



Programa de Maestría en Cambios Globales y Riesgo de Desastres

Evaluación del impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas poco instrumentadas.

Caso de estudio Cuenca hidrográfica del río Bitá, Departamento del Vichada.

Edwin Castillo Landínez

Fernando Andrés Ospina Lema



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

Obra de Iglesia
de la Congregación



Hermandades de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Evaluación del impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas
hidrográficas poco instrumentadas

Caso de estudio Cuenca hidrográfica del río Bitá, Departamento del Vichada

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título del Programa de
Maestría en Cambios Globales y Riesgo de Desastres
Modalidad de grado: Proyecto de investigación

Faber Mosquera Álvarez, MSc

Edwin Castillo Landínez y Fernando Andrés Ospina Lema

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CAMBIOS GLOBALES Y RIESGO DE DESASTRES
MANIZALES, CALDAS
2023

Nota aprobatoria

Tabla de contenido

1. Introducción	14
2. Justificación	19
3. Preguntas de investigación.....	23
4. Objetivos.....	24
4.1. Objetivo General	24
4.2. Objetivo Específicos	24
5. Marco teórico	25
5.1. Antecedentes	25
5.1.1. Conceptos base del cambio climático	25
5.1.2. Marco global de cambio climático	27
5.1.3. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.....	29
5.1.4. Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía (PRICCO)	32
5.1.5. Estudio Nacional del Agua.....	35
5.1.6. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bitá.....	37
5.2. Marco conceptual	38
5.2.1. Cambio climático.....	38
5.2.2. Oferta hídrica	47
5.2.3. Riesgos de desastres y gestión del cambio climático.....	52
5.2.4. Demanda hídrica	56
5.2.5. Instrumentos de planificación ambiental y territorial	57
5.3. Marco geográfico	60
5.4. Marco legal.....	65
6. Metodología	66
7. Resultados	71
7.1. Selección de datos meteorológicos línea base	71
7.1.1. Precipitación	71
7.1.2. Temperatura	78
7.2. Selección de los modelos de circulación global (GCMs)	80
7.3. Downscaling series cambio climático.....	85
7.4. Modelación hidrológica HEC-HMS (SMA)	87
7.4.1. Programa HEC-HMS	87
7.4.2. Implementación modelo SMA	91
7.5. Estimación y proyección demanda hídrica	110
7.5.1. Estimación de la Demanda Hídrica.....	110
7.6. Índices de estado del recurso hídrico	116

7.7.	Medidas de adaptación y mitigación de cambio climático	121
7.7.1.	Instrumentos vigentes en el territorio nacional.....	121
7.7.2.	Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes	122
7.7.3.	Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía.	123
7.7.4.	POMCA del Río Bitá	123
7.7.5.	Informe deforestación y vulnerabilidad climática de la región Orinoquia (Fundación Grothendieck, 2021)	124
7.7.6.	LEY 2169 DE 2021. por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática.	125
8.	Discusión.....	127
8.1.	Generación de series hidrometeorológicas como insumo para la evaluación de la oferta hídrica con base en los escenarios de cambio climático globales disponibles y su desescalamiento estadístico	127
8.2.	Evaluación de la oferta hídrica de la cuenca bajo los escenarios de cambio climático a partir de la evaluación de escenarios de oferta hídrica y la aplicación de sistemas de indicadores hídricos	129
8.3.	Medidas de adaptación y mitigación de cambio climático y su incorporación en los instrumentos de planificación territorial y ambiental	136
8.3.1.	Propuesta programática para la cuenca del río Bitá de acuerdo a las proyecciones de oferta hídrica bajo los escenarios de cambio climático.....	137
8.3.2.	Propuesta metodológica de la inclusión del recurso hídrico como determinante ambiental	142
9.	Conclusiones.....	144
10.	Recomendaciones.....	146
11.	Referencias.....	149
12.	Anexos.....	158

Listado de figuras

Figura 1. Concepto agrupado de Cambio Ambiental Global.	27
Figura 2. Resultados para el departamento del Vichada conforme la Tercera Comunicación.	31
Figura 3. Índices de factores de riesgo por cambio climático para diferentes dimensiones en el departamento del Vichada.	32
Figura 4. Resultados para el departamento del Vichada conforme el PRICCO.	34
Figura 5. Principales resultados para la cuenca del río Bitá del Estudio Nacional del Agua.	36
Figura 6. Cuenca río Bitá sobre área del departamento del Vichada - Imagen servicio Google Earth.	38
Figura 7. Forzamiento radiativo (Izquierda) y Emisiones de CO ₂ (Derecha) de las 4 vías representativas de concentración (RCP) seleccionadas	40
Figura 8. Cambios proyectados en la temperatura global por las 4 vías representativas de concentración (RCP) hacia el año 2100	41
Figura 9. Representación espacial de Colombia de algunos de los modelos del CMIP5	43
Figura 10. Oferta hídrica total histórica para la cuenca del río Bitá	48
Figura 11. Relación entre caudal y duración de caudal respecto a caudal medio	50
Figura 12. Respuesta de adaptación y mitigación al cambio climático	55
Figura 13. Localización cuenca hidrográfica río Bitá	60
Figura 14. Red hídrica cuenca hidrográfica río Bitá	61
Figura 15. Metodología Planteada	67
Figura 16. Localización estaciones de precipitación.	71
Figura 17. Información disponible de precipitación indicando periodos de datos observados y faltantes.	73
Figura 18. Localización estaciones de precipitación y de reanálisis CHIRPS.	74

Figura 19. Comparación con graficas boxplot de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.	75
Figura 20. Comparación con graficas de dispersión de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.	77
Figura 21. Localización estaciones de temperatura.	78
Figura 22. Localización centroides GCMs para temperatura.	79
Figura 23. Correlaciones mayores a 0.65 para la zona de estudio (amarilla) con los modelos seleccionados.	81
Figura 24. Localización centroides modelos de cambio climático pre-seleccionados.	82
Figura 25. Comparación con graficas boxplot de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y de los modelos de circulación global MIROC5, HADGEM2 y INMCM4.	83
Figura 26. Comparación con graficas de dispersión de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.	85
Figura 27. Metodología para la reducción de escala espacial de las variables meteorológicas de los escenarios de cambio climático, ejemplo año 2050.	86
Figura 28. Componentes de un Proyecto en HMS	88
Figura 29. Modelo de la cuenca	88
Figura 30. Modelo meteorológico	89
Figura 31. Modelo meteorológico de cambio climático	90
Figura 32. Intervalo de cálculo de 1990 a 2022	91
Figura 33. Intervalo de cálculo de 2022 a 2100	91
Figura 34. Diagrama del modelo de aproximación de humedad de suelo.	92
Figura 35. Escenarios de simulación modelo hidrológico.	93
Figura 36. Metodología implementación modelo hidrológico SMA, cuenca río Bitá.	94

CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA HÍDRICA DEL RÍO BITA	5
Figura 37. Resultados oferta hídrica datos IDEAM (1992-2020)	97
Figura 38. Resultados oferta hídrica datos CHIRPS (1992-2020)	98
Figura 39. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2022-2052)	99
Figura 40. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2053-2083)	100
Figura 41. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2084-2100)	101
Figura 42. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2022-2052)	102
Figura 43. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2053-2083)	103
Figura 44. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2084-2100)	104
Figura 45. Zonificación del caudal medio anual multianual	105
Figura 46. Zonificación de resultados del modelo HADGEM2 para el RCP4.5	106
Figura 47. Zonificación de resultados del modelo HADGEM2 para el RCP8.5	107
Figura 48. Zonificación de resultados del modelo MIROC5 para el RCP4.5	108
Figura 49. Zonificación de resultados del modelo MIROC5 para el RCP8.5	109
Figura 50. Demanda Hídrica Total (m ³ /año).	113
Figura 51. Metodología estimación indicadores hídricos	117
Figura 52 Comparación oferta hídrica estimada por IDEAM y CHIRPS (1992-2021)	129
Figura 53 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2022-2052)	132
Figura 54 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2053-2083)	132
Figura 55 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2084-2100)	133
Figura 56 Análisis de la tendencia de la oferta hídrica	135
Figura 57. Pasos para diseñar una medida de adaptación	138

Listado de tablas

Tabla 1. Escenarios de cambio climático planteados para Colombia	30
Tabla 2. Listado de Modelos globales	44
Tabla 3. Clasificación del IRH	51
Tabla 4. Clasificación del IUA	52
Tabla 5. Clasificación del IVH	56
Tabla 6. Distribución de las Unidades territoriales.....	62
Tabla 7. Inventario información disponible de precipitación estaciones IDEAM	72
Tabla 8. Métricas escala diaria comparación CHIRPS-IDEAM.....	77
Tabla 9. Inventario información disponible de precipitación estaciones IDEAM	79
Tabla 10. Métricas escala mensual comparación GCMs-IDEAM	84
Tabla 11. Demanda total Hídrica de acuerdo con el Censo de Usuarios.....	114
Tabla 12. Resumen de resultados para la demanda hídrica proyectada.....	116
Tabla 13. Indicadores hídricos estimados cuenca río Bitá para diferentes modelos y escenarios.....	118
Tabla 14. Instrumentos de planificación que involucran la cuenca hidrográfica del río Bitá.....	121
Tabla 15. Medida: Integración del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial relacionados con el recurso hídrico y el cambio climático.	139
Tabla 16. Medida: Conservación de ecosistemas vulnerables al cambio climático para la provisión de agua.....	139
Tabla 17. Medida: Adaptación basada en ecosistemas.	140
Tabla 18. Medida: Preservación del agua como eje vital de organización social.	140
Tabla 19. Medida: Recuperar las áreas degradadas de importancia hídrica.....	141
Tabla 20. Medida: Generar huertos multipropósito.....	141

Listado de anexos

Anexo 1. Modelos hidrológicos desarrollados para los diferentes escenarios de cambio climático.

Anexo 2. Datos generados por los modelos

Anexo 3. Resultados obtenidos para cada unidad hidrográfica nivel I, para la condición actual y para los escenarios de cambio climático implementados.

Anexo 4. Resultados obtenidos de los modelos de cambio climático para los diferentes escenarios definidos.

Anexo 5. Comparación de los resultados de los modelos cambio climático.

Anexo 6. Resultados de la estimación de la demanda proyectada para diferentes sectores.

Anexo 7. Cálculo de los índices del recurso hídrico.

Dedicatoria

Los autores dedicamos este trabajo a nuestras familias por su apoyo incondicional para llevar a cabo este desafío profesional.

Agradecimientos

El presente trabajo de grado fue financiado por la empresa Consultores en Ingeniería, Riesgos, Medio Ambiente y Cambio Climático – CIRMAC, a quienes agradecemos el apoyo brindado para el desarrollo y finalización de la Maestría en Cambio Globales y Riesgo de Desastres.

Resumen

El presente trabajo pretende evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas con poca o nula instrumentación hidrometeorológica, a partir de los modelos de circulación global (GCM) disponibles para Colombia, mediante la reducción de escala a partir de la técnica denominada downscaling estadístico, el cual permite la generación y construcción de series hidrometeorológicas temporales como insumo para los modelos de evaluación de los escenarios seleccionados.

El desarrollo del trabajo se realizará a partir del análisis de información primaria y secundaria y la utilización de herramientas de modelación hidrológica, herramientas de análisis espacial de cartografía temática y de evaluación de diferentes indicadores de recursos hídricos coberturas vegetales con el fin de evaluar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica, su repercusión en la demanda insatisfecha, sus posibles efectos en el régimen hidrológico del río Bitá y por otra parte establecer los efectos factores climáticos tales como la precipitación y la temperatura en el escenario de riesgo por desabastecimiento hídrico de la cuenca a través de los escenarios de cambio climático.

Como caso de estudio se ha propuesto la cuenca del río Bitá localizada en el Departamento de Vichada debido a su gran vulnerabilidad ante los posibles efectos del cambio climático como se aprecian en los resultados oficiales como la Tercera comunicación de Cambio Climático para Colombia y el Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía y por su particularidad al ser el complejo de humedales más grande del país que coincide con su delimitación de cuenca, para ser incluido en la lista de humedales de importancia Internacional Ramsar y la necesidad de desarrollar planes de instrumentos de planificación ambiental y su articulación con la planificación territorial de la zona.

Los resultados permitirán aportar al conocimiento de los tomadores de decisión en la generación de medidas de adaptación y mitigación del cambio climático con el fin de implementar a largo plazo una visión estratégica, que comprenda la oferta hídrica y se relaciona con el ecosistema y de

esta forma realizar una articulación en el desarrollo sostenible y el ordenamiento territorial de los municipios localizados en la zona, los sectores productivos y el medio ambiente, que contribuya a asegurar la seguridad hídrica en cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible - ODC y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – CMNUCC; así como, la implementación de medidas de protección, conservación y restauración que garanticen la resiliencia de estas áreas estratégicas en el país.

Palabras clave: Oferta Hídrica, Cambio Climático, Desabastecimiento, Indicadores de presión de recurso hídrico

Abstract

This work aims to evaluate the impact of climate change on the water supply in hydrographic basins with little or no hydrometeorological instrumentation, based on the global circulation models (GCM) available for Colombia, by reducing the scale using the technique called Statistical downscaling, which allows the generation and construction of temporary hydrometeorological series as input for the evaluation models of the selected scenarios.

The development of the work will be carried out from the analysis of primary and secondary information and the use of hydrological modeling tools, spatial analysis tools of thematic cartography and the evaluation of different indicators of water resources, vegetation cover in order to evaluate the impact of the climate change on water availability, its impact on unsatisfied demand, its possible effects on the hydrological regime of the Bita river and, on the other hand, establish the effects of climatic factors such as precipitation and temperature in the risk scenario due to water shortage of the watershed through climate change scenarios.

As a case study, the Bita river basin located in the Department of Vichada has been proposed due to its great vulnerability to the possible effects of climate change as seen in official results such as the Third Communication on Climate Change for Colombia and the Regional Plan Comprehensive Climate Change for the Orinoquía and for its particularity as it is the largest wetland complex in the country that coincides with its basin delimitation, to be included in the list of Ramsar wetlands of International importance and the need to develop plans of instruments of environmental planning and its articulation with the territorial planning of the area.

The results will make it possible to contribute to the knowledge of decision makers in the generation of measures for adaptation and mitigation of climate change in order to establish a long-term strategic vision that involves the supply of water and is related to the ecosystem and in this way carry out a synchronization in the territorial ordering and sustainable development of the municipalities

located in the area, the environment and the productive sectors, which contributes to guaranteeing water security in compliance with the Sustainable Development Goals - ODC and the Framework Convention of the United Nations on Climate Change - UNFCCC; as well as, the implementation of protection, conservation and restoration measures that guarantee the resilience of these strategic areas in the country.

keywords: water supply, Climate Change, water shortage, Water resource pressure indicators.

1. Introducción

Los efectos del cambio climático son variados dependiendo de la región, la capacidad adaptativa y el nivel de vulnerabilidad de cada país. Según los resultados de la Tercera Comunicación de Cambio Climático para Colombia, los escenarios de cambio climático proyectan que la temperatura promedio del aire en el país aumentará con respecto al período de referencia 1971-2000 en: 1.4°C para el 2011-2040, 2.4°C para 2041-2070 y 3.2°C para el 2071-2100 y los volúmenes de precipitación decrecerían entre un 15% y 36% para amplias zonas de las regiones Caribe, Andina, y Orinoquia. Además, existirían incrementos de precipitación hacia el centro y norte de la Región Pacífica (IDEAM-PNUD, 2015).

En este sentido, la Tercera Comunicación establece que la Región de la Orinoquia en general, según el escenario multimodelo presentará una disminución de precipitación cercana al 5%. En especial para el Departamento de Vichada, las diferencias estimadas en temperatura media se relacionan con un aumento de 0.94 °C para el periodo 2011-2040, 1.75 °C para el periodo 2041-2070 y 2.6 °C para el periodo 2071-2100. Esto podrá elevar la temperatura en cerca 2,6°C sobre el valor actual de referencia y se presentarán disminuciones en la precipitación hasta en 2% por debajo del valor de referencia actual, incluso se ha proyectado que, en el municipio de Puerto Carreño, ocurran disminuciones hasta en un 20%, zona donde se localiza la cuenca del río Bitá, objeto del presente estudio (CIAT y CORMACARENA, 2017).

El análisis de riesgo de la Tercera Comunicación (IDEAM-PNUD, 2015), presenta al Departamento de Vichada con riesgo medio por cambio climático. Es decir, en cuanto a las dimensiones analizadas, los temas seguridad alimentaria, infraestructura, salud, recursos hídricos y biodiversidad, deben priorizarse por parte del gobierno departamental, puesto que en su mayoría tienen valores muy altos, altos y medios de riesgo, y en conjunto tienen contribuciones altas al valor total de riesgo por cambio climático de los municipios. De igual manera, el departamento se ha visto afectado principalmente por eventos de inundación e incendios forestales, entre el período 1971 – 2015, han sido

registrados 46 reportes de inundación y 14 reportes de incendio forestal (representando respectivamente, el 67% y 20% del total de fenómenos y eventos reportados. (IDEAM-PNUD, 2015).

