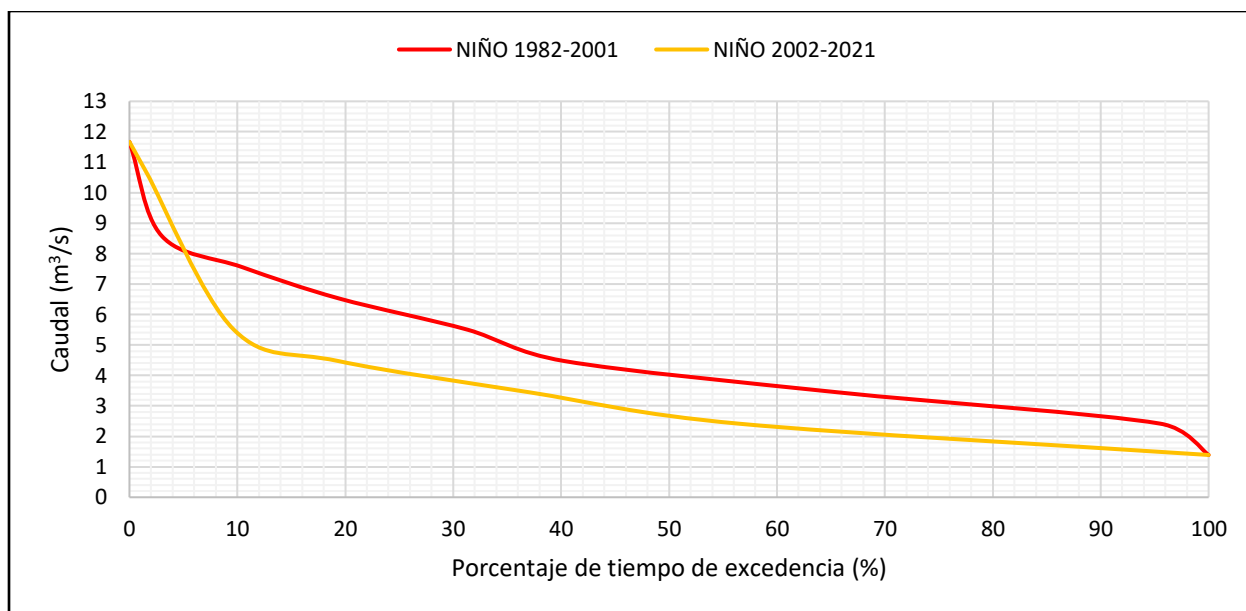


Figura 51. Comparación de las CDC bajo escenarios del fenómeno de El Niño (1982-2021).

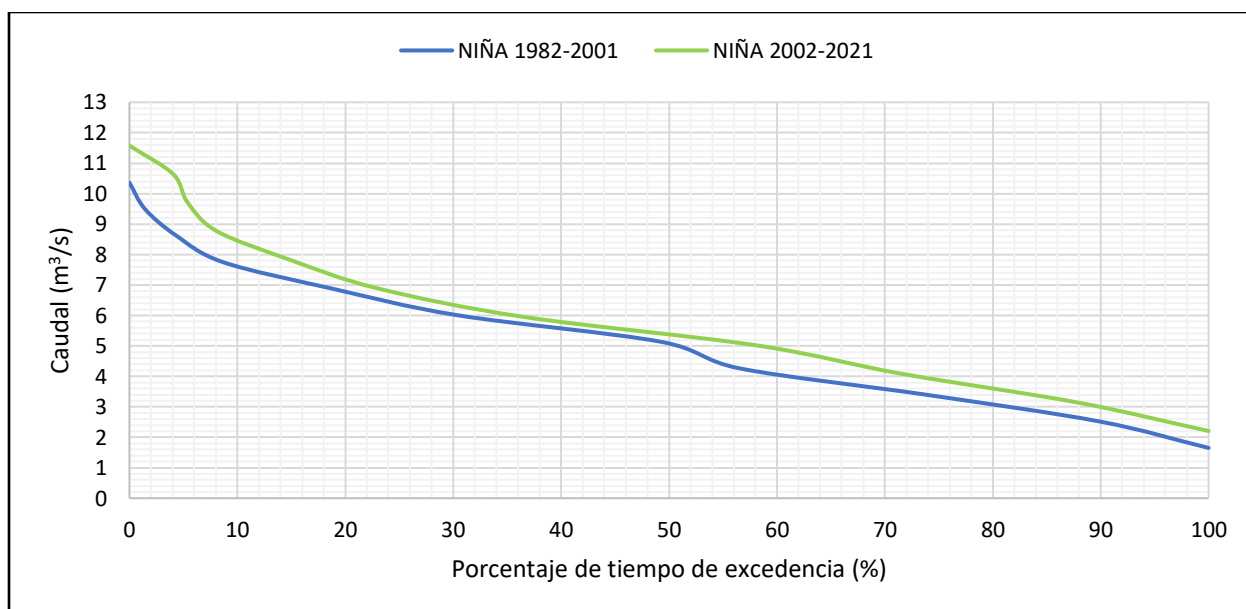


Figura 52. Comparación de las CDC bajo escenarios del fenómeno de La Niña (1982-2021).