Por otra parte, El Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquia – PRICCO (CIAT y CORMACARENA, 2017), establece que los escenarios de cambio climático muestran que existirán cambios fuertes en el clima, especialmente en las temperaturas máximas, en un período muy corto de tiempo (en los próximos 20 años), se espera que la temperatura máxima anual se incremente en 1.63°C y la mínima en 1.53°C bajo el escenario RCP 4.5; mientras que los cambios proyectados para precipitación total serán ligeros, fluctuando entre -1% a 3% bajo el mismo escenario. Para el caso de la cuenca hidrográfica del río Bitá se registrarán pérdidas en el aporte al caudal hasta de 140 mm/año por unidad de respuesta hidrológica, esta zona corresponde a los municipios de Puerto Carreño y La Primavera.

En este sentido, estos dos estudios (IDEAM-PNUD, 2015), (CIAT y CORMACARENA, 2017), establecen que los humedales y esteros podrán verse afectados, así como la biodiversidad asociada. Los sistemas agrícolas dependientes de suelos con nivel freático bajo podrán ser afectados en costos de mantenimiento, así como el sector ganadero con interacciones de baja precipitación en situaciones de sequía. La altillanura podrá verse afectada por incendios en ciclos de baja precipitación. La biodiversidad asociada a ecosistemas de sabana podrá verse afectados por estrés térmico, particularmente aquellos que no pueden migrar altitudinalmente para adaptarse a mejores temperaturas para su reproducción. Podrán verse afectados los sistemas de producción de alimentos, en especial aquellos de comunidades locales y minorías étnicas.

El PRICCO presenta 24 medidas departamentales con 4 líneas de políticas estratégicas dentro de las que se destaca la llamada “hidropolítica basada en la conservación” que pretende el aseguramiento de la calidad y provisión del agua para mantener la salud de los ecosistemas y sustentar las actividades productivas humanas y dentro de la estrategia mencionada, la medida de adaptación denominada

“Planificación hídrica bajo escenarios de cambio climático”, busca determinar las cuencas que deben ser priorizadas para incluir la variable de cambio climático en su planificación y ordenación.

A pesar que sobre la cuenca hidrográfica del río Bitá en el momento se están desarrollando dos instrumentos de planificación ambiental como lo son el Plan de Ordenación de la Cuenca Hidrográfica del río Bitá y el Plan de Manejo Ambiental complejo de humedales de la cuenca del río Bitá, estos dos instrumentos adolecen de la incorporación de la evaluación de los escenarios de Cambio Climático debido en gran parte a que actualmente la Guía Técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas no establecen unos lineamientos claros acerca de su abordaje e integración de este componente en las diferentes fases de este instrumento y la Guía Técnica para la Formulación de Planes de Manejo para Humedales en Colombia apenas menciona el cambio climático como un factor natural externo al humedal. Así mismo, la cuenca no cuenta con instrumentación hidrometeorológica, la única estación cercana se encuentra en la parte baja de la cuenca la cual corresponde con la estación climatológica principal localizada en el Aeropuerto de Puerto Carreño, situación que genera todo un reto para realizar cualquier tipo de acople con los escenarios de cambio climático globales.

Conviene subrayar, que de acuerdo con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (DNP, 2012), las consideraciones del cambio climático en los diferentes sectores del desarrollo deben ser incorporadas desde la fase de planeación. En este sentido, tanto el Plan Nacional de Desarrollo, los planes de desarrollo a nivel local y departamental, así como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) y los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), entre otros, deberían integrar la evaluación del cambio climático. Los efectos del cambio climático en términos de variabilidad climática y eventos climáticos extremos aumentan la incertidumbre y la complejidad de la Gestión del Riesgo de Desastres y la atención de emergencias, situación desfavorable para los municipios donde,

debido al impacto del cambio climático, se magnificarán los impactos del clima sobre la población, la biodiversidad, los sectores productivos, la infraestructura y los recursos hídricos.

En este sentido, el presente trabajo propone evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas con poca o nula instrumentación hidrometeorológica, a partir de los modelos de circulación global (GCM) disponibles para Colombia, mediante la reducción de escala a partir de la técnica denominada downscaling estadístico, el cual permite la generación y construcción de series hidrometeorológicas temporales como insumo para los modelos de evaluación de los escenarios seleccionados, para este fin, se ha desarrollado una metodología en 7 fases que permiten cumplir los objetivos planteados y responder las preguntas de investigación, mediante la aplicación de una metodología tipo investigación aplicada.

El trabajo se divide en 6 partes, la primera enfocada a dar una presentación del tema con su respectiva justificación, preguntas de investigación y objetivos planteados, la segunda parte se hace una descripción del marco teórico en donde se presentan los antecedentes, el marco conceptual, geográfico y legal que sustentan la investigación, un tercera parte en donde se plantea la metodología implementada y se presentan los resultados obtenidos por cada fase metodológica planteada y una última fase que recoge la discusión de los resultados obtenidos, junto con las conclusiones y recomendaciones que se plantean luego del desarrollo del trabajo de grado, acompañado de las referencias bibliográficas empleadas a lo largo del documento.

El presente trabajo permite evidenciar que para cuencas hidrográficas con grandes extensiones y con poca o nula instrumentación hidrometeorológica es posible la utilización bases de datos climáticas de productos que utilizan datos para su construcción (satelitales y/o estaciones in situ) como información base y la aplicación de modelos de circulación global aplicables para las condiciones propias del territorio, situación que permite apreciar diferencias respecto a los modelos aplicables a nivel nacional que son utilizados para ser integrados en los instrumentos de planificación territorial y

ambiental y que pueden generar subestimaciones o sobrestimaciones de los escenarios de riesgo de cambio climático al ser aplicados a escalas locales.

2. Justificación

De acuerdo con lo expuesto en el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 (ONU-Agua, 2020) el cambio climático aumenta la variabilidad del ciclo del agua, lo que dificulta la previsión de la disponibilidad de recursos hídricos, disminuye la calidad del agua, aumenta su escasez y reduce la previsibilidad de la disponibilidad de agua; afecta la calidad del agua y amenaza el desarrollo sostenible y la biodiversidad en especial los bosques y los humedales afectando los servicios ecosistémicos que dependen del agua, como su purificación, la captación, almacenamiento de carbono, la protección natural contra las inundaciones y servicios de soporte para el ser humano.

Por otra parte, el uso del agua a nivel mundial, en los últimos cien 100 años se ha multiplicado por seis y sigue incrementándose constante aproximadamente a un 1% cada año debido al crecimiento permanente tanto demográfico como de las ciudades que generan un aumento en la demanda hídrica (UNESCO, 2020), al desarrollo económico, la intensificación de la producción agrícola, pérdida de biodiversidad y el cambio climático que afectará la disponibilidad, calidad y cantidad de agua para las necesidades humanas básicas (UNESCO, 2020). Así mismo el Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático – IPCC (IPCC, 2014) evalúa los impactos hidrológicos debidos al cambio climático, en donde se menciona que se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y aguas subterráneas en la mayoría de las regiones secas subtropicales, con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores.

En consecuencia, como lo menciona la UNESCO (2020), en América Latina y el Caribe la variabilidad climática y los eventos extremos que aumentan escenarios de riesgo de desastres como los incendios de cobertura vegetal, que están afectando gravemente a la región, y para Colombia se prevé que el cambio climático podría generar efectos negativos sobre los recursos hídricos en el territorio nacional (Alarcón, Zafra, y Echeverri, 2019) y que el cambio más importante para el escenario de disminución de la oferta hídrica se relacionaría con el aumento en la irregularidad temporal de los

caudales, ocasionando una oferta hídrica mucho más variable que la actual (Domínguez, 2010), esto también asociado al aumento de la severidad de los fenómenos extremos.

Como demuestran los diferentes estudios, el cambio climático está afectando cada vez al ciclo hidrológico global, pero a nivel nacional o local sigue existiendo mucha incertidumbre para pronosticar su impacto a escalas espaciales y temporales menores debido a que el desarrollo de los recursos hídricos como su gestión, han sido llevados a cabo a partir de la presunción de estacionalidad de las series temporales hidrológicas (Milly, 2008), los datos hidrológicos históricos proporcionan información valiosa sobre los procesos y eventos, estos no son indicativos del régimen hidrológico futuro. Además, incluso cuando se detectan cambios hidrológicos, la atribución de causas, incluido el cambio climático, a menudo sigue siendo incierta. (ONU-Agua, 2019).

El impacto del cambio climático sobre los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y sobre la estimación de la producción hídrica de la misma se reportan en varios casos de estudios a nivel global en la literatura (Boyer, et al, 2010), (Hamlet, Salathé, y Carrasco, 2010), (Fang, et al, 2015), (Luo, et al, 2017), (Vandana, et al, 2019), (Abeysingha, Islam, y Singh, 2020)), aunque todavía no hay un consenso general sobre las herramientas óptimas y metodologías a implementar para hacer esta clase de análisis, generalmente este tipo de estudios consisten en procesar resultados de escenarios de cambio en las variables climáticas provenientes de modelos de circulación regional (MCR) –precipitación, temperatura, humedad relativa, etc.– como entrada en modelos hidrológicos a diferentes escalas temporales para algunos estudios desarrollados en nuestro continente (Martínez, Polioptro, y Patiño Gómez, 2012), (Villa, 2013), (Dolores y Huarhua, 2015), (Copana Pacuara, 2018)) y a nivel nacional (Ruíz Carrascal, 2018), (Rivera y América, 2018), (Guerrero, 2018), (Pimiento y Restrepo, 2018), (Revueltas, et al, 2020), (Avellaneda, 2020)).

A nivel nacional, se han realizado esfuerzos para proteger ecosistemas estratégicos como una medida de adaptación al cambio climático, para lo cual mediante el Decreto 1235 de 2018 se designó el

complejo de humedales de la cuenca del río Bita para ser incluido en la lista de humedales de importancia Internacional Ramsar, la cual se encuentra localizada en el Departamento del Vichada y es el hidrosistema más grande protegido del país con una extensión aproximada del 824500 Ha (CORPORINOQUIA, 2021) que incluye toda una subzona hidrográfica de Colombia y más del 95% de la cuenca del río Bita está intacta. (WWF Colombia, 2020)

El río Bita tiene una longitud de 710 Km desde su nacimiento en el municipio de La Primavera, hasta su desembocadura en el río Orinoco en el municipio de Puerto Carreño, en un referente a nivel internacional en cuanto a su biodiversidad de acuerdo con lo mencionado en el Plan de Ordenación del Recurso Hídrico POMCA del río Bita (CORPORINOQUIA, 2021) porque la cuenca alberga al menos 1.474 especies de plantas, cerca de 63 mamíferos, 59 especies de reptiles, 201 aves, 30 tipos de anfibios, 254 clases de peces y existe un predominio de coberturas naturales con el 84% del área total de la cuenca, frente a un 16% del área que está ocupada por coberturas de origen antrópico.

Sin embargo, esta área protegida no cuenta con una instrumentación hidrometeorológica que permita medir y registrar los cambios en las diferentes variables climáticas que permitan monitorear los cambios de las interacciones de los subsistemas biofísico, económico, social y cultural que se desarrollan en las cuencas hidrográficas. La situación mencionada, genera un escenario propicio para la implementación de los modelos de cambio climático lo cual permitirá establecer escenarios tendenciales en cuanto a la producción hídrica de la cuenca y escenarios de riesgo como los incendios forestales con el propósito de evaluar la eficacia de las medidas propuestas en el contenido programático del Plan de Manejo Ambiental del sitio Ramsar, el Plan de Ordenación de la Cuenca Hidrográfica y el Plan de Ordenamiento Pesquero y su complementación con el planteamiento de medidas de adaptación y mitigación establecidas en el Plan Regional de Cambio Climático para la Orinoquia PRICCO (CIAT y CORMACARENA, 2017).

De igual forma, por medio de este trabajo de investigación se busca aportar el conocimiento adquirido a los tomadores de decisión, en relación a la integración de los escenarios de cambio climático con el fin de implementar a largo plazo una visión estratégica, que comprenda la oferta hídrica y el escenario de incendio por coberturas vegetales. De esta forma, se busca establecer una articulación en el desarrollo sostenible y el ordenamiento territorial de los municipios, los sectores productivos y el medio ambiente, que contribuya a asegurar la seguridad hídrica en el país en cumplimiento de los Objetivos del Desarrollo Sostenible - ODC y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – CMNUCC; así como, la implementación de medidas de protección, conservación y restauración que garanticen la resiliencia de estas áreas estratégicas en el país.

3. Preguntas de investigación

¿Es posible evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas poco instrumentadas?

¿Es factible evaluar la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Bitá bajo los escenarios de cambio climático a partir de la estimación de escenarios para la oferta hídrica y la aplicación de sistemas de indicadores hídricos?

¿Qué medidas de adaptación y mitigación de cambio climático se deberían establecer para la cuenca hidrográfica del río Bitá y cómo debe ser su incorporación dentro de los instrumentos de planificación territorial y ambiental?

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas poco instrumentadas, tomando como caso de estudio la Cuenca hidrográfica del río Bitá en el Departamento del Vichada.

4.2. Objetivo Específicos

Generar las series hidrometeorológicas como insumo para la evaluación de la oferta hídrica, con base en los escenarios de cambio climático globales disponibles para Colombia y su desescalamiento estadístico para cuencas hidrográficas con poca o nula instrumentación hidrometeorológica.

Evaluar la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Bitá bajo los escenarios de cambio climático a partir de la estimación de escenarios para la oferta hídrica y la aplicación de sistemas de indicadores hídricos

Establecer las medidas de adaptación y mitigación de cambio climático y su incorporación dentro de los instrumentos de planificación territorial y ambiental.

5. Marco teórico

5.1. Antecedentes

5.1.1. *Conceptos base del cambio climático*

El progreso económico y material de la humanidad en el último siglo podría catalogarse como prodigioso, ha permitido que una parte significativa de la población actualmente viva en condiciones por lo menos mínimas de bienestar y calidad de vida. Sin embargo, este modelo de desarrollo ha implicado un mayor consumo energético y una explotación intensiva de los recursos, que como consecuencia ha producido alteraciones en los diversos ecosistemas del planeta e incluso modificaciones en el sistema climático (Steffen, et al, 2015).

Para dar un significado del concepto de cambio climático, es importante iniciar con la definición de conceptos base clave como lo son tiempo atmosférico y clima. El concepto de tiempo atmosférico hace referencia al estado en el cual se encuentre la capa atmosférica en un instante o momento dado en un territorio específico, el cual es poco predecible, pero observable y medible con instrumentos meteorológicos en función de variables como la temperatura, precipitación nubosidad, entre otros descriptores (SeNaMHi, 2018). De otra parte, el concepto de clima se relaciona con el promedio o tendencia que resulta de integrar series de tiempo atmosférico a lo largo de períodos de observación de varios años que, de acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, (IPCC, 2018), debe corresponder por lo menos a 30 años. El clima se considera como predecible, sin embargo, no se mide o registra directamente, es decir, clima y tiempo atmosférico manejan escalas temporales muy diferentes.

Otro aspecto íntimamente ligado al cambio climático tiene que ver con el sistema climático global y su complejidad, dada la gran variedad de componentes que intervienen en los procesos energéticos, actividad biológica, física, humana, corrientes marinas, entre otros y en general todos los

procesos del ciclo hidrológico que operan a diferentes escalas geográficas y temporales e interactúan entre sí.

En este sentido, puede considerarse que el cambio climático es una respuesta a un forzamiento externo al sistema climático, como por ejemplo cambios en la intensidad solar o los gases de efecto invernadero, acentuado por las retroalimentaciones internas del sistema, donde los mismos mecanismos amplifican o reducen los efectos de los cambios iniciales. Por lo tanto, este concepto hace referencia a que el concepto de cambio climático se refiere a una modificación del balance energético global en una escala de tiempo considerablemente significativa del orden de décadas a miles de años (González, 2020).

Estos cambios o modificaciones del balance energético global, se ven reflejados no solamente en los datos estadísticos asociados a los promedios de las variables meteorológicas, como por ejemplo la temperatura, sino también implica cambios en las distribuciones temporales y los valores extremos de dichas variables meteorológicas, es decir se amplifican los rangos de los valores de estos parámetros meteorológicos.

Finalmente, en referencia al concepto de cambio climático, vale la pena diferenciarlo de otros elementos asociados a clima con lo que conserva afinidad. El efecto invernadero, por ejemplo, se refiere a un fenómeno natural en la atmósfera que genera una capa que protege al planeta de extremos de temperatura más baja, se estima que sin esta capa de protección la temperatura promedio sería aproximadamente 33 grados centígrados más baja (Schmidt, et al, 2010), por tanto, los gases que conforman esta capa retienen el calor que se desvía de la superficie terrestre hacia el espacio y permite tener la temperatura promedio en la tierra de aproximadamente 16 grados centígrados. Otro concepto relacionado es el de calentamiento global, asociado a únicamente al aumento promedio de la variable de temperatura. Como agrupador de estos aspectos tenemos el concepto de cambio ambiental global, donde se visibiliza toda la problemática ambiental, en donde el cambio en el clima es uno de los

múltiples problemas que están interconectados a otras problemáticas como los cambios en el uso del suelo, especies invasoras, sobreexplotación, entre otros, en donde el clima hace parte de la red de la problemática ambiental (Adger, et al, 2005). La **Figura 1** expresa la integralidad de los conceptos mencionados.



Figura 1. Concepto agrupado de Cambio Ambiental Global.

Fuente: Adger, et al, 2005.

5.1.2. Marco global de cambio climático

En la actualidad, de acuerdo con organizaciones como el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2018), el Foro Económico Mundial (WEF, 2020) y autores como Bouwer (2010) y Carmi (2012) mencionan que el mundo se enfrenta a desafíos climáticos sin precedentes y que aún no han sido completamente desarrollados en las políticas públicas nacionales. Gran parte de estos desafíos se relacionan con cambios globales que se conectan directamente con las actividades humanas como la industrialización desenfrenada, urbanización sin control, deforestación y pérdida de

biodiversidad, actividades mineras intensas, entre otros, que está induciendo a una trayectoria insostenible desde un punto de vista ambiental para garantizar la permanencia de los recursos ecosistémicos y del hombre. En este sentido, el gran desafío de la humanidad es el cambio climático y la creciente frecuencia y violencia de los fenómenos que ese cambio conlleva en especial que se relaciona con la seguridad hídrica.

A medida que crece el consenso mundial sobre la necesidad de la adaptación al cambio climático, reducir las vulnerabilidades e impactos se ha convertido en una prioridad igual de importante a los más comunes esfuerzos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de medidas de mitigación. Varios académicos que relacionan los temas climáticos y los socioeconómicos, lo cual ha sido condensado por Riahi (2017), han planteado que los escenarios de cambio climático relacionados con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se pueden interpretar como imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento para analizar de qué manera influirán ciertos factores en las emisiones futuras.

Bajo este contexto, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), promovió la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático o Panel Intergubernamental del Cambio Climático, conocido por el acrónimo en inglés IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), cuya misión es proveer al mundo con una opinión objetiva y científica sobre el cambio climático, sus impactos y riesgos naturales, políticos y económicos y las opciones de respuesta posibles (Weart, 2011). Fue fundada en 1988 y desde entonces elabora informes que contribuyen al trabajo de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el mayor tratado internacional sobre el cambio climático. El objetivo de la CMNUCC es "estabilizar las concentraciones de gases invernaderos en la atmósfera a un nivel que prevenga la interferencia antrópica peligrosa al sistema climático".

El IPCC ha publicado cinco informes que cubren la "información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender la base científica del riesgo del cambio climático inducido por el hombre, sus potenciales impactos y opciones para la adaptación y mitigación". En estos informes científicos y expertos contribuyen de modo voluntario, que son a su vez revisados por representantes de todos los gobiernos. El Quinto Informe de Evaluación (AR5) se entregó por etapas, el primero fue el informe del Grupo de trabajo I sobre los fundamentos físicos, basado en 9200 estudios revisados por pares, posteriormente se publicó el volumen "Impactos, adaptación y vulnerabilidad" y finalmente se publicó el volumen "Mitigación del cambio climático". El AR5 allanó el camino para la discusión de un tratado global y jurídicamente vinculante para reducir las emisiones de carbono en la Conferencia sobre Cambio Climático de la ONU en París de finales de 2015.

5.1.3. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático

A nivel nacional se cuenta con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) como la entidad encargada del desarrollo de conocimiento científico relacionado con el cambio climático y como autoridad científica, el IDEAM elabora las Comunicaciones Nacionales de Cambio Climático, siendo la Tercera Comunicación la más reciente, la cual fue publicada en el año 2015.

La Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático presenta los nuevos escenarios de cambio climático para Colombia, con vigencia 2011-2100, los cuales están definidos de acuerdo con las trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés) determinados por el IPCC en su quinto informe. La finalidad de los RCP es estimar el posible comportamiento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) proyectado hasta el año 2100, por lo tanto, cada una de las cuatro trayectorias contiene una serie de suposiciones socioeconómicas, tecnológicas, biofísicas y de forzamiento radiativo diferentes dependiendo del volumen de GEI emitidos en los próximos años (IDEAM, et al, 2015).

En resumen, los cuatro escenarios de cambio climático planteados para Colombia pueden observarse en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Escenarios de cambio climático planteados para Colombia

Escenario	Forzamiento Radiante (W/m ²)	CO _{2eq} atmosférico (ppm)	Anomalia de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

Particularmente para el departamento del Vichada, en la Tercera Comunicación se ha estimado un incremento en la temperatura media en un rango entre 2,6°C y 2,7 °C para el escenario 2071 a 2100 con respecto a la temperatura promedio de referencia entre 1976 a 2005. Para el caso de la precipitación, se estima un descenso en dichos niveles cercanos al 2% para el escenario 2071 a 2100 con respecto a la precipitación promedio de referencia entre 1976 a 2005, como se puede ver en la **Figura 2**. (IDEAM, et al, 2015).

En síntesis, La Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático contiene información relevante para conocer la vulnerabilidad y adaptación del país, las estimaciones de GEI en el país y su aporte a la emisiones mundiales, las medidas adelantadas para la reducción de los GEI, análisis de los riesgos tanto para la población como para los territorios asociados a los efectos de cambio climático, medidas adelantadas para reducir la vulnerabilidad de la población y los territorios e identificación de necesidades de financiación, acceso a tecnología y fortalecimiento de capacidades.

De acuerdo con el análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático del estudio mencionado anteriormente, el departamento del Vichada presenta un riesgo alto (índice de 0.35) en la

afectación al recurso hídrico, riesgo muy alto (índice de 0.44) en seguridad alimentaria y riesgo alto (índice de 0.29) en biodiversidad en todos sus municipios. Como se puede observar en la Figura 3.

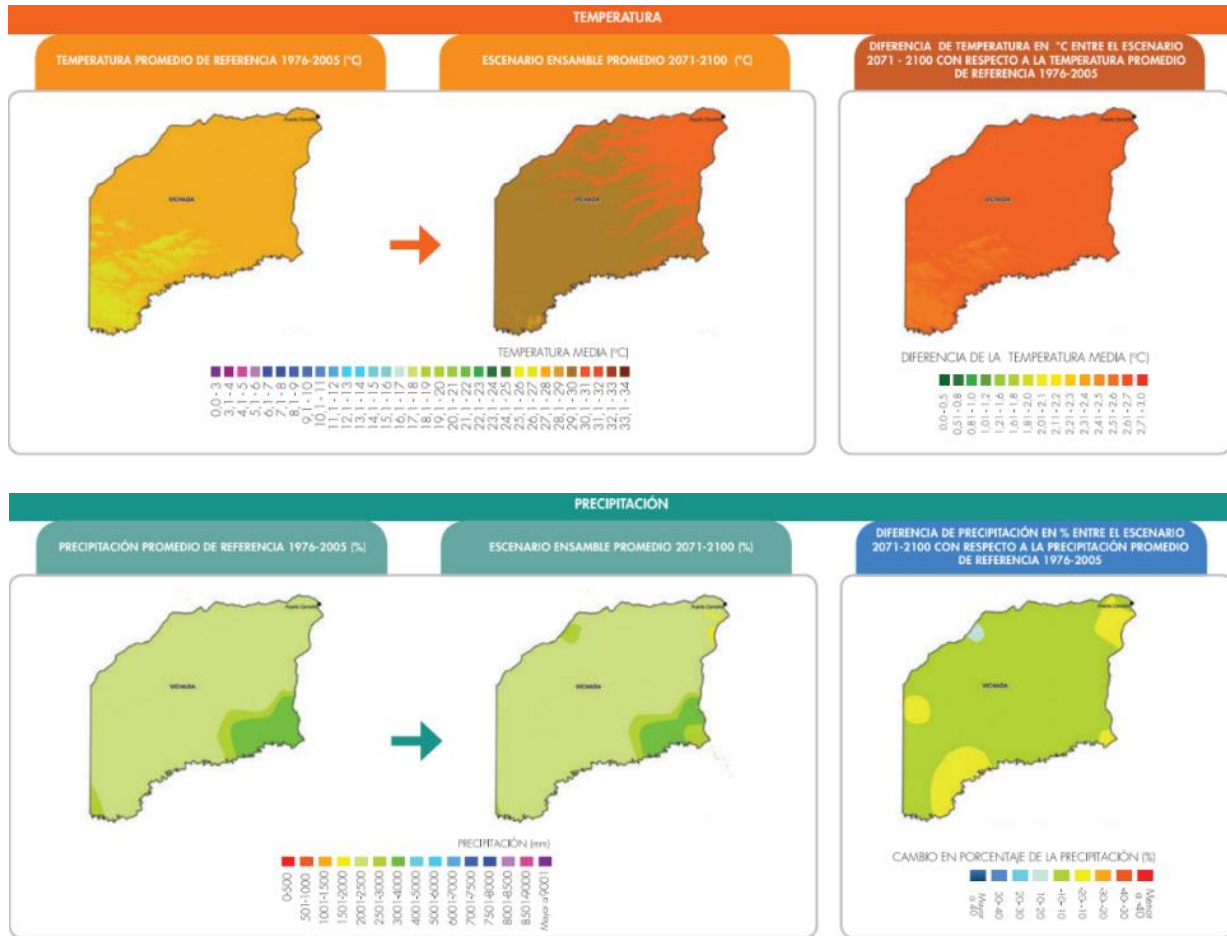


Figura 2. Resultados para el departamento del Vichada conforme la Tercera Comunicación.

Fuente: IDEAM, et al, 2015.

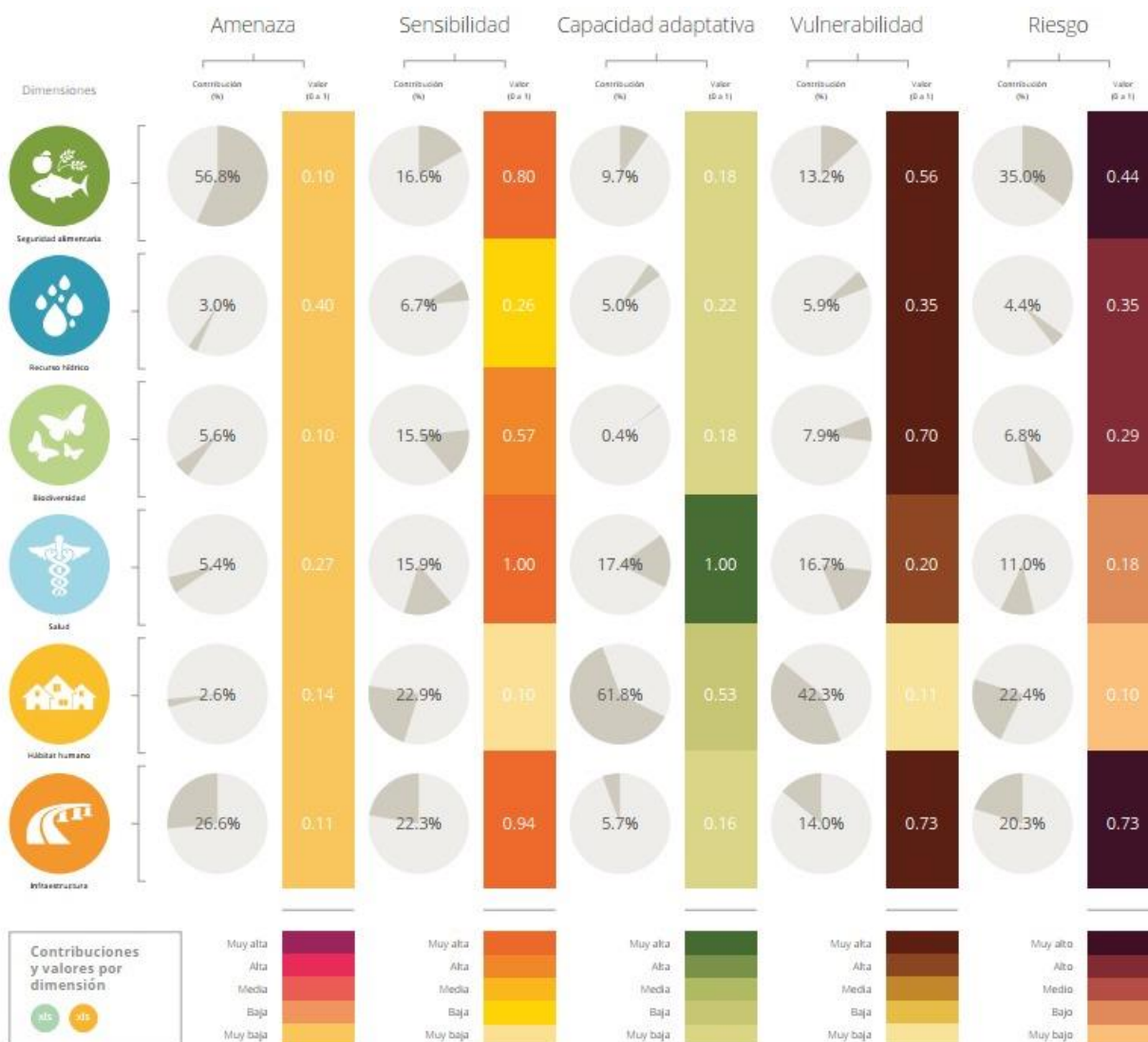


Figura 3. Índices de factores de riesgo por cambio climático para diferentes dimensiones en el departamento del Vichada.

Fuente: IDEAM, et al, 2015.

5.1.4. Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía (PRICCO)

Corresponde a una iniciativa regional de adaptación y mitigación liderada por los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada bajo la Coordinación de la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (Cormacarena), con el fin de permitir avanzar en la comprensión de los conceptos básicos de cambio climático y los impactos de este fenómeno en la región y contribuir con la integración del clima y el cambio climático en los procesos de gestión del desarrollo

con énfasis en el fortalecimiento institucional y en la coordinación de acciones entre los múltiples actores e instituciones presentes en el territorio (Ciat y Cormacarena, 2018).

La estimación de los escenarios de cambio climático para la Orinoquia en el PRICCO partió de los RCP de la AR5, considerando solamente los escenarios 2.6, 4.5 y 8.5. Para el caso del Vichada, se proyectan para 2040 precipitaciones con ligeras fluctuaciones entre -5% a 5% (bajo el escenario de emisiones RCP 4.5) con reducción hacia el noreste del departamento. Los cambios en precipitación para los tres escenarios son muy similares, solo mostrando diferentes magnitudes puesto que para RCP 2.6 (escenario más optimista) se proyectan cambios de entre -3% a 6% y para RCP 8.5 (escenario más pesimista) entre -4% a 8%.

La temperatura máxima anual se proyecta a incrementarse entre 1,6°C, bajo el escenario RCP 4.5, con mayores tasas de incremento hacia el noreste del departamento. Debido a que la tasa de crecimiento es mayor en temperatura máxima, se esperan temperaturas extremas calientes más frecuentes y frías menos frecuentes, además de un rango diurno de temperatura progresivamente mayor. En el contexto nacional, el departamento del Vichada presenta uno de los mayores aumentos de temperatura de todo el país (IDEAM, et al, 2015). Para otros escenarios de emisiones la temperatura máxima se proyecta que aumente entre 0.6-1.5°C (RCP 2.6) y 1.1-2.3°C (RCP 8.5). Estas variaciones se pueden observar en la **Figura 4**.

Dentro de los aspectos a destacar del PRICCO, corresponde a la evaluación del impacto del cambio climático en el recurso hídrico, que para la Orinoquia representa consecuencias negativas como pérdidas de cultivos, inundaciones, alteraciones en ecosistemas, entre otros. Para el Vichada, y particularmente para la cuenca del río Bitá, el modelo de producción hídrica para la línea base presenta una producción media y homogénea, sin embargo, en los modelos aplicados para los tres escenarios de RCP, se identifican pérdidas en la producción hídrica a lo largo de toda su extensión.