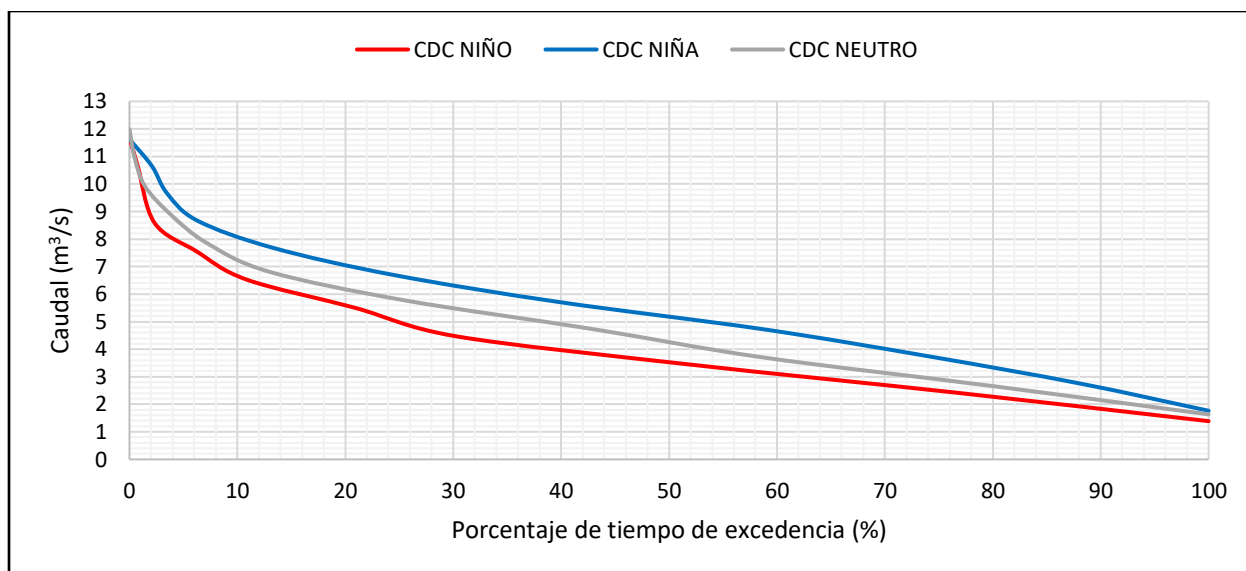


Figura 53. Comparación de las CDC bajo escenarios ENOS incluyendo periodos neutros (1982-2021).

Los resultados de las CDC presentan, en general (excepto en periodos Niño entre 2002 y 2021), curvas suavizadas sin mayor inclinación en las pendientes distintivo de ríos autorregulados con baja ocurrencia de caudales extremos (Fattorelli & Fernández, 2011). Se debe tener en cuenta que, la presencia de pendientes más empinadas pueden ser consecuencia de la precipitación concentrada o aumento de eventos de lluvia intensa al distribuirse de manera desigual en el tiempo y durante períodos cortos. También se puede inferir que, aún con un impacto notorio en la disminución del nivel de los caudales durante periodos secos, el río resalta su sostenibilidad y permanencia, debido a que no presentan sequías o ausencia total de flujo, pues Smakhtin (2001) menciona que, entre el 70% y 99% de excedencia se configuran normalmente los caudales mínimos de una serie.

8.6. Análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca bajo escenarios de Cambio Climático y Variabilidad Climática

8.6.1. Variabilidad Climática

La Tabla 10 presenta los resultados de los valores de IRH obtenidos para los escenarios del fenómeno ENOS teniendo en cuenta dos periodos de 20 años cada uno, los cuales permitieron comprender cómo la VC afecta la regulación hídrica de la cuenca media-alta del río Cali. La función del IRH resulta crucial en la

gestión integral y sostenible de los recursos hídricos, ya que facilita la toma de decisiones basadas en información precisa y fomenta la conservación y el uso eficaz de un recurso esencial para la vida.

	PERIODO	IRH	CLASIFICACIÓN
NIÑO	1982-2001	0.76	Alta
	2002-2021	0.74	Moderada
NIÑA	1982-2001	0.84	Alta
	2002-2021	0.84	Alta
NEUTRO	1982-2001	0.82	Alta
	2002-2021	0.76	Alta

Tabla 10. Resultados de la estimación del IRH bajo escenarios del fenómeno ENOS.

Tras la revisión del IRH obtenido bajo los escenarios propuestos, se observa que, en general la cuenca tiene buena capacidad de retención y regulación hídrica; no obstante, en las últimas décadas existe una ligera disminución en el valor del IRH, lo que puede relacionarse con la acentuación de los eventos climatológicos extremos, especialmente las sequías que afectan el caudal, y el incremento considerable de la presión sobre el ecosistema de la zona media de la cuenca que, según Vargas (2019), en la zona se registra un número alto de actividades antrópicas que van en contra de la normativa dispuesta por los organismos de control, así como un incremento significativo de la densidad poblacional en el sector.

Por otro lado, durante períodos de La Niña, el comportamiento del IRH se relaciona con que la zona alta de la cuenca está configurada como un Parque Nacional Natural con áreas forestales extensas (7311 ha). De acuerdo con las investigaciones desarrolladas por Manco (2015) y Marulanda (2023), este indicador permite reconocer la importancia de la conservación de la cobertura de bosque natural en la parte media-alta de una cuenca hidrográfica, viéndose reflejado en una mayor capacidad de retención de agua, una reducción del escurrimiento superficial, la estabilización del suelo, la protección de la red de drenaje y la moderación de las condiciones climáticas locales. Sin embargo, se debe señalar que, aunque los bosques pueden atenuar algunos de los efectos de La Niña, no proporcionan una protección absoluta contra eventos climáticos extremos enfrentándose a desafíos y riesgos significativos.

La intensificación de los impactos generados por la VC afectará la oferta hídrica en la zona de estudio, la cual se puede inferir a partir del comportamiento del régimen de almacenamiento durante los periodos de El Niño y La Niña. La tabla 11 muestra los valores del balance hídrico y la Figura 54, que es su representación gráfica, evidencia un remanente inferior durante la influencia del fenómeno de el Niño, esta disminución en el almacenamiento hídrico plantea preocupaciones con respecto al suministro de agua para actividades tan importantes como el servicio de acueducto y riego agrícola (25% del área en estudio), afectando la producción agrícola y el abastecimiento de agua potable para las comunidades locales.