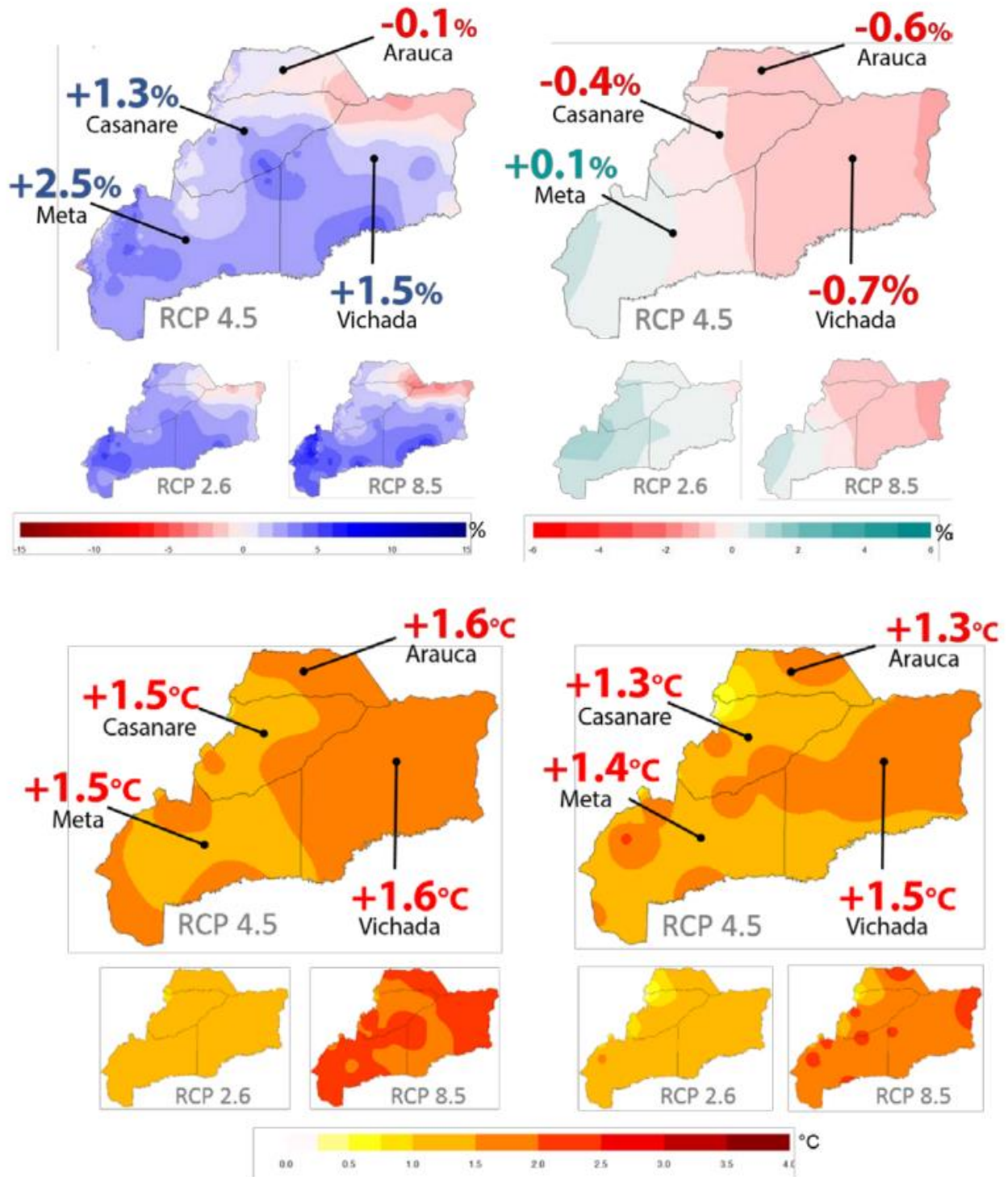


Figura 4. Resultados para el departamento del Vichada conforme el PRICCO.

Fuente: Ciat y Cormacarena, 2018.

5.1.5. Estudio Nacional del Agua

Este estudio suministra para las regiones hidrográficas (y de manera particular en las áreas y subzonas hidrográficas) determinadas para el país, el estado actual y futuro de los recursos hídricos y su distribución temporal y espacial, mediante el desarrollo de escenarios en donde se evalúa oferta, dinámica, demanda hídrica, calidad, riesgo hidrológico y la intervención antrópica de la sociedad, las presiones al recurso hídrico asociadas al uso del agua en diferentes sectores y la identificación de las cabeceras municipales que son susceptibles al desabastecimiento en épocas secas.

El ENA tiene como fundamento el ciclo hidrológico expresado a partir de un balance hídrico en donde se evalúan el comportamiento de las variables de precipitación, evapotranspiración y escorrentía que se presentan a lo largo de las cuencas hidrográficas, para una escala temporal anual y mensual en condiciones hidrológicas (medias, secas y húmedas) (IDEAM, 2018).

La oferta hídrica se puede entender diferenciando los conceptos de oferta hídrica total, el cual representa el volumen de agua que puede generar una cuenca hidrográfica y, oferta hídrica disponible, que corresponde a la cantidad de agua disponible para diferentes usos del agua descontando el caudal ambiental, el cual se estima para no afectar los ecosistemas asociados a los cuerpos lenticos ó loticos. Además, evalúa la demanda hídrica, que corresponde con la cantidad de agua que se necesita para los diferentes usos asociados a las actividades económicas y domésticas.

El ENA permite identificar las temporadas donde se presenta un exceso o déficit de agua, mediante la comparación de la demanda hídrica proyectada con la oferta hídrica disponibles, bajo diferentes condiciones hidrológicas. Los resultados permiten observar que la agricultura es el sector con mayor demanda del recurso hídrico, con un 43%, seguido del sector energía con el 23% y posteriormente el sector de la minería con el 8% (IDEAM, 2018). En la **Figura 5**, se presentan los principales resultados para la cuenca del río Bitá del Estudio Nacional del Agua.

Zonificación hidrográfica			Oferta Total			Coeficiente de variación de oferta anual	Oferta disponible			Usos del agua			Calidad del agua - Cargas contaminantes			Transformación de zonas potencialmente inundables		
SZH	Nombre de subzona hidrográfica	Área SZH (Km ²)	Año medio (millones m ³)	Año seco (millones m ³)	Año húmedo (millones m ³)		Año medio (millones m ³)	Año seco (millones m ³)	Año húmedo (millones m ³)	Demanda hídrica (millones m ³)	Huella hídrica azul (millones m ³)	Huella hídrica verde (millones m ³)	DBO (t/año)	DQO (t/año)	SST (t/año)	Área total de la ZPI (Km ²)	Área transformada* en la ZPI (Km ²)**	Transformación (%)
Área Hidrográfica Orinoco																		
Zona Hidrográfica Directos Orinoco																		
3801	Río Bitá	8245	11250.0	6251.1	19187.6	0.07	8737.6	4855.1	14902.5	9.33	6.35	172.83	S.I.	S.I.	S.I.	1994.07	41.04	2.06

Zonificación hidrográfica	Nombre de Subzona Hidrográfica	Índice de Regulación Hídrica (IRH) Año medio		Índice de Uso del Agua (IUA)				Índice del Agua no Retomada a la Cuenca (IARC)		Índice de Presión Hídrica al Ecosistema (IPHE)		Índice de Eficiencia en el Uso del Agua (IEUA)		Erosión hídrica Potencial de sedimentos (m ³ /año)		Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH)		Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (IACAL)	
		Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Valor	Categoría	Año medio	Año seco	Año medio	Año seco
Área Hidrográfica Orinoco																			
Zona Hidrográfica Orinoco Directos																			
3801	Río Bitá	0.71	Moderada	0.11	Muy Bajo	0.19	Muy Bajo	0.00	Muy Bajo	0.02	Muy Bajo	0.49	Alto	0.6	Muy Baja	Baja	Baja	Baja	Baja

Figura 5. Principales resultados para la cuenca del río Bitá del Estudio Nacional del Agua.

Fuente: Ideam, 2018.

5.1.6. Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bita

En el marco de los procesos de ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas, cuyo marco normativo lo establece el decreto 1076 de 2015, se ha considerado la priorización de aquellas áreas fundamentales para el desarrollo socio ambiental. En tal sentido, luego de varios proyectos ejecutados en la cuenca del río Bita, en el marco de acciones interinstitucionales y la participación de ONG's ambientales y algunas empresas privadas, muchas de estas acciones derivaron en definir lo que se denominó la Alianza por el río Bita. En tal sentido, en 2014 en el municipio de Puerto Carreño, el Instituto Humboldt, la Gobernación del Vichada, la Fundación Omacha, la Fundación Palmarito, la Fundación Orinoquia, WWF, Corporinoquia, Parques Nacionales Naturales, la Reserva Natural La Pedregosa y la Fuerza Naval de Oriente de la Armada Nacional, suscribieron un Memorando de Entendimiento, en el que las partes expresaron su intención de trabajar en el establecimiento del río Bita como el primer río protegido de Colombia, y para eso, adelantar una estrategia que conlleve la formulación y desarrollo coordinado del proyecto.

Para tal fin, Corporinoquia decidió priorizar acciones enmarcadas en la Cuenca y declararla en Ordenación, para que en ejecución de las acciones normativas definidas y acogiendo lo dispuesto en la Guía Técnica de POMCAS formulada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2014, se adelantara el proceso de ordenación y manejo de la cuenca del río Bita (Consortio Río Bita, 2018).

Finalmente, producto del trabajo desarrollado para la formulación del POMCA del Río Bita, se estableció como objetivo conservar las condiciones ambientales de la cuenca del río Bita y su capacidad de oferta de bienes y servicios ambientales. Para ello, se definieron como estrategias para la cuenca asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico, promover el uso y manejo sostenible de los recursos naturales renovables, conservar los ecosistemas estratégicos y la biodiversidad, fortalecer la gestión del

riesgo y reducir la vulnerabilidad de la cuenca y formar y fortalecer a los actores en la gobernabilidad ambiental de la cuenca. La delimitación de la cuenca del río Bita puede verse en la **Figura 6**.

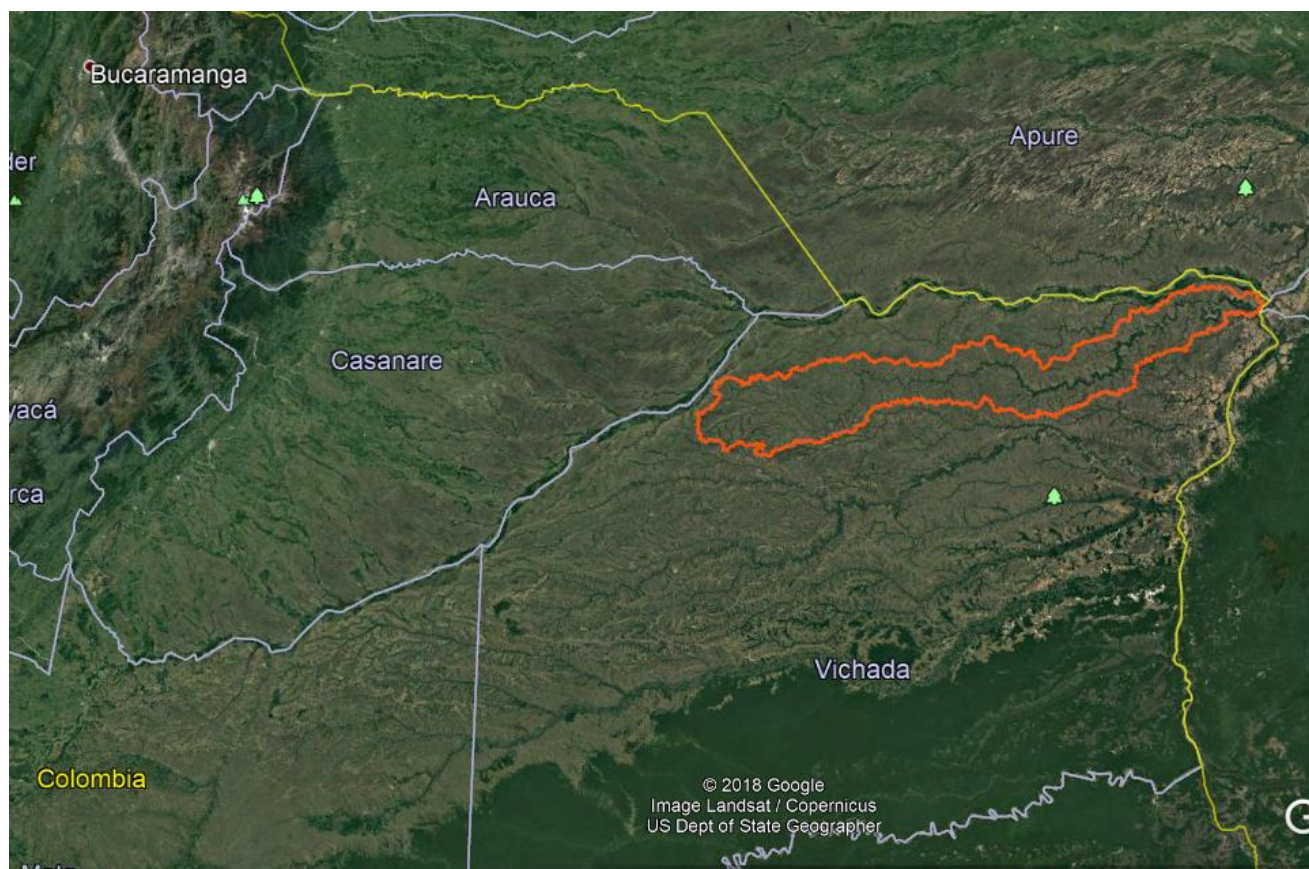


Figura 6. Cuenca río Bita sobre área del departamento del Vichada - Imagen servicio Google Earth.

Fuente: Consorcio Río Bita, 2018.

5.2. Marco conceptual

5.2.1. Cambio climático

5.2.1.1 Escenarios de cambio climático

Un escenario es una descripción estimable sobre cómo puede desarrollarse el futuro. Dicha descripción está basada en un conjunto de variables y supuestos sobre fuerzas y relaciones de cambio claves, que pueden originar un conveniente posible estado futuro sobre algo. Bajo este contexto un escenario de cambio climático es una visión o representación futura del clima que se observaría bajo una concentración estimada de gases de efecto invernadero. No obstante, el verdadero objeto de

realizar escenarios es evaluar un amplio espectro de posibilidades acerca del comportamiento del clima. (IDEAM, et al, 2015)

Los modelos climáticos necesitan información relacionada con la evolución en la concentración de las especies radiativamente activas, y algunos necesitan información adicional acerca de la evolución en el tiempo del uso del suelo y la cobertura vegetal. La comunidad científica ha identificado escenarios específicos de emisiones, como rutas admisibles (plausibles) hacia la consecución de cada trayectoria de forzamiento radiativo. Estos escenarios son llamados "trayectorias representativas de concentración" (RCP, por sus siglas en inglés), en donde la palabra "representativa" significa que cada RCP proporciona sólo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características de ese forzamiento radiativo. El término "trayectoria" hace referencia en que no sólo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la vía que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado.

Los RCP se basan en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono (BID, 2016). Estos representan el forzamiento radiativo, es decir la medida acumulativa de las emisiones antropogénicas de GEI de todas las fuentes expresadas en vatios por metro cuadrado (IPCC, 2017). Fueron desarrollados en 4 líneas evolutivas diferentes, cada una de ellas representa un cambio (o tendencia) demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental que pueden ser positivos o negativos.

Esto quiere decir que cada RCP representa solo uno de los muchos escenarios que pueden conducir a las características de un determinado forzamiento radiativo, en ese sentido el nuevo proceso en paralelo comienza con la selección de cuatro RCPs (2.6, 4.5, 6.0 y 8.5), cada uno corresponde a un camino de Forzamiento Radiativo específico. Ver **Tabla 1**.

Los 4 RCP fueron seleccionados dentro de aproximadamente 30 posibles trayectorias representativas (**Figura 7**). En la parte izquierda se muestra el forzamiento radiativo en W/m^2 de los candidatos, y todos cumplen los factores claves que afectan el forzamiento radiativo. Se puede apreciar que los RCPs seleccionados comprenden una gama amplia de escenarios de forzamiento radiativo existente en la literatura científica para el año 2007. En la parte derecha de la figura, se muestra las emisiones de CO₂ provenientes de industria y del consumo de energía (como Gigatoneladas).

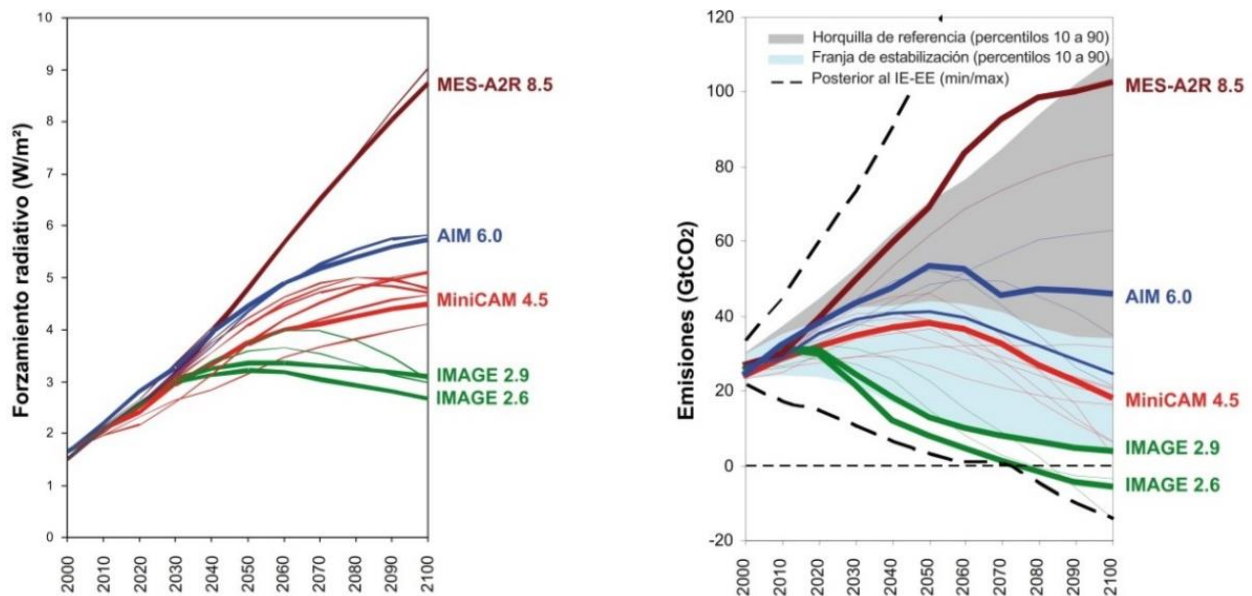


Figura 7. Forzamiento radiativo (Izquierda) y Emisiones de CO₂ (Derecha) de las 4 vías representativas de concentración (RCP) seleccionadas

Fuente: IPCC, 2017.

Estas trayectorias de RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8.5). El valor numérico que define el nombre de cada escenario hace referencia al Forzamiento Radiactivo total para el año 2100 de cada uno de ellos, el cual oscila entre 2.6 y 8.5 W/m^2 . Estando este valor directamente relacionado con los efectos de las posibles políticas o acuerdos internacionales tendentes

a mitigar las emisiones. Si no se realizan esfuerzos adicionales a los actuales para reducir las emisiones de GEI, se prevé que persistirá el crecimiento de las emisiones, impulsado por el crecimiento económico y demográfico, y la urbanización. De ser así, el calentamiento global aumentaría y el sistema climático experimentará numerosos cambios, muy probablemente mayores a los ya observados (IPCC, 2018).

De acuerdo con el reporte AR5, las proyecciones climáticas para finales del siglo XXI muestran una probabilidad de que la temperatura global en superficie sea superior en 1.5°C, con respecto a la del período 1850-1900 para todos los RCPs (excepto el RCP 2.6). Los RCP 4.5 y 6.0 muestran una probabilidad de que esa temperatura sea superior en 2°C, y el RCP 8.5 presenta un incremento en la temperatura superior a 2°C (**Figura 8**). El calentamiento continuará mostrando una variabilidad entre interanual y decenal, y no será uniforme entre las regiones (IPCC, 2013). Para la precipitación, Los cambios que se podrían producir no serán uniformes. Se acentuaría el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, con algunas excepciones regionales.

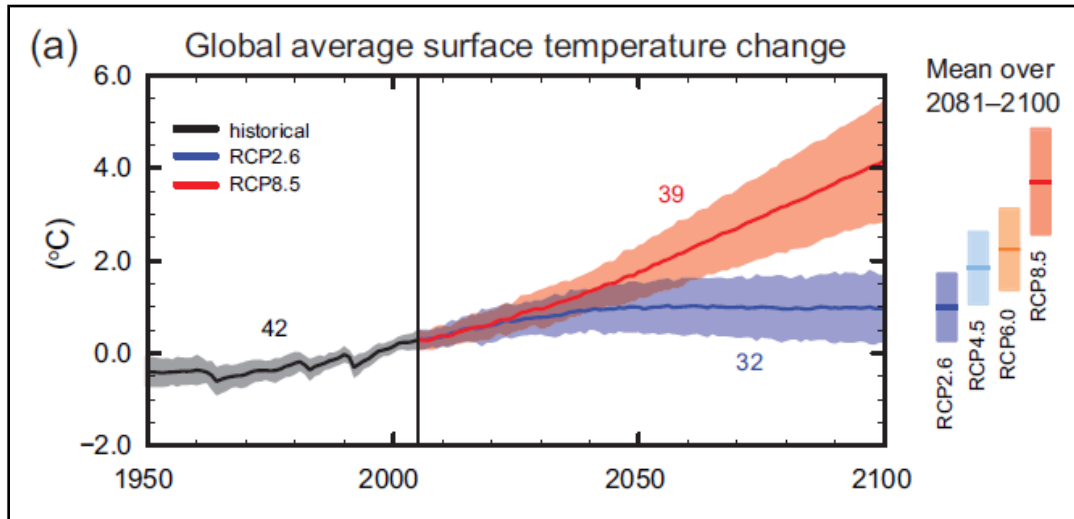


Figura 8. Cambios proyectados en la temperatura global por las 4 vías representativas de concentración (RCP) hacia el año 2100

Fuente: IPCC, 2017.

Al analizar los escenarios RCP se encuentra que mantienen una tendencia similar hasta el año 2040 (asociado al nivel de concentración de CO₂). Desde ese año, el RCP 2.6 muestra un camino de

reducción de estas emisiones, manteniendo un valor estable de temperatura, mientras que los demás escenarios, mantienen una tendencia hacia el aumento.

5.2.1.2. Modelos climáticos globales

Una de las herramientas con la que se cuenta para proyectar el clima a futuro son los modelos del clima, conocidos como Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCM, por sus siglas en inglés). Jha (2012) ha planteado que los GCMs permiten crear escenarios sobre la condición climática más probable. Son varios los elementos que se toman en cuenta para generar escenarios de cambio climático. Uno de los de mayor importancia es trabajar con diversos GCMs, es decir, el desarrollo o la implementación de modelos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes para llegar a lo que se conoce como un ensamble multimodelo que permite estimar el rango más probable de condiciones futuras del clima, a partir del análisis de dónde se encuentre la mayor parte de las soluciones.

Los Modelos de Circulación General, son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica, y por lo tanto de la circulación general alrededor del planeta. Estos modelos buscan representar procesos físicos en la atmósfera, los océanos, la criósfera y en la superficie terrestre, y en la actualidad son la herramienta disponible más avanzada que se tiene para simular la respuesta futura del sistema climático global a los aumentos en los gases efecto invernadero (IPCC, 2013).

La resolución de los Modelos de Circulación General es baja, con valores que oscilan entre 1 y 3 grados de arco (Un grado de arco equivale aproximadamente a 111Km) (**Figura 9**). Para la representación del clima a escala regional, esta resolución no es suficiente, puesto que los fenómenos locales relacionados con la orografía y aquellos de menor escala espacial y temporal no son representados adecuadamente, y en un área de estas dimensiones se tienen valores de precipitación y temperaturas diferentes entre sí.

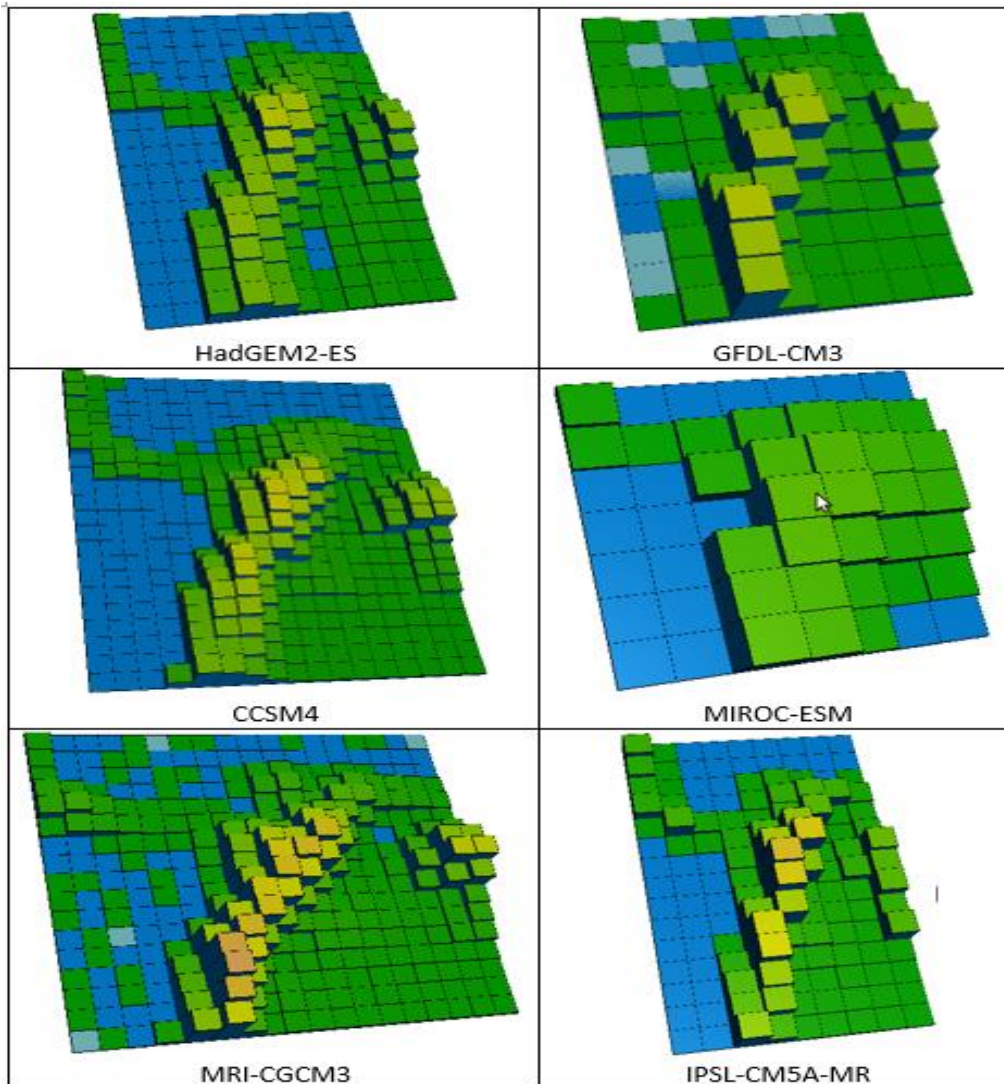


Figura 9. Representación espacial de Colombia de algunos de los modelos del CMIP5

Con el fin de intentar resolver estos problemas de escala, se utilizan diferentes métodos de reducción de escala. Entre ellos tenemos los métodos estadísticos (tratan de reproducir las estadísticas de largo plazo y las condiciones locales a través del análisis del comportamiento de los datos observados de una variable para un periodo largo de tiempo), dinámicos (utilizan modelos regionales de circulación en resoluciones más detalladas), o dinámico-estadísticos (combinaciones de los dos métodos anteriores para la reducción de escala).

A continuación, se presentan los 15 modelos que de acuerdo con lo planteado en la Tercera Comunicación, representan de mejor formas las condiciones climáticas del país. Cada uno de estos modelos, fueron desarrollados por las instituciones consignadas en la **Tabla 2** y cuentan con la resolución espacial indicada como grados de arco.

Tabla 2. Listado de Modelos globales

Modelo	Institución	Resolución (grados de arco)
bcc-csm1-1-m	BCC – Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	2,8125x2,7906
CCSM4	NCAR – National Center for Atmospheric Research	1,25x0,9424
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization in collaboration with Queensland Climate Change Centre of Excellence	1,875x1,8653
FIO-ESM	FIO – The First Institute of Oceanography, SOA, China	2,81x2,77
GFDL-CM3	NOAA-GFDL – NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2,5x2
GISS-E2-H	NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies	2,5x2
GISS-E2-R	NASA-GISS – NASA Goddard Institute for Space Studies	2,5x2
HadGEM2-AO	NIMR/KMA – National Institute of Meteorological Research/Korea Meteorological Administration	1,88x1,25
IPSL-CM5A-LR	IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace	3,75x1,8947
IPSL-CM5A-MR	IPSL - Institut Pierre-Simon Laplace	2,5x2,5352
MIROC5	MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	1,40625x1,4008
MIROC-ESM-CHEM	MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8125x2,7906
MIROC-ESM	MIROC – Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,8125x2,7906
MRI-CGCM3	MRI – Meteorological Research Institute	1,125x1,12148
NorESM1-ME	NCC – Norwegian Climate Centre	2,5x1,8947

Fuente: Adaptado de IDEAM, et al, 2015 y Bonilla-Ovallos y Mesa, 2017.

Como complemento a la tabla anterior, vale la pena destacar otros modelos como el INMCM4 desarrollado por el “Institute of Numerical Mathematics” el cual cuenta con una resolución espacial de $2^\circ \times 1,5^\circ$ (Bonilla-Ovallos y Mesa, 2017).

Para el presente proyecto de investigación, y como se puede observar más adelante en el Capítulo 6 Metodología, los modelos de circulación global seleccionados son MIROC5 y HADGEM2, los cuales se describen a continuación:

MIROC5

Desarrollado por “Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) y Centre for Climate System Research / National Institute for Environmental Studies, Japan”, el modelo de sistema terrestre (MIROC-ESM 2010) se describe en términos de cada componente del modelo y sus interacciones. Los resultados de la simulación histórica CMIP5 (Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5) se presentan para demostrar el rendimiento del modelo desde varias perspectivas: atmósfera, océano, hielo marino, superficie terrestre, biogeoquímica oceánica y terrestre, y química atmosférica y aerosoles. Una versión acoplada de química atmosférica de MIROCESM (MIROC-ESM-CHEM 2010) reproduce razonablemente las variaciones transitorias de las temperaturas del aire en la superficie para el período 1850-2005, así como la climatología actual para los vientos y las temperaturas zonales medias. La superficie a la mesosfera. La evolución histórica y la distribución global de la columna de ozono y la cantidad de aerosoles troposféricos se simulan razonablemente en el modelo basado en las emisiones históricas de los Vías de Concentración Representativa (RCP) de estos precursores. Las distribuciones simuladas de los parámetros biogeoquímicos terrestres y marinos concuerdan con las observaciones recientes, lo que es alentador para usar el modelo para futuras proyecciones de cambio global. (MIROC5) presenta la resolución estándar de la atmósfera T85 y los modelos de océano. El estado medio y la variabilidad del clima se comparan con las observaciones de

una versión anterior (MIROC3.2) con dos resoluciones diferentes, más gruesas y más finas que la resolución de MIROC5 (INECC, 2020).

HADGEM2

Desarrollado por Centro Hadley de Cambio Climático “Met Office Hadley Centre for Climate Change” —Reino Unido de la Gran Bretaña. Se obtienen escenarios respecto a precipitación y temperatura (máxima, mínima y media). El Modelo Hadley Ambiental Global versión 2, tiene una resolución atmosférica de 1.25°×1.9° (latitud, longitud) y corridas RCP2.6— RCP4.5— RCP6.0— RCP8.5. Los componentes del sistema terrestre incluidos son el ciclo del carbono terrestre y oceánico y la química troposférica, con un modelo dinámico de vegetación global se representa la vegetación terrestre y el carbono; además se incluye la biología oceánica y la química del carbonato (INECC, 2020).

5..2.1.3. Downscaling - Generación de información para áreas de menor extensión

La información disponible de los GCM se encuentra a una resolución espacial que oscilan entre 1 y 3 grados de arco (Un grado de arco equivale aproximadamente a 111Km). De igual forma, cada modelo climático posee características particulares que permiten evidenciar amplias variaciones en su capacidad para simular con precisión las características del clima regional y, en la calidad del comportamiento de las series a diferentes resoluciones temporales (Hamlet et al., 2010).

De acuerdo a lo anterior, el uso de los datos de los GCM limita su aplicabilidad para estudios de impacto del cambio climático y su correspondiente efecto en diversos componentes de los ecosistemas a escalas locales, como el ciclo hidrológico, donde la información que alimenta los modelos hidrológicos debe estar a escalas muy detalladas (espaciales y temporales) para poder tener herramientas para la toma de decisiones en cuanto a planificación y gestión del recurso hídrico (Willems & Vrac, 2011).

Con el objetivo de solucionar los problemas de resolución de los GCM se han desarrollado métodos de downscaling que consisten en relacionar información o datos a escalas espaciales y

temporales relativamente gruesas con los productos deseados a escalas espaciales y temporales más detallados (Hamlet et al., 2010). Los dos métodos principales de downscaling son el dinámico (DD por sus siglas en inglés dynamical downscaling) y el estadístico (SD por sus siglas en inglés, statistical downscaling).

5.2.2. Oferta hídrica

5.2.2.1. Evaluación de la oferta hídrica

Con la expedición del Estudio Nacional del Agua - ENA (2010) y la Política Nacional del Recurso Hídrico (2010), se ha denominado a la oferta hídrica como el volumen de agua que por escorrentía directa discurre por una superficie y forma los sistemas de drenaje superficial (cuencas hidrográficas) y la demás que puede infiltrarse y generar fuentes subterráneas. Se asocia también al caudal, expresado como el volumen generado en una unidad de tiempo determinado y en un punto específico (Castillo, 2022).

La oferta hídrica está condicionada a la climatología, el régimen hidrológico propio del territorio asociado a la variabilidad natural, a las coberturas vegetales de la cuenca hidrográfica, las características geológicas y las propiedades intrínsecas del suelo que se expresan en términos de escorrentía superficial (IDEAM, 2018). En Colombia, esta variable se determina para un período de tiempo mínimo 30 años con diferentes escalas temporales: diaria, mensual, anual y se cuantifica mediante modelos hidrológicos que dependen de la escala e información.

Así mismo, con el propósito de mantener los ecosistemas y en especial los cuerpos lénticos y lóticos, no todo el volumen de oferta hídrica está disponible para consumo humano, ya que a partir del (ENA, 2010) y ya a manera de todos los instrumentos de planificación del recurso hídrico, se debe considerar una disminución en porcentaje para mantenimiento, conservación de los ecosistemas y usos del agua para los diferentes usuarios en un cuerpo de agua, el cual se denomina caudal ambiental, este

es descontado de la oferta hídrica, para poder estimar la oferta hídrica disponible de una región, captación o cuenca hidrográfica (Castillo, 2022). En la **Figura 10**, se presenta la oferta hídrica total histórica para la cuenca del río Bita.