BALANCE HIDRICO BAJO SERIES DE EL NIÑO												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP media (mm)	77.6	91.7	170.4	255.6	217.8	106.2	71.6	34.9	107.6	191.3	187.7	104.4
Q medio (mm)	45.0	36.4	55.6	131.2	127.6	82.6	39.8	26.6	31.1	65.5	95.9	81.9
ETo (mm)	65.9	59.2	65.9	62.9	63.2	63.2	66.0	66.0	63.0	62.2	59.6	64.0
ΔA (mm)	-33.3	-3.9	48.9	61.5	27.0	-39.6	-34.2	-57.7	13.5	63.6	32.2	-41.4

Tabla 11. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de El Niño (1982-2021).

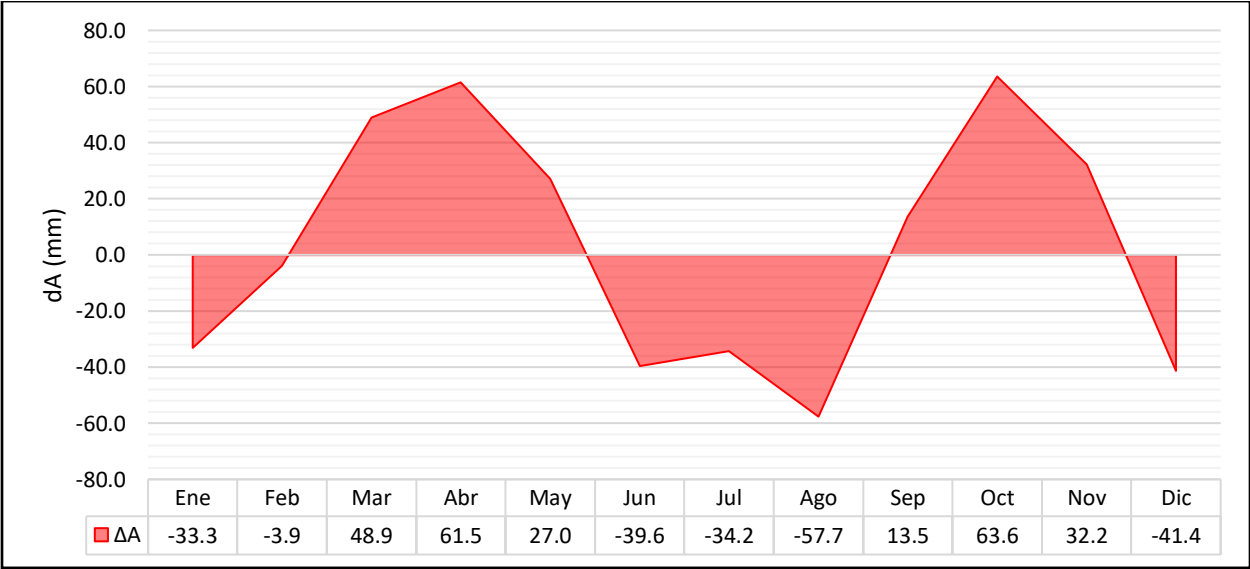


Figura 54. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de El Niño (1982-2021).

Por otro lado, durante los periodos de La Niña (ver Tabla 12 y Figura 55), se observan amenazas latentes para la zona debido al aumento en los caudales y las lluvias (un remanente mayor) como el riesgo de

movimientos de masa e inundaciones. Estas condiciones climáticas extremas no afectan solamente la respuesta hidrológica de la cuenca, también atentan contra la estabilidad del ecosistema y de las comunidades locales, por lo que es importante desarrollar estrategias de prevención y gestión capaces de hacer frente ante eventos extremos de VC.

BALANCE HIDRICO BAJO SERIES DE LA NIÑA												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
PP media (mm)	160.9	162.9	199.8	216.7	236.3	170.8	125.4	127.1	139.2	185.6	181.7	150.4
Q medio (mm)	98.8	89.4	112.7	124.8	154.1	119.1	92.9	48.7	62.6	88.1	120.9	110.8
ETo (mm)	57.7	53.6	59.8	59.5	61.4	60.5	63.2	62.8	59.0	60.3	57.6	59.8
ΔA (mm)	4.4	20.0	27.2	32.4	20.8	-8.8	-30.7	15.6	17.5	37.3	3.2	-20.2

Tabla 12. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de La Niña (1982-2021).