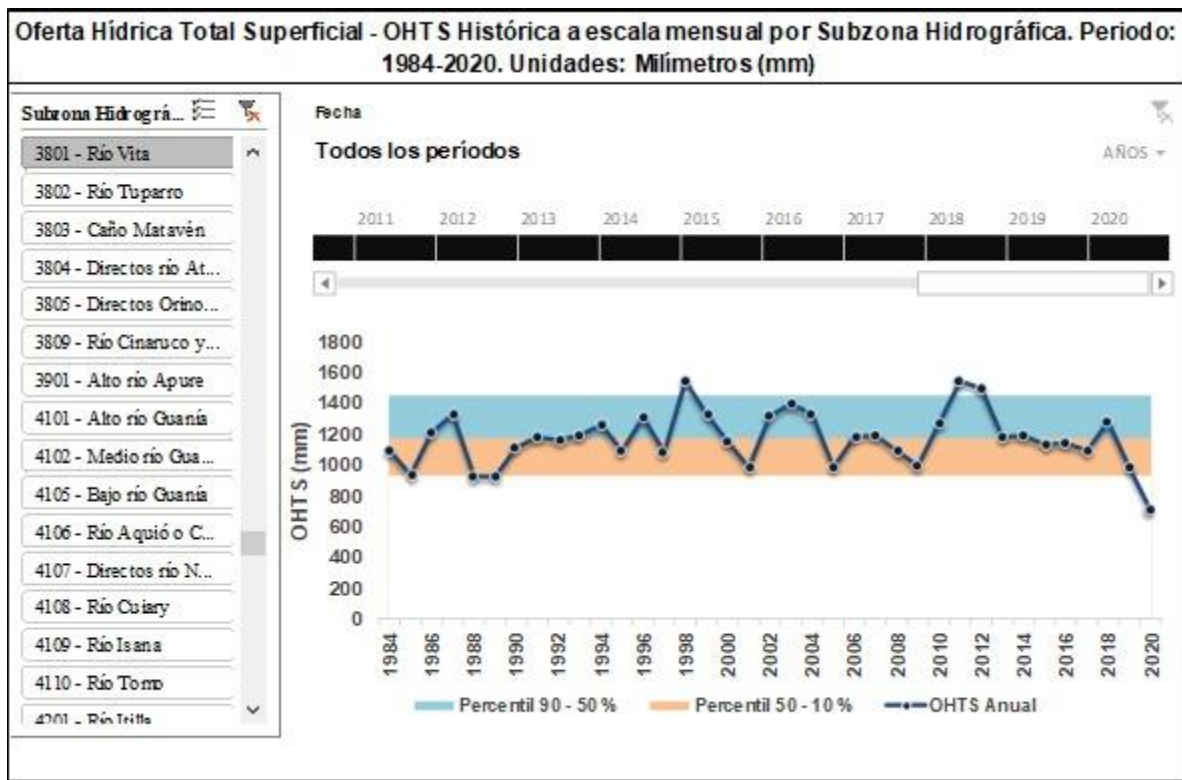


Figura 10. Oferta hídrica total histórica para la cuenca del río Bita

Fuente: Ideam, 2022.

5.2.2.2. Indicadores de presión del recurso hídrico

De acuerdo con el IDEAM, en 2018, se han desarrollado dos grupos de indicadores: los que presentan las condiciones del sistema hídrico natural y los que muestran la intervención antrópica relacionados con la cantidad, variabilidad y calidad de agua.

La evaluación del sistema natural nacional se fundamenta en un conjunto de indicadores que evalúan, las características del clima y regulación de caudales, desde una fundamentación técnica, excluyendo la intervención antrópica que es evaluada aparte (IDEAM, 2018). Los indicadores asociados al régimen hidrológico son el índice de aridez y el índice de regulación hídrica, los cuales permiten

identificar zonas cuya normalidad climática es seca y la caracterización de la regulación de las cuencas. Los indicadores de intervención antrópica incluyen los indicadores de presión por uso del agua entre los que se encuentran los siguientes:

Índice de retención y regulación hídrica – (IRH)

Según el IDEAM (2018), este índice permite determinar la capacidad de retención y regulación de la oferta hídrica de una cuenca hidrográfica a través de la evaluación de las áreas bajo la curva de duración de caudales diarios, mediante la relación entre un volumen parcial, equivalente al área bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios, y el volumen total equivalente el área bajo la curva de duración de caudales medios diarios.

Mide la proporción de cantidad de agua, que representa la demanda por las diferentes actividades humanas expresado en km³, la cual corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales (IDEAM 2018) (

Figura 11).

La fórmula de este índice es:

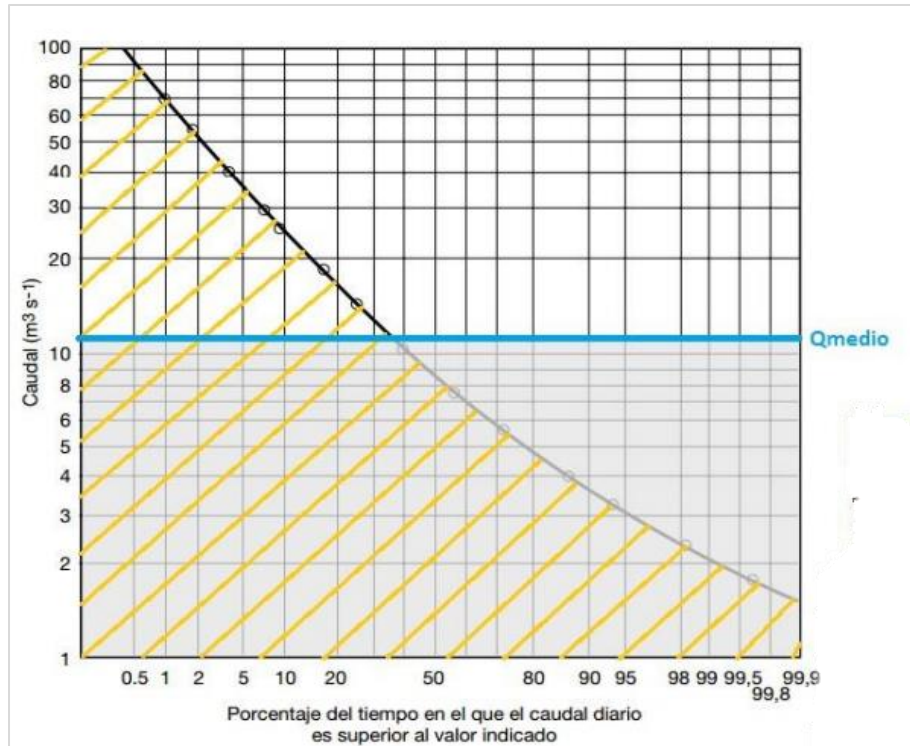
$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde:

IRH: Índice de retención y regulación hídrica, (adim).

V_p: Volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales medios diarios (m³).

V_t: Volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudales medios diarios (m³).



Convenciones

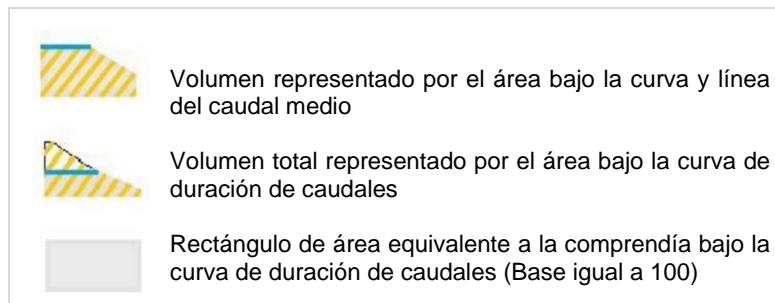


Figura 11. Relación entre caudal y duración de caudal respecto a caudal medio

Fuente: Ideam, 2018.

Otra forma de conceptualizar este indicador es saber que tan homogénea es la variación de los caudales en una cuenca definida; así, en la **Figura 11** por ejemplo, los caudales que superan al caudal medio de la zona suelen durar muy poco, por otro lado, los que suelen durar más son aquellos que se encuentran por debajo del promedio.

Entre mayor sea el IRH, los caudales son más homogéneos, por otro lado, cuando los valores tienden a ser menores, indica que hay una diferencia notable entre los caudales más bajos y más altos

que genera una misma cuenca. Este índice puede ser evaluado y clasificado de acuerdo con la categorización descrita en **Tabla 3**, la cual es establecida por el ENA.

Tabla 3. Clasificación del IRH

Categoría ENA 2010, 2014 y 2018	Rango
Muy alta	>0,85
Alta	0,75 - 0,85
Moderada	0,65 - 0,75
Baja	0,50 – 0,65
Muy baja	<0,50

Fuente: IDEAM, 2018.

No obstante, dado que este indicador no es una representación absoluta, es decir, que una unidad hidrográfica tenga una buena retención, no necesariamente significa que provee de mejores condiciones al ecosistema, así mismo también influyen diferentes características geográficas y del suelo, pues en una zona montañosa se puede llegar a presentar una menor retención que en una zona de pendientes planas; por lo cual este índice termina siendo de carácter cualitativo.

Índice de uso del agua superficial – (IUA)

Según el IDEAM (2018), mide la proporción de cantidad de agua, que representa la demanda por las diferentes actividades humanas expresado en km³, la cual corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado (anual, mensual) y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales.

$$IUA_j = \frac{DH_j}{OTHD_j} * 100$$

Donde:

IUA_j: Índice de Uso del Agua en la unidad espacial de referencia j para condición hidrológica promedio o de año seco (%).

DH_j: Demanda hídrica de las actividades socioeconómicas y de los ecosistemas en la unidad espacial de referencia j (Mm³ /año).

OTHD_j: Oferta hídrica superficial total disponible en la unidad espacial de referencia j, para condición hidrológica promedio o de año seco (Mm³/año).

En la **Tabla 4**, se describe la clasificación del Índice de uso del agua - IUA, la cual permite ubicar y analizar el valor calculado en uno de los rangos que se presentan.

Tabla 4. Clasificación del IUA

Rango Índice de Uso del Agua	Categoría	Interpretación Índice de Uso del Agua
>100	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50,01 – 100	Muy alta	La presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible
20,01 – 50	Alto	La presión de la demanda es alta respecto a la oferta superficial disponibles
10,01 – 20	Moderada	La presión de la demanda es moderada respecto a la oferta superficial disponibles
1,0 – 10	Baja	La presión de la demanda es baja respecto a la oferta superficial disponibles
≤ 1	Muy baja	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponibles

Fuente: IDEAM, 2018.

Fuente: Ideam, 2022.

5.2.3. Riesgos de desastres y gestión del cambio climático

Debido a su ubicación en el corredor Andino y la banda del Pacífico, las ciudades colombianas se ven expuestas a múltiples amenazas. Colombia está ubicado en la posición 33 del Índice Global de Riesgo Climático (Sönke Kreft, 2017), aunque la exposición y vulnerabilidad al cambio climático varía mucho entre las regiones y ciudades principalmente como consecuencia de diversos niveles de la pobreza y desigualdad (IDEAM - UNAL, 2018). Las principales amenazas incluyen eventos geológicos y

meteorológicos por igual, como los acontecimientos derivados de la temporada de La Niña 2010-2011. Según los académicos y las instituciones públicas, el aumento del nivel del mar, la reducción de los glaciares y el aumento de la temperatura son prueba de los impactos del cambio climático en Colombia (IDEAM - UNAL, 2018).

Ahora bien, con la expedición de la Ley 1931 de 2018, por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático, los territorios nacionales deben realizar avances para la reducción de los GEI y adaptación al cambio climático articulándose a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en especial el No. 6 “Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible y el saneamiento para todos”, el marco de Sendai y el Acuerdo de Paris (Suraj Mal, 2018), junto con instrumentos territoriales de planificación como los marcos locales para la acción climática y la gestión del riesgo de desastres que se ha enmarcado mediante la Ley 1523 de 2012 y en su contenido programático en el Plan Nacional de Adaptación al cambio climático.

Para el planteamiento de escenarios de riesgo relacionados con el cambio climático, es necesario establecer las tendencias climáticas que puedan afectar a las amenazas naturales y al entorno que se corresponde con el ámbito de estudio. Los nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100 del IDEAM (IDEAM-PNUD, 2015), concluyen que, si bien todo el país será afectado, los impactos variarían sustantivamente de región a región, lo que sin duda se traducirá en mayores amenazas de fenómenos asociados al clima tales como desabastecimiento, inundaciones, sequías e incendios de cobertura vegetal. A su vez, estos escenarios de aumento de precipitación y temperatura exacerbarán eventos derivados por los fenómenos de variabilidad climática lo que hace impredecible y más vulnerable al territorio.

Se ha evidenciado que el país es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, como por ejemplo en la pérdida de glaciares y el aumento del nivel medio del mar, lo cual también se relaciona en los cambios de tendencia de la temperatura media y precipitación. En este sentido, la

severidad de los daños y las pérdidas asociadas a los eventos climáticos extremos están influenciadas por la variabilidad climática natural (fenómenos ENSO, entre otros) y por factores de carácter antrópico, como el aumento en la exposición y la vulnerabilidad, que dependen principalmente de los modelos de desarrollo socioeconómico asumidos. Por lo tanto, organizaciones como la Comunidad Andina (PREDECAN, 2009), identifican que la gestión del riesgo de desastres frente a fenómenos amenazantes hidrometeorológicos como las inundaciones y los incendios forestales, al igual que la adaptación al cambio climático, tienen alcances y retos comunes, ya que se deben centrar en la reducción de la exposición y la vulnerabilidad y el aumento de la capacidad de resiliencia frente a los impactos de los fenómenos climáticos extremos. En este contexto, la gestión del riesgo exige acciones de carácter integral con los fenómenos del cambio climático y sus estrategias de adaptación, vinculadas al ámbito sectorial y territorial y, por lo tanto, requiere también una articulación en la planificación y el desarrollo de acciones coordinadas en materia de cambio climático.

5.2.3.1. La mitigación y adaptación como respuesta para enfrentar el cambio climático

La mitigación al cambio climático consiste en llevar a cabo acciones dirigidas a reducir las fuentes o incrementar los sumideros de gases de efecto invernadero (GEI). Por otro lado, la adaptación al cambio climático se considera como una serie de medidas de ajuste en los sistemas naturales, humanos, productivos e infraestructura estratégica frente a estímulos climáticos reales o proyectados (Guido, 2017). Las medidas de adaptación son de gran importancia debido a la alta vulnerabilidad y anomalías climáticas. Se considera que las medidas de adaptación proporcionan beneficios inmediatos a diferencia de las de mitigación, las cuales ofrecen resultados en el largo plazo.

La adaptación al cambio climático se enmarca en la definición de la gestión de riesgo. Además, la vulnerabilidad y el peligro definen el riesgo ante el cambio climático como lo ha promovido el IPCC como se puede observar en la **Figura 12**.

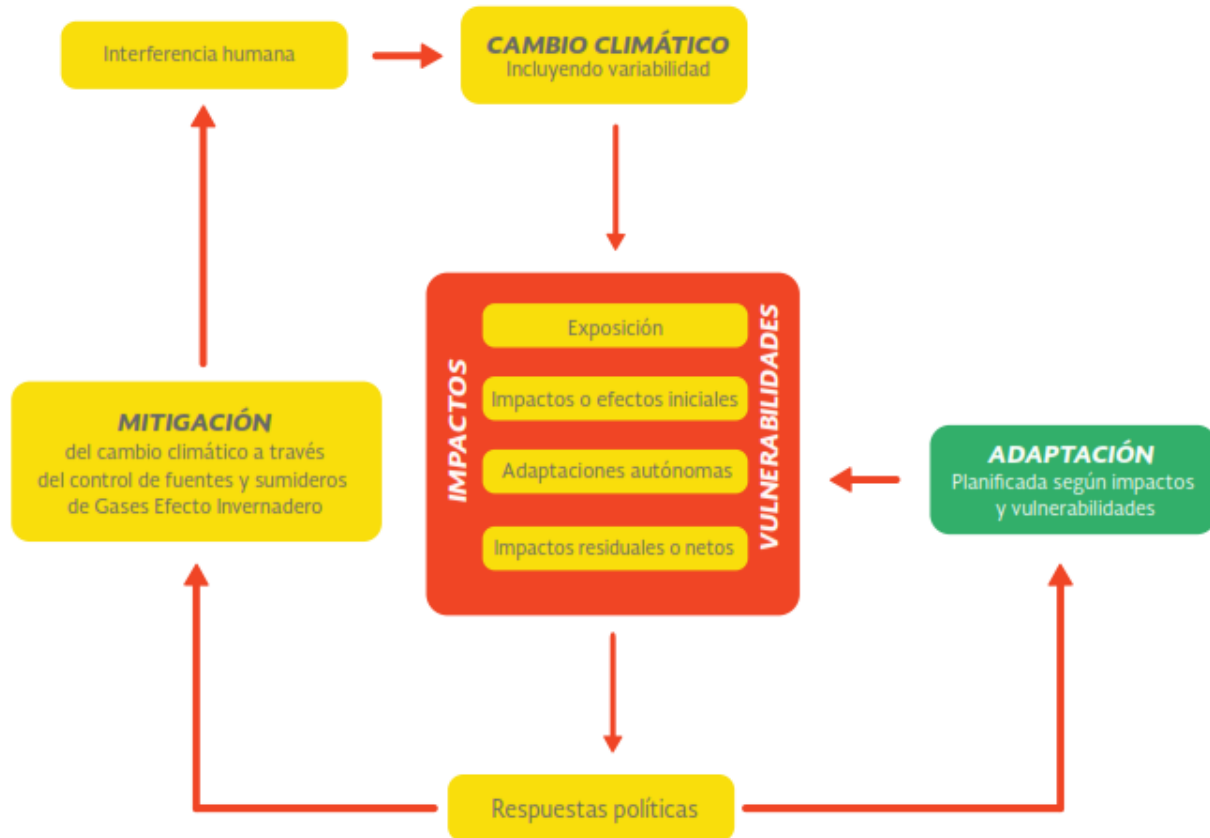


Figura 12. Respuesta de adaptación y mitigación al cambio climático

Fuente: IPCC, 2001.