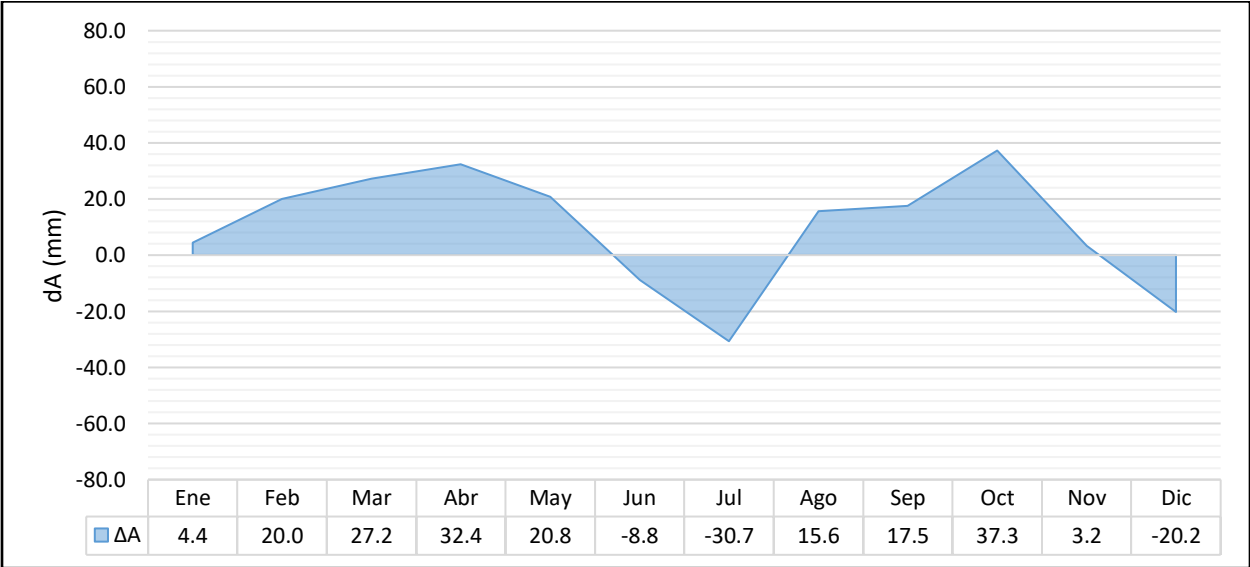


Figura 55. Balance hídrico en la zona de estudio bajo el fenómeno de La Niña (1982-2021).

Son muchas las alertas sobre el peligro a los que están sometidos los recursos hídricos con los que se abastece Cali. No únicamente los impactos por el fenómeno de El Niño son los causantes de desabastecimientos y sequías en el río Cali, también lo afectan la proliferación de asentamientos humanos y otra serie de actividades antrópicas que incrementan la deforestación y la erosión, las cuales son causantes del deterioro de la cuenca, la disminución del caudal y la reducción en la capacidad de abastecimiento para la ciudad desde la zona de ladera (Guerrero, 2016). En contraste, las fuertes lluvias relacionadas al fenómeno de La Niña provocan deslizamientos de tierra en áreas de ladera degradadas

y/o erosionadas. Cuando hay crecimientos severos en el caudal del río Cali se afectan las operaciones de captación de agua para abastecimiento a cierta parte de la población, además, esas crecientes súbitas junto con la respuesta deficiente del sistema de drenaje urbano por taponamientos con residuos y basuras (canales y alcantarillado) provocan inundaciones y represamientos de agua (El Espectador, 2016).

8.6.2. Cambio Climático

Los cambios proyectados en el ciclo del agua impulsados por el clima como los aumentos de la evapotranspiración, la alteración de los patrones de precipitación, la escorrentía y el caudal de los ríos, afectarán a los ecosistemas terrestres de agua dulce y al transporte de materiales a través de los ciclos biogeoquímicos, impactando el bienestar humano y social (IPCC, 2022).

Asimismo, considerando las proyecciones de las variables hidroclimatológicas realizadas a través del Estudio Técnico de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura en Colombia (2015), el Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca (2018) y el Plan de Gestión del Cambio Climático en Santiago de Cali (2020), los cuales indican incrementos de la temperatura media de 0.9°C, además de aumentos de evapotranspiración y precipitación entre 5% y 10% respectivamente, y asumiendo un régimen de almacenamiento sin cambios al año 2040, se puede decir que, los valores de caudal medio incrementarán desde un 4% en meses secos hasta un 15% en meses típicamente lluviosos (ver Tabla 13).

PROYECCIÓN DE BALANCE HIDRICO												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
T media (°C)	17.5	17.5	17.5	17.7	17.5	17.5	17.4	17.6	17.5	17.4	17.3	17.4
ETo media (mm)	65.5	59.4	66.7	66.6	67.7	65.7	67.3	68.0	64.5	65.1	62.3	64.7
PP media (mm)	138.6	136.4	182.0	247.9	240.9	153.7	91.5	85.8	146.8	201.1	194.3	138.0
Q medio (mm)	90.8	73.2	89.0	126.5	152.3	114.6	65.9	38.5	58.3	88.1	119.7	100.9
ΔA	-17.6	3.8	26.3	54.9	21.0	-26.5	-41.7	-20.7	24.0	47.9	12.3	-27.5

Tabla 13. Estimación del caudal medio a través de consideraciones en la proyección de variables de cambio climático al año 2040.

Cabe aclarar que en las consideraciones para la estimación del caudal medio al año 2040, se procesaron registros de temperatura media de la estación La Teresita como referencia y no se tomaron en cuenta los

impactos por parte de las actividades antrópicas y cambios en las coberturas de suelo. Vargas (2019) resalta que si no se efectúan medidas necesarias para la regulación de las actividades humanas (urbanización, ganadería extensiva, agricultura en sitios inadecuados con prácticas insostenibles, minería ilegal, entre otros), se perdería parte importante de la cobertura natural y características típicas del suelo, además se verían afectadas la capacidad de regulación y la oferta hídrica en la cuenca.

En términos generales, frente a escenarios futuros de Cambio Climático, las alteraciones en el comportamiento a lo largo del tiempo de la precipitación y demás variables hidroclimáticas, sumado a la pérdida de coberturas naturales, pueden impactar negativamente sobre la oferta hídrica superficial (CVC, 2021), lo que hace un llamado a la profundización en estudios específicos sobre Cambio Climático y al desarrollo de una eficiente gestión de los recursos hídricos y gestión del riesgo.

9. Conclusiones

- La cuenca estudiada cuenta con buena cobertura de estaciones (por debajo de los 2500msnm) con un porcentaje de datos faltantes inferior al 14% lo que permite darles solidez y confiabilidad a los resultados obtenidos.
- De acuerdo con el análisis exploratorio de los datos de precipitación y entendiendo la complejidad de los sistemas hidrológicos, los datos observados no se ajustan a la distribución normal. Este comportamiento puede ser influenciado por factores meteorológicos y relacionados con la localización de la cuenca en estudio.
- Los resultados de la correlación de Spearman, en su mayoría superiores al 70%, respaldan el uso del método de interpolación IDW para estimar datos faltantes. Este método ha demostrado ser válido, como se evidencia en la evaluación de su precisión y calidad mediante el método RMSE, pues los valores obtenidos fueron inferiores a la unidad, lo que sugiere que la interpolación es capaz de capturar, en buena proporción, las variaciones y patrones presentes en los datos observados.
- Según la caracterización hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Cali en la zona media alta, tanto la precipitación como el caudal, presentan un patrón de comportamiento correspondiente al régimen bimodal.
- La precipitación y el caudal están influenciados en su comportamiento por los índices macro climáticos ONI y MEI, con un coeficiente de correlación entre 29% y 38%, corroborando la incidencia del fenómeno ENOS en la zona de estudio. Durante la ocurrencia del fenómeno de El Niño, la cuenca suele experimentar condiciones más secas de lo normal, pues trae consigo un debilitamiento de las lluvias y esta disminución afecta los caudales. En contraste, bajo presencia de periodos Niña, la cuenca normalmente experimenta condiciones más húmedas, pues se presentan precipitaciones mayores y en consecuencia aumento en los caudales correspondientes.

- Para la cuenca del río Cali, el análisis de las CDC, en el primer periodo analizado, presentan curvas suavizadas sin mayor inclinación en las pendientes, distintivo de ríos autorregulados con menor ocurrencia de caudales extremos. A partir del 2002 la suavidad de las CDC en la cuenca del río Cali se ha venido reduciendo y por ende su capacidad de regulación hídrica. En tanto, en la cuenca del río Pichindé, afluente del río Cali en la parte alta, que mantiene buena cobertura natural, conserva la respuesta hidrológica de una CDC que varía suavemente.
- La cuenca hidrográfica del río Cali, presenta buena capacidad de regulación hídrica según los resultados de la estimación del IRH (0.78) para el periodo entre 1982 y 2021. Sin embargo, se genera una alerta ya que este indicador ha venido disminuyendo, pues presenta un valor que se redujo de 0.80 entre 1982 y 2001 hasta 0.75 para el periodo entre 2002 y 2021. Los valores del IRH para periodos bajo ocurrencia del fenómeno de La Niña se mantienen constantes durante los 40 años de estudio (0.84), no obstante, bajo la incidencia de El Niño hay decrecimiento en este índice, ya que pasa de 0.76 (entre 1982 y 2001) a 0.74 (entre 2002 y 2021).
- Aunque en la zona media de la cuenca hidrográfica del río Cali la regulación hídrica ha ido disminuyendo con el tiempo, en la zona alta (Pichindé) se conserva, lo que se puede relacionar con la cobertura vegetal y su conservación, es decir, la posible influencia de las actividades antrópicas en la respuesta hidrológica de la cuenca.
- De acuerdo con los resultados de los balances hídricos mensuales, el bajo aporte al caudal superficial en periodos secos es compensado por el almacenamiento en los suelos de la cuenca durante los periodos lluviosos. Durante los períodos de La Niña, se registran aumentos significativos en la oferta hídrica hasta un 62% comparado con la oferta hídrica de un año normal. Por otra parte, durante los eventos de El Niño se presentan condiciones más secas, con disminuciones considerables de la oferta hídrica hasta del 43% comparado con un año normal.

- De acuerdo con estudios a nivel nacional y departamental y con los resultados del presente trabajo, sobre los efectos del Cambio Climático en las lluvias de la cuenca del río Cali, en comparación con el comportamiento normal histórico, presentan la tendencia a un incremento durante los meses típicamente lluviosos del primer semestre del año (marzo-abril). Durante el segundo periodo del año (octubre-noviembre), se espera que el Cambio Climático producirá una reducción en las precipitaciones.
- En conclusión, el Cambio Climático ejerce un impacto significativo en la regulación hídrica al potencialmente alterar los patrones naturales de las variables que componen el ciclo hidrológico de la cuenca. Este efecto se manifiesta en cambios en la cantidad, intensidad y distribución temporal y espacial de estas variables, lo que a su vez puede ocasionar modificaciones en la disponibilidad de agua y en la respuesta hidrológica de la cuenca en su conjunto.

10. Recomendaciones

- La capacidad de la regulación hídrica de la cuenca del río Cali, presenta una respuesta positiva a las buenas prácticas del manejo del agua en la vegetación y en la protección de los bosques; por lo que se recomienda incrementar estas prácticas de conservación y recuperación de la cobertura vegetal. Lo cual además conlleva otros servicios ambientales complementarios y convenientes tales como, calidad de aire, paisaje, biodiversidad, entre otros.
- Se sugiere profundizar en estudios específicos sobre cambio y variabilidad climática en la zona de estudio mediante herramientas de modelación hidrológica y análisis del cambio de coberturas naturales. Además, evaluar estudios sobre los cambios de la esorrentía como la implementación de obras para el manejo adecuado del agua, ya sea para canalizar, almacenar y reducir escurrimiento superficial o mejorar las condiciones de drenaje, según sea el caso.
- Este trabajo resalta la necesidad de fortalecer estrategias de acción y adaptación que posibiliten respuestas rápidas y efectivas por parte de los sistemas sociales, económicos y ambientales susceptibles a los cambios en las lluvias y los caudales por alteraciones climáticas. Lo anterior se debe realizar considerando las proyecciones del Cambio Climático, el comportamiento de la Variabilidad Climática y los riesgos de las dinámicas socioeconómicas de la cuenca.
- En cuanto a la constante intervención antrópica que se presenta en la zona de estudio, es indispensable el monitoreo permanente del territorio e incrementar el manejo conservacionista sobre los ecosistemas, integrando y comprometiendo a las comunidades con presencia en el territorio.
- La cobertura boscosa del Parque Natural Nacional (PNN) Farallones de Cali representa el 62% del área de la cuenca del río Cali, lo cual implica el gran compromiso de protegerla en particular por su rol crucial en la regulación hídrica y su impacto positivo en la mega biodiversidad de la ciudad de Cali. Se recomienda incrementar programas de reforestación y protección de bosques en la zona media-alta de la cuenca con la finalidad de abordar los desafíos actuales en la gestión integral del agua y explorar

soluciones innovadoras que promuevan la sostenibilidad ambiental y la resiliencia ante la intensificación de eventos climáticos extremos.