La mitigación al cambio climático ha recibido tradicionalmente mayor atención que la adaptación, desde el punto de vista científico y desde el normativo. La razón más importante radica en la capacidad de la mitigación para reducir los impactos sobre todos los sistemas sensibles al clima, mientras que la adaptación tiene un potencial limitado para muchos sistemas. La mitigación y la adaptación son complementarias y no constituyen alternativas mutuamente excluyentes, ya que sus características, escalas temporales y los agentes implicados son en gran medida distintos.

5.2.3.2. Indicadores de riesgo

De acuerdo con el (IDEAM,2018), dentro de los indicadores de gestión del recurso hídrico se cuenta con los que corresponden a riesgo, los cuales se describen a continuación.

Índice de vulnerabilidad y desabastecimiento – (IVH)

Según el IDEAM (2018), el índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) relaciona de forma cualitativa el Índice de Uso del Agua – IUA, y el Índice de Retención y Regulación Hídrica – IRH, mostrando la fragilidad de los sistemas hídricos superficiales de mantener la oferta de agua dadas sus condiciones de regulación y de demanda, pudiéndose presentar susceptibilidad al desabastecimiento.

En la **Tabla 5**, se presenta la clasificación del Índice de vulnerabilidad y desabastecimiento - IVH, la cual como se mencionó anteriormente relaciona el Índice de Uso del Agua – IUA con el Índice de Retención y Regulación Hídrica – IRH.

Tabla 5. Clasificación del IVH

Matriz de Asociación índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento – IVH				
Índice de Uso del Agua – IUA	Índice de Retención y Regulación Hídrica - IRH			
Categoría	Alto	Moderado	Bajo	Muy bajo
Muy bajo	Muy bajo	Bajo	Medio	Medio
Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Medio	Medio	Medio	Alto	Alto
Alto	Medio	Alto	Alto	Muy alta
Muy alta	Medio	Alto	Alto	Muy alta
Crítico	Muy alta	Muy alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2018.

5.2.4. Demanda hídrica

Conforme a lo estipulado en el Estudio Nacional del Agua 2018, la demanda hídrica “se entiende como la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas, desde el punto de vista económico, y para el uso doméstico. También se entiende a partir de la competencia por el uso que hacen los sectores y, por lo tanto, se asume como la no disponibilidad de agua para otras actividades antrópicas y los ecosistemas en un territorio y por un periodo de tiempo”.

5.2.4.1. Demanda Hídrica Total

Definida como la suma de los volúmenes de agua que los sectores socioeconómicos de forma directa o indirecta realizan del recurso. La suma de la demanda por sector comprende, el consumo de agua básico para la alimentación y desarrollo de las actividades normales de una población; la demanda agrícola como el consumo de agua mínimo requerido para el crecimiento, germinación y cosecha de una determinada plantación, la demanda pecuaria referida al consumo de un animal según su etapa productiva (cría, levante y terminación) y la demanda industrial como la extracción del recurso en la fabricación de productos.

La expresión del cálculo matemático utilizado por los sectores socioeconómicos presentes en cada una de las subcuencas se representa con la siguiente fórmula.

$$DT = DUD + DUP + DUA$$

Donde:

DT = Demanda Total de agua.

DUD = Demanda de Agua para Uso Doméstico.

DUP = Demanda de Agua para Uso Pecuario.

DUA = Demanda de agua para el sector agrícola.

UA = Demanda de agua para el sector Industrial.

5.2.5. Instrumentos de planificación ambiental y territorial

5.2.5.1. Cambio climático en el desarrollo y planificación ambiental y territorial

Con vista en la planificación territorial y sectorial del desarrollo, los efectos del cambio climático han cobrado importancia dada su incidencia en un territorio generando modificaciones al funcionamiento de componentes y en general afectando el desarrollo. El cambio climático y sus manifestaciones sugieren cambios en los ecosistemas y en la prestación de sus servicios, en actividades

productivas, en infraestructuras y en la población en general. La forma en que inciden en el territorio puede conllevar a que actores públicos, privados y sociales incurran en gastos no previstos, al verse afectados por eventos causados por aumentos en la temperatura o por cambios en la precipitación. De igual forma, las manifestaciones de cambio climático pueden significar una oportunidad para el crecimiento económico, el desarrollo social y el manejo responsable y sostenible de los ecosistemas promoviendo así un desarrollo bajo en carbono y resiliente al clima. En este sentido, Colombia, desde el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, cuenta con los siguientes instrumentos de apoyo para la planificación territorial involucrando el componente de cambio climático.

- Consideraciones de cambio climático para el ordenamiento territorial
- Orientaciones a las autoridades ambientales para la definición y actualización de las determinantes ambientales y su incorporación en los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital ministerio de ambiente y desarrollo sostenible dirección general de ordenamiento ambiental.
- Orientaciones para la inclusión del Cambio Climático en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT, PBOT, EOT)
- Hoja de ruta POMCA planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas

5.2.5.2. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico

La Política Nacional para la Gestión del Recurso Hídrico – PNGIRH, es un instrumento que regula y direcciona el manejo del recurso hídrico en Colombia y tiene como objetivo orientar la planificación, administración, seguimiento y monitoreo del recurso hídrico a nivel nacional bajo un criterio de gestión integral, (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Esta política fue avalada en diciembre de 2009 por el Consejo Nacional Ambiental y presenta un horizonte de 12 años a partir del año 2010 hasta el 2022. Esta política nace a partir de la necesidad de unificar directrices que permitan disponer del recurso hídrico, prevenir la contaminación hídrica, y

preservar el agua para las generaciones futuras, teniendo en consideración los aspectos sociales, económicos, y ambientales, entre otros.

Esta se enmarca en el concepto de Gestión Integrada del Recurso Hídrico - GIRH, definido por la Global Water Partnership (GWP, 2011) como “un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales”.

El Plan Hídrico Nacional (PHN) es una herramienta para lograr el desarrollo de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico, por medio del cual se articulan los objetivos específicos de la PNGIRH con los planes de acción territoriales y de las autoridades ambientales, a través de planes a los cuales deben acogerse estos organismos.

Cada programa del plan incluye objetivos, alcance, cronograma y costos, por lo que los organismos involucrados en la gestión del agua, deben identificar que programa están bajo su responsabilidad, e incorporar el debido proceso de planeación y ejecución del PHN a proyectos y acciones concretas en su jurisdicción, (MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010).

El PHN incluye tres fases, primera fase a corto plazo (2010-2014), segunda fase a mediano plazo (2014-2018) y tercera fase a largo plazo (2018-2022), y ha sido formulado con los actores clave para la GIRH, teniendo en cuenta los conflictos del uso de agua propios de cada región.

La unidad espacial de gestión donde se va a aplicar la PNGIRH, es la cuenca hidrográfica; en la cual se encuentran los elementos ambientales y ecosistemas estratégicos, así como los elementos antrópicos que influyen de forma positiva o negativa y los actores claves para la GIRH, es decir, usuarios, entes territoriales y autoridades ambientales. Lo anterior implica que la cuenca como unidad de gestión deberá considerar en su ordenación y manejo todas y cada una de las medidas de acción necesarias para

planificar el uso sostenible de la misma y de los elementos ambientales presentes en ella (medidas de manejo de paramos, de humedales, de manglares, de áreas marino costeras, de ordenación forestal, de manejo de reservas forestales entre otras) (Castillo, 2022).

5.3. Marco geográfico

El río Bita nace en el municipio de La Primavera a una altitud de 137 msnm y desemboca en el río Orinoco en jurisdicción del municipio de Puerto Carreño a una altitud de 22.3 msnm. La cuenca posee un área de 8150.3 km², un perímetro de 740.86 km y una longitud del cauce principal de 732.2 km, con una pendiente media de la cuenca de 0.02% representativa de un relieve suave, de baja a moderada influencia sobre las crecidas instantáneas y tiene una pendiente media de su cauce principal de 0.02% que se considera baja.

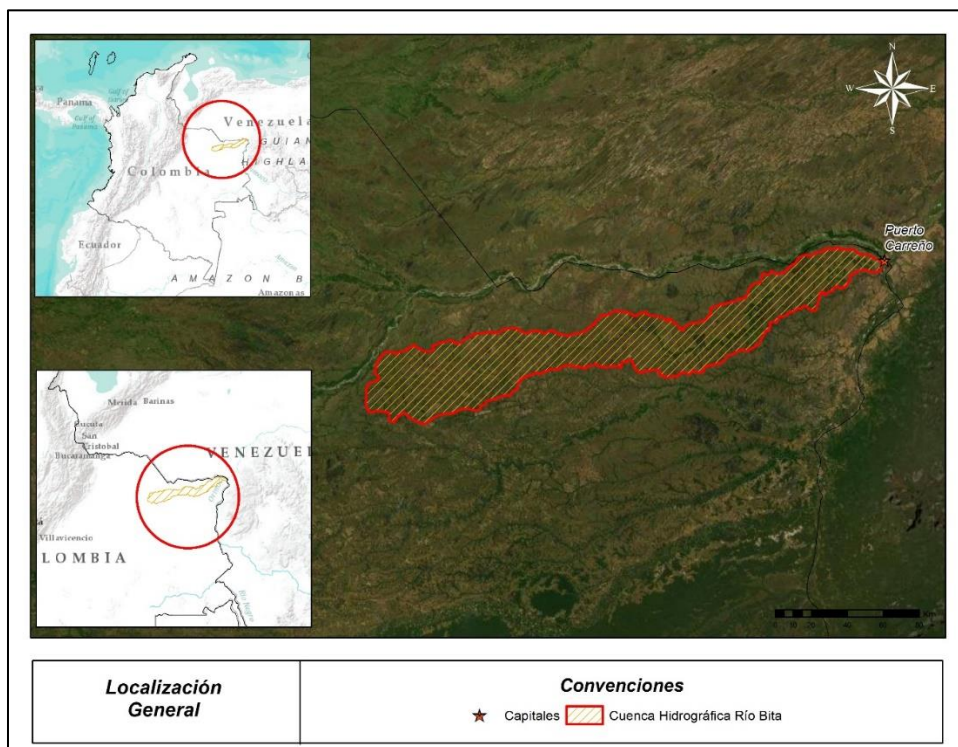


Figura 13. Localización cuenca hidrográfica río Bita

En general la cuenca del río Bita posee un patrón de drenaje dendrítico, el cual se desarrolla cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen control sobre la dirección de crecimiento del valle (Londoño, 2001), típicas de las condiciones topográficas de la cuenca.

Por otro lado, la densidad de drenaje para la cuenca del río Bita es bien drenada, en donde se puede determinar que el río presenta una buena respuesta ante un evento máximo que pueda ocurrir en la cuenca. Entre los principales afluentes del río Bita están: Los Caño Componele, El Buey, Pinzonera, Corral de Piedra, Carro Voltiado, Monserrate, Veladero, Caño del Avión, Barro, El Pendare, Múribo, Cumariane, Guaípe, Tigre, Matesarabia y Tres Bocas como se aprecia en la **Figura 14**.

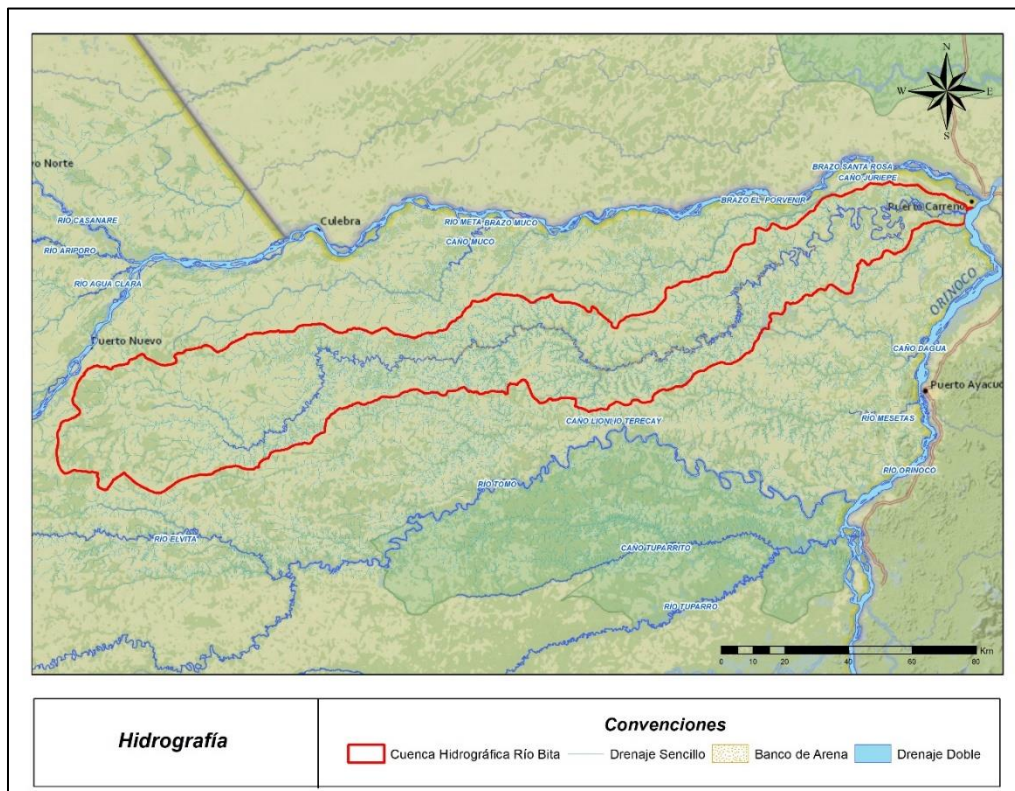


Figura 14. Red hídrica cuenca hidrográfica río Bita

En la **Tabla 6** se encuentran las unidades territoriales que tienen área en la cuenca del río Bita, las cuales se encuentran en los municipios de La Primavera (cinco (5) veredas) y Puerto Carreño (ocho

(8) veredas) en el departamento del Vichada. El área de influencia del río Bitá tiene un total de 815.038,45 hectáreas de las cuales el 53,38%, se encuentra localizadas en el municipio de La Primavera y el 46,62% en el municipio de Puerto Carreño.

Tabla 6. Distribución de las Unidades territoriales

MUNICIPIO	N.º	UNIDADES TERRITORIALES	ÁREA HA	ÁREA %
La Primavera	1	La Soledad	93158,47	11,43
	2	Matiyure	96257,81	11,81
	3	Nueva Antioquia	100074,46	12,28
	4	Río Bitá	47793,34	5,86
	5	Santa Bárbara	97759,37	11,99
			Subtotal	435.043,45
Puerto Carreño	6	Dagua Caño Negro	21194,74	2,60
	7	El Progreso	9275,49	1,14
	8	Guaripa	14963,72	1,84
	9	La Esmeralda	111442,8	13,67
	10	La Venturosa	20154,34	2,47
	11	Manatí	44681,48	5,48
	12	Puerto Carreño (área rural del casco urbano)	38278,58	4,70
	13	Puerto Murillo	120003,85	14,72
		Subtotal	379.995,00	46,62%
		Total, general	815.038,45	100%

Fuente: Consorcio Río Bitá, 2018.

De acuerdo con los resultados del diagnóstico del POMCA, la cuenca total del río Bitá presenta una densidad de drenaje de 0.90 km/km², y en ninguna de las cuencas expuso una densidad por debajo de 0.5 km/km², lo cual indica que, en general, la cuenca es drenada. En términos de oferta del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Bitá, se puede evidenciar en los resultados obtenidos, que la oferta hídrica de la cuenca es alta, ya que, posee una gran riqueza en términos de este recurso, no solo por su abundancia sino por el estado de conservación del mismo, manteniendo una calidad buena, por lo que las zonas bajas de la Cuenca poseen la capacidad natural de convertirse en un sitio RAMSAR,

entre otras características, por poseer la capacidad de recibir aves migratorias y ser hábitat de nativas. De igual manera, es importante mencionar que en general, la mayoría de las subcuencas presentan consumos pequeños, la baja densidad poblacional y la extensión de los municipios describen un número pequeño de habitantes en la zona (CORPORINOQUIA, 2021).

La cuenca del río Bita presenta un comportamiento atípico con respecto al generalizado de los ríos de Colombia, donde en las partes altas con pendientes pronunciadas se generan las acumulaciones de flujos que desencadena emergencias por avenidas torrenciales y movimientos en masa, mientras que en las partes medias a bajas se presentan desbordamientos e inundaciones de los principales afluentes, los cuales se desencadenan por precipitaciones persistentes en épocas invernales.