- La gestión del riesgo en la cuenca media-alta del río Cali es importante para salvaguardar a la población y la infraestructura ante la ocurrencia de eventos extremos como lluvias intensas o sequías, cuyas repercusiones se extienden hasta aguas abajo, impactando directamente en el área de influencia de la ronda hídrica. En la zona urbana, en particular en el sector del túnel de la Avenida Colombia (o túnel Mundialista) y a lo largo de la ronda hídrica urbana, se recomienda especial atención a la ocurrencia de crecientes y su posible integración a una red de alertas tempranas.
- Se recomienda reforzar la red de monitoreo hidroclimatológica a través de la implementación de herramientas tecnológicas o mejoramiento de la infraestructura que permitan disminuir la deficiencia en la red de estaciones, especialmente en la zona alta de la cuenca, pues más del 50% del área total está influenciada solamente por tres estaciones (dos pluviográficas y una climatológica) y solo una de ellas supera los 2000 msnm. Complementando lo anterior, se sugiere que a futuro sea cuantificado el aporte o contribución de la lluvia horizontal (neblina) y el papel de los bosques en su captura.
- Considerando que en la cuenca hidrográfica del río Cali existen varias instituciones encargadas de operar estaciones de medición hidroclimatológica, se recomienda que haya un sistema único que recopile, procese y publique en tiempo real información de calidad y de fácil acceso.
- Ante la intensificación de los efectos causados por la presencia del Cambio Climático y la Variabilidad Climática en la zona de estudio y a raíz de algunas irregularidades en el comportamiento de El Niño y La Niña a lo largo del tiempo (como lluvias muy intensas en periodos de sequía), es recomendable para futuros estudios emplear una base diaria de información hidroclimatológica.

10. Referencias

- Alarcón-Hincapié, J., Zafra-Mejía, C., & Echeverri-Prieto, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 22(2). Disponible en: doi.org/10.31910/rudca.v22.n2.2019.1368
- Álvarez, A., Yustres, F., Ivanova, Y. (2021). Estimación del cambio de la capacidad de regulación hídrica como respuesta a los cambios de coberturas de la tierra (Caso de estudio: Cuenca alta del río Chinchiná, Caldas, Colombia). *Revista EIA*, 18(35). Pág. 1-11. <https://doi.org/10.24050/reia.v18i35.1465>
- Asfaw, D. & Workineh, G. (2019). Quantitative analysis of morphometry on Ribb and Gumara watersheds: Implications for soil and water conservation. *International Soil and Water Conservation Research*. 17(2), 109-117. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.003>
- Ávila, A., Cardona, F., Carvajal, Y., & Jiménez, H. (2014). Tendencias en las series de precipitación en dos cuencas torrenciales andinas del Valle del Cauca (Colombia). *Tecnológicas*, vol. 17, no. 32, pp. 85-95.
- Ávila, A., Carvajal, Y. & Gutiérrez, S. (2014). Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali. *Tecnura*, 18(41), 120-133. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123921X2014000300010&lng=en&tlng=es.
- Bárcena, A., Samaniego, J., Pérez, W. & Alatorre, J. (2020). La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?, Libros de la CEPAL, N°160 (LC/PUB.2019/23-P). Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile.

- Barroso, F., Carvajal, Y. & Reyes, A. (2017). Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas. Programa Editorial Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Bottino, R. (2009). La ciudad y la urbanización. CDHRP, Rivera.
- Breña, G. & Jacobo, M. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, México D.F.
- Bretas, F., Casanova, G., Crisman, T., Embid, A. & Martin L. (2020). Agua Para el Futuro: Estrategia de Seguridad Hídrica para América Latina y el Caribe. School of Geosciences Faculty and Staff Publications. 2241. University of South Florida, Tampa.
- Cadena, M., Guzmán, D. & Ruíz, J. (2014) Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través de análisis de componentes principales (ACP). Subdirección de Meteorología, IDEAM. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/Regionalizaci%25C3%25B3n%2Bde%2Bla%2Blluvia%2Ben%2BColombia.pdf/92287f96-840f-4408-8e76-98b668b83664>
- Cantera, J., Carvajal, Y. & Castro, L. Comp. (2009). El caudal ambiental: conceptos, experiencias y desafíos. Programa editorial Universidad del Valle, Cali.
- Carvajal, Y. (2011). Effects of Climate Variability (CV) and Climate Change (CC) on Colombian Water Resources. Entre Ciencia e Ingeniería, Universidad Católica de Pereira. Año 5. No. 9, 33 – 61.
- Carvajal, Y., Castro, L. y Ávila, A. (2012). Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. Revista EIDENAR.
- Castillo, C., Abreu, D., & Álvarez, M. (2021). Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo del tiempo de concentración en la cuenca urbana del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara. *Enfoque UTE*, 12(3), pp. 51 - 64. doi.org/10.29019/enfoqueute.729

- Castro, L. Carvajal, Y. (2006). Análisis Exploratorio y Cuantitativo para Determinar la Estacionariedad de las Series Hidrometeorológicas. XVII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología.
- Castro, E. (2022). Estimación de la Oferta Hídrica del Parque Nacional Natural Farallones de Cali en la Vertiente Oriental – Cali. Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Chiarito, E., Zimmermann, E. & Méndez, S. (2018). Metodologías para la Estimación del Coeficiente de Escorrentía en Áreas Urbanizadas Mediante Teledetección. Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. Vol. 24, 25 – 36.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1994). Hidrología Aplicada. Traducido de la primera edición en inglés de Applied Hydrology. McGraw Hill Interamericana, Bogotá.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (2011). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cali. CVC, Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC y Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT. (2015). Portafolio de estrategias para la mitigación y adaptación al cambio climático: Municipio de Santiago de Cali, Valle del Cauca. Disponible en: ecopedia.cvc.gov.co/sites/default/files/archivosAdjuntos/portafolio_de_estrategias_de_adaptacion_-_santiago_de_cali_0.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC. (2017). Evaluación regional del agua Valle del Cauca – 2017. Dirección Técnica Ambiental. Disponible en: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/201810/EVALUACION_REGIONAL_AGUA_Ajustes2018_2.pdf

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC., Secretaría de Ambiente, Agricultura y Pesca., & Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT. (2018). Plan Integral de Cambio Climático para el Valle del Cauca PICC. Gobernación del Valle del Cauca, Santiago de Cali. Disponible en: <https://ecopedia.cvc.gov.co/cambio-climatico/gestion-del-cambio-climatico/plan-integral-de-cambio-climatico-para-el-valle-del>

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC., Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA., Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT., & Anthesis Lavola. (2020). Plan Integral de Gestión del Cambio Climático de Santiago de Cali. Alcaldía de Santiago de Cali, Santiago de Cali. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/documentos/3047/cambio-climatico/>

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC. (2021). Actualización del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Cali. CVC, Santiago de Cali.

Decreto 1729 de 2002 [Ministerio de Medio Ambiente]. Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones. 6 de agosto de 2002.

Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA. (s.f). Identificación de la Situación Ambiental de la Cuenca Hidrográfica del Río Cali, Zona Urbana de Santiago de Cali. DAGMA, Santiago de Cali. Disponible en: <https://www.cali.gov.co/publico2/documentos/dagma/informeejecutivorioscaliyaguacatal.pdf>

Díaz, G. (2012). El Cambio Climático. Instituto Tecnológico de Santo Domingo. Ciencia y Sociedad. Vol. 37, N°2, pág. 227-240. Santo Domingo.

Dingman, S. (1994). Physical Hydrology. Macmillan College Publishing Company, New York.

DNP, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, IDEAM, UNGRD. (2016). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Disponible en: www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/PNACC-2016-linea-accion-prioritarias.pdf

El Espectador (2016). Aumento del Caudal del río Cali generó emergencia en la ciudad. Redacción Nacional, Cali. Disponible en: <https://www.elespectador.com/colombia/cali/aumento-del-caudal-del-rio-cali-genero-emergencia-en-la-ciudad-article-629429/>

Escobar, D. (2019). Evaluación Hidrológica del Cambio Climático y su Incidencia en los Caudales Mensuales de la Cuenca Hidrográfica del Río Jamundí. Universidad del Valle, Santiago de Cali.

Fattorelli, S. & Fernández, P. (2011). Diseño Hidrológico. 2^{da} edición en español. Curva de Duración de Caudal. Water Assessment and Advisory Global Network, 29(4), 143–156.

Gómez-Reyes, E. (2013). Valoración de las componentes del balance hídrico usando información estadística y geográfica: La cuenca del Valle de México. Realidad, datos y espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía, 4(3), 4-6.

González, H. & Ramírez, O. (2006). Creciente del Río Cali 7 de mayo de 2006. Grupo de Sistema de Información Ambiental. Dirección Técnica Ambiental. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, Santiago de Cali.

Guerrero, D. (2016). Los ríos de Cali tienen sed. Agencias de Noticias Univalle. Medio Ambiente, Santiago de Cali. Disponible en: <https://www.univalle.edu.co/medio-ambiente/los-rios-de-cali-tienen-sed>

Hidroingeniería Ltda. (2000). Estudio del caudal ecológico, balance hídrico, indicadores ambientales e inventario del recurso hídrico en los ríos Cali, Aguacatal, Cañaveralejo y Meléndez del municipio de Santiago de Cali.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; Universidad Nacional de Colombia – UNAL. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia. IDEAM, Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (s.f). Modelación Hidrológica.

Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2001). El Medio Ambiente en Colombia. Agua. IDEAM, Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. Bogotá D.C. N°36 pág. 60-64.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2016). Curvas Intensidad Duración Frecuencia (IDF). Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/curvas-idf>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2010). Estudio Nacional del Agua del 2010 – ENA. IDEAM, Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua del 2014 – ENA. IDEAM, Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2018). Estudio Nacional del Agua del 2018 – ENA. IDEAM, Bogotá D.C.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM. (2022). Estudio Nacional del Agua del 2022 – ENA. IDEAM, Bogotá D.C.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (1990). Policymaker summary of working group II: Potencial impacts of climate change. Disponible en: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ipcc_90_92_assessments_far_wg_II_spm.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (1995). IPCC - Segunda evaluación cambio climático 1995. Informe del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Disponible en: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/2nd-assessment-sp.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2001). Cambio climático 2001: Informe de síntesis.

Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Disponible en : www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2007). Climate change 2007 : Synthesis report.

Disponible en: www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Masson – Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. Disponible en: www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report_smaller.pdf

Jaramillo, A. y Chaves, B. (2000). Distribución de la precipitación en Colombia analizada mediante conglomeración estadística. Cenicafé. 51(2). 102-113.

Jiménez – Escobar, H., Carvajal – Escobar, Y., Cardona – Guerrero, F. y López – García, J. (2018). Análisis espacio-temporal de los incendios forestales asociados a las sequías y la fase cálida del ENOS en la zona rural del municipio de Cali.

- Larrahondo, E. & Russi, J. (2019). Comparación de métodos de estimación de datos faltantes en series de precipitación diaria en el Valle del Cauca. Facultad de Ingeniería. Escuela de Estadística. Universidad del Valle, Cali. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10893/14419>
- Legarda, L. & Viveros, M. (1996). La importancia de la hidrología en el manejo de cuencas hidrográficas. Revista de Ciencias Agrícolas. Universidad de Nariño. Vol. 14, Número 1-2, 33-51. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/revista/23329/A/1996>
- Londoño, C. (2001). Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales – caracterización – planificación – administración. Universidad del Tolima. Ibagué, Colombia.
- Manco, Y. (2015). Transformación del paisaje, diversidad funcional y funcionamiento ecohidrológico en ecosistemas naturales e intervenidos de Bolivia. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Colombia: Medellín.
- Marrama, V. (1964). Desarrollo económico: Conceptos, estrategias, planes. Revista de Economía Política. Número 37, 162-181.
- Márquez, L., Cuétara, L., Carta, R., & Labarca, N. (2019). Development and economic growth: Theoretical analysis from a quantitative approach. Revista de Ciencias Sociales (Ve). Vol. 16, Número 1. pp. 233-253, 2020. Universidad del Zulia
- Martínez, E., Martínez, P. & Castaño, S. (2006). Fundamentos de Hidrología. Mundi Prensa, Madrid.
- Martínez, R, Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A., & Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman. Revista Habanera de Ciencias Médicas, 8(2). Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>
- Marulanda, R. (2023). Evaluación de la dinámica del uso de suelo en la zona alta de la cuenca del río Pance Cali – Colombia, para determinar el efecto hidrológico en el periodo del 2000 al 2021. Escuela de

Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle:
Santiago de Cali.

Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Bogotá, D.C.: Colombia.

Montenegro, D., Pérez, M. & Vargas, V. (2022). Análisis de la influencia de la variabilidad climática en la precipitación de la cuenca del río Cali, Colombia. Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
Disponible en: <https://doi.org/10.15446/dyna.v89n221.101607>

Monsalve, G. (2004). Hidrología en la ingeniería. 2da edición. Editorial de la Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá D.C.

Montoya, H. & Carvajal, Y. (1998). Caracterización Fisiográfica e Hidrológica: Cuenca Hidrográfica del Río Cali. 1(2), 33-40. Ingeniería y Competitividad.

Naciones Unidas. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. Artículo 1. Naciones Unidas, Nueva York.

NOAA/ National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Climate Prediction Center. Oceanic Niño Index (ONI). (s.f). Disponible en:
https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

NOAA / National centers for Environmental Information. The Southern Oscillation Index (SOI) (2017).
Disponible en: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>

NOAA. Physical Sciences Laboratory. (2018). Multivariate ENSO Index (MEI). Disponible en:
<https://psl.noaa.gov/enso/mei.old/>

- Oficina del Dato (2021). Guía práctica de introducción al Análisis Exploratorio de Datos. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital: Madrid. Disponible en: <https://datos.gob.es/es/documentacion/guia-practica-de-introduccion-al-analisis-exploratorio-de-datos>
- Ordóñez, J. (2011). Cartilla técnica: ¿Qué es una Cuenca Hidrográfica? Foro Peruano para el Agua. Sociedad geográfica de Lima, Lima. Disponible en: <https://www.gwp.org>
- Ordóñez, J. (2011). Cartilla técnica: Balance Hídrico Superficial. Foro Peruano para el Agua. Sociedad geográfica de Lima, Lima. Disponible en: <https://www.gwp.org>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma.
- Organización Meteorológica Mundial - OMM & Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura - UNESCO. (2012). Glosario Hidrológico Internacional. OMM, Ginebra.
- Ospina, J., Domínguez, C., Vega, E., Darghan, A. & Rodríguez, L. (2017). Analysis of the water balance under regional scenarios of climate change for arid zones of Colombia. 30 (1), 63-76. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Autónoma de México.
- Pardo, Y. (2022). Valoración del servicio ecosistémico regulación hídrica en el Piedemonte Amazónico, Caquetá, Colombia. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. Vol. 25 N°1. Bogotá. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n1.2022.1608>
- Personería Distrital de Santiago de Cali. (2020). Informe de Gestión. Disponible en: <https://personeriacali.gov.co>

Personería Municipal de Santiago de Cali. (2013). Informe sobre el estado del recurso hídrico en el municipio de Santiago de Cali. Disponible en: <https://docplayer.es/>

Petto, A., Caicedo, R.M., Medina, A.E., Medina, L.F., Villaquiran, M.F. y Duque, F. (2000). Sistema de información geográfica de la unidad de manejo de cuenca Cali – Meléndez – Pance – Aguacatal: Memoria técnica. Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Subdirección de Planeación. Grupo de Cartografía. Disponible en: https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/80468/11/cvc_sistema_informacion_2001.pdf

Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático, París, UNESCO.

Revueltas, J. E., Zabaleta, A., Mercado, T., & Aguirre, S. (2020). Cambios en el clima local y su efecto en la regulación hídrica en microcuencas del departamento del Magdalena, Norte de Colombia. Información tecnológica, 31(6), 193-206. [dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000600193](https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000600193)

Rodríguez, G., Cabalé, E. & Deroy, D. (2019). El crecimiento económico como modelo de desarrollo social y su relación con el cambio climático. Retos Revista de Ciencias de la Administración y Economía, 9(18), 275-286. Disponible en: <https://doig.org/10.17163/ret.n18.2019.06>

Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology: a review. Journal of Hydrology. Vol 240, Issues 3-4, Pag. 147-186. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)

Soto, J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. Paradigma Económico. Número 1, 127-149.

Vargas, J. A. (2019). Biodiversidad de la cuenca alta y media del río Cali: ¿conozco? ¿transformo? ¿protejo?. Revista de Ciencias, 23(1), 65-85. Disponible en: <https://doi.org/10.25100/rc.v23i1.8618>

WWAP, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. XIV. UNESCO, París.