La cuenca del río Bita comprende una no tan variada litología, cuya combinación con el tipo de clima de la región que es uno sólo, cálido húmedo, y su interrelación con un relieve poco dinámico en procesos de transformación y con un bajo nivel de intervención antrópica, genera escasos procesos de aceleración de la erosión, en razón a que los procesos de alteración física y química de las rocas y la misma pendiente, inciden y condicionan en menor grado la estabilidad de las formaciones superficiales; donde se desarrollan y manifiestan procesos de remoción en bajas magnitudes, generando en la mayor parte de los casos incisión fluvial en los suelos. En algunos sectores de la parte alta de la Cuenca, se observan algunos flujos de remoción como el terraceo, debido principalmente a la ganadería extensiva, con un moderado grado de representatividad. En relación a la dinámica fluvial, la erosión lateral es la que afecta la Cuenca, como producto de las pendientes que son menores al 1%, lo que genera la sinuosidad propia del río, con curvas de depositación y de erosión.

Frente a fenómenos de inundaciones lentas por avenidas torrenciales y movimientos en masa, no se reportan en la cuenca, dado que los cambios de pendiente y transiciones de montaña a planicies de inundación no se hacen de forma brusca, esto se sustenta dado que la cuenca tiene diferencias de cotas entre 137.0 msnm en el nacimiento y 17.6 msnm cuando desemboca en el río Orinoco, la misma

tiene un índice de compacidad de 2.32, indicador de una cuenca forma oval oblonga a rectangular oblonga, de baja susceptibilidad a las avenidas torrenciales, congruente con el factor de forma de 0.09, indicador de forma que tiende a ser alargada; de igual forma ese tipo de fenómenos no son normales en ríos viejos como es el caso de la zona (CORPORINOQUIA, 2021).

Teniendo en cuenta que la cuenca se encuentra en jurisdicción de solo 2 municipios como los son La Primavera y Puerto Carreño, y solo una pequeña parte del casco urbano de este último entra, para la población asentada en la Cuenca, se identifica que aunque la mayor parte de esta población está ubicada en la zona rural, con una densidad poblacional de 9.14 habitantes por kilómetro cuadrado.

Basándose en los resultados obtenidos en el POMCA, específicamente en la baja presión demográfica futura de la población de la cuenca de acuerdo a la tasa de crecimiento, es preciso decir que la demanda de recursos naturales tiende a ser estable, ya que a nivel general, se reporta una abundancia en la disponibilidad de recursos naturales necesarios para la subsistencia de los habitantes de la cuenca, y para entender un poco las principales características de la economía agropecuaria del municipio y en general de la altillanura es pertinente recordar que, aunque los suelos tienen condiciones agroecológicas particulares que se caracterizan por la acidez y bajos niveles de fertilidad. Lo anterior presenta impactos positivos en términos ambientales la cuenca, ya que esta dinámica y distribución espacial de la población ejerce una presión baja sobre los recursos naturales de la cuenca tales como el uso del suelo, zonas de recarga hídrica, flora, fauna, entre otros, permitiendo así desarrollar la resiliencia natural del ambiente al no sobrepasar la capacidad de carga de los ecosistemas presentes.

Las actividades económicas más representativas se fundamentan en la ganadería, la silvicultura, la agricultura de subsistencia y la piscicultura. A nivel de tendencias, puede percibirse un potencial para el desarrollo de la agroindustria a nivel de diferentes cultivos como la soya y el maíz con fines comerciales, pero existen limitantes a nivel de la tenencia y la legalidad de los predios, hecho este que genera inseguridad jurídica y en consecuencia, desestimula a los inversionistas para arriesgar su capital.

La actividad piscícola se desarrolla con fines de abastecimiento familiar y para la comercialización en los municipios de la cuenca. Por otra parte, en cuanto a la apropiación del territorio, se refleja que la población de la cuenca presenta un alto sentido de apropiación del territorio, desde sus diferencias y similitudes, lo rural y lo urbano, tradiciones y costumbres, conocen y defienden el territorio (CORPORINOQUIA, 2021).

5.4. Marco legal

- LEY 2169 DE 2021 (diciembre 22), Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones
- Ley 1931 de 2018, Ley de Cambio Climático.
- Ley 388 de 1997 (Artículo 10), inclusión de la gestión del cambio climático como una de las determinantes de los Planes de Ordenamiento Territorial (POT).
- Decreto 298 de 2016 - Sistema Nacional de Cambio Climático (Sisclima).
- Decreto reglamentario 1077 de 2015 - Define que los municipios tienen como competencia la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial.
- Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. “Por la cual se expide el decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible”
- DECRETO 1640 DE 2012. Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones.
- Resolución 1447 de 2018, por medio del cual el MADS reglamentó el RENARE como parte del Sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de las acciones de mitigación a nivel nacional.

6. Metodología

Con el propósito de cumplir los objetivos planteados y responder las preguntas de investigación propuestas, el trabajo plantea desarrollar una metodología tipo investigación aplicada, donde se orienta la misma a obtener conocimientos nuevos para dar solución a la problemática de la falta de medición hidrometeorológica en una cuenca hidrográfica, con enfoque cuantitativo tanto descriptivo como experimental que tiene un enfoque cualitativo basándose en los resultados de la evaluación del impacto del cambio climático en la oferta hídrica, evaluados a partir de indicadores de gestión del recurso hídrico que pretenden dar lineamientos posibles medidas de adaptación al cambio climático para este tipo de ecosistemas.

La metodología propuesta, se ha desarrollado en 7 fases como se muestra en la **Figura 15**, las cuales se describen a continuación:

- **Fase 1: Selección de datos meteorológicos línea base:** Esta etapa corresponde con se realiza la revisión de información disponible y posterior descarga de las estaciones de propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para realizar a revisión y validez de la misma y por otra parte dado que la cuenca solamente cuenta con una estación dentro de la cuenca se procedió a la descarga del producto CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations) igualmente para la estaciones dentro de la cuenca y las más cercanas a la misma. Posteriormente, se realiza la comparación entre las estaciones del IDEAM y las de CHIRPS buscando establecer el desempeño de dicha información mediante pruebas de comparación para establecer valores de correlación de ambas informaciones.

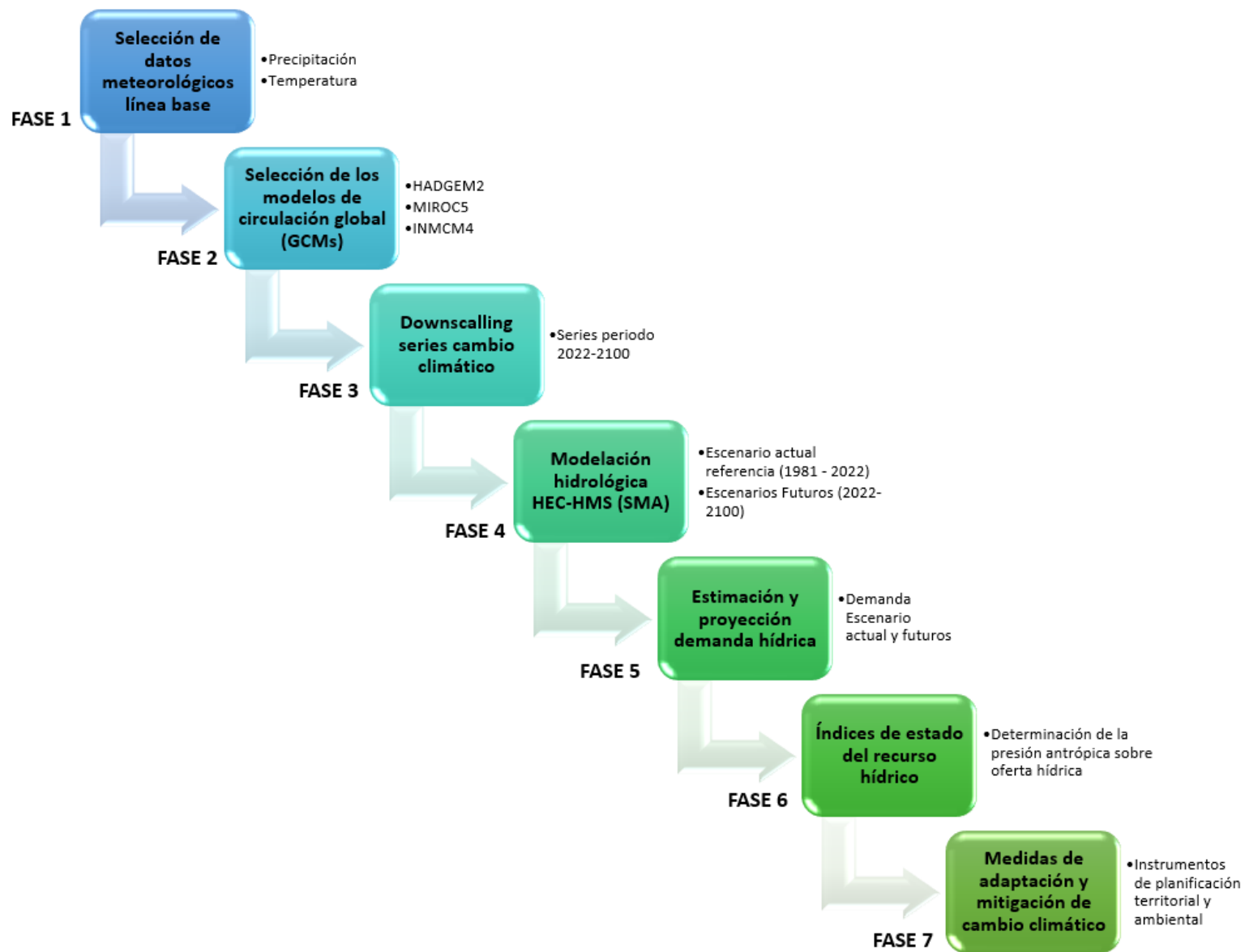


Figura 15. Metodología Planteada

- **Fase 2: Selección de los modelos de circulación global (GCMs):** Esta etapa permite realizar la revisión de la información disponible de los modelos climáticos contenida en la base de datos del proyecto CMIP5, para lo cual se evalúa el comportamiento de 3 GCMs que presentan el mejor ajuste para la región en la que se encuentra el proyecto, de acuerdo con investigaciones previas que evaluaron el comportamiento de estos escenarios para Colombia y posteriormente analizar la tendencia de los registros observados con los valores históricos de los modelos climáticos del CMIP5 seleccionados respecto a las estaciones IDEAM que estaban dentro del periodo histórico de referencia 1981- 2005.
- **Fase 3: Downscaling series cambio climático:** A partir de la selección de los modelos y escenarios seleccionados se realiza la descarga de las variables de precipitación y temperatura a resolución diaria para el periodo 2022-2100 del repositorio del quinto proyecto de Inter comparación de modelos acoplados (WCRP, 2022). Posteriormente, con el propósito de llevar a cabo la regionalización a una escala más detallada o downscaling estadístico con un método de cálculo que combina el método de factor de ajuste a nivel mensual y de la teoría de máxima entropía a nivel diario, para llevar a cabo la desagregación de la precipitación a escala temporal diaria.
- **Fase 4: Modelación hidrológica HEC-HMS (SMA):** Los modelos hidrológicos son representaciones matemáticas del ciclo del agua (transformaciones lluvia – escorrentía) que permiten crear y proyectar eventos e información real de cuencas hidrográficas, ya que tiene como finalidad simular y reconocer de forma aproximada las condiciones y /o dinámica que presentarían estas ante cambios climáticos, uso de suelos, entre otros. Con el propósito de evaluar la oferta hídrica en la zona de estudio fue necesario implementar un modelo hidrológico de simulación de proceso continuo de precipitación-escorrentía basada en condiciones iniciales de precipitación (simulación de caudales diarios) que permitiera estimar y cuantificar la oferta hídrica total a nivel mensual y diario y posteriormente poder realizar cambios en sus entradas o variables (variables climáticas, uso

y cobertura del suelo entre otros) con el fin de estimar los cambios en la producción hídrica bajo los escenarios de cambio climático, para este caso se implementó el método de Soil Moisture Accounting (SMA) que considera la existencia de tres capas (capa de suelo, capa de agua subterránea 1 y capa de agua subterránea 2) las cuales permiten representar la dinámica del movimiento del agua entre ellas.

- **Fase 5: Estimación y proyección demanda hídrica:** Corresponde a la estimación de la extracción de agua del sistema para ser usado como parte de las actividades productivas, desde el punto de vista económico y para el uso doméstico para lo cual se estima y proyectar las demandas para los diferentes sectores presentes en la cuenca hidrográfica (doméstico, industrial, agrícola entre otros) con el fin de obtener la demanda total asociada a la cuenca en un periodo de tiempo dado.
- **Fase 6: Índices de estado del recurso hídrico:** Para cuantificar el estado del recurso hídrico en torno a la cantidad y calidad, el IDEAM mediante los estudios nacionales del agua ha desarrollado un sistema de indicadores hídricos que pretenden medir y categorizar la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectaciones a la oferta o a la calidad. Estos índices están asociados al régimen natural (Índice de Aridez - IA, Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento- IVH, Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua - IACAL e Índice de Calidad del Agua - ICA), de acuerdo con la información disponible y con los resultados de los modelos hidrológicos para los escenarios de cambio climático se evaluarán los índices más significativos con el propósito de evaluar el posible cambio de la oferta hídrica y la presión ejercida en la cuenca bajo el panorama de la acción del cambio climático.
- **Fase 7: Medidas de adaptación y mitigación de cambio climático:** A partir de los resultados de los modelos hidrológicos bajo los escenarios de cambio climático y la evaluación de los mismos mediante los índices de estado del recurso hídrico, se establecerán las posibles adaptaciones que

debe realizar la cuenca del río Bita para enfrentar las variaciones en la disponibilidad del recurso debido al cambio climático. La presentación de estas medidas de adaptación tiene como finalidad utilizar eficientemente los recursos hídricos disponibles con las nuevas condiciones climáticas y adecuadas medidas de adaptación basadas en prácticas reconocidas de gestión del agua y del territorio contribuirán a reforzar la resistencia a los futuros cambios climáticos y a aumentar así la seguridad hídrica.

7. Resultados

7.1. Selección de datos meteorológicos línea base

7.1.1. Precipitación

7.1.1.1. Caracterización de la información disponible

Para la precipitación inicialmente se realiza la revisión de información disponible y posterior descarga de las estaciones de propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Una vez realizado lo anterior, se observa que la cuenca del río Bita no cuenta con estaciones dentro de su delimitación, por lo tanto, se obtienen los datos de las estaciones cercanas indicadas en la **Figura 16**, las cuales cuentan con la información inventariada en la **Tabla 7**.

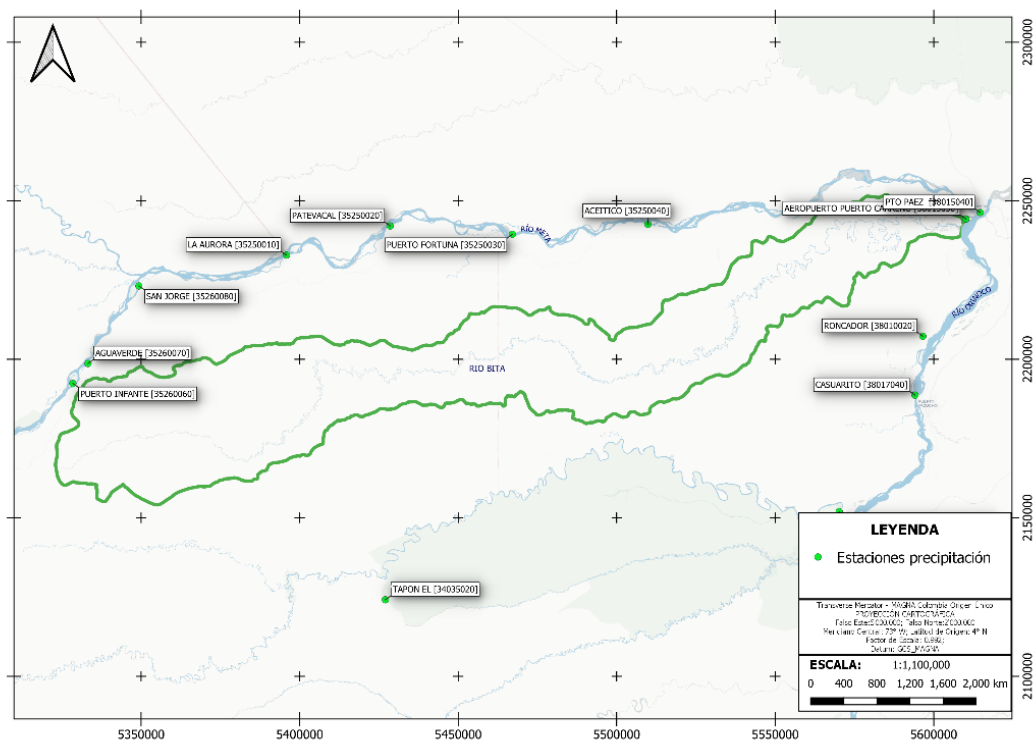


Figura 16. Localización estaciones de precipitación.

Tabla 7. Inventario información disponible de precipitación estaciones IDEAM

NOMBRE	FECHA INICIO DATOS	FEHA FIN DATOS	NO. DATOS	FALTANTES (%)
ACEITICO [35250040]	24/06/1983	30/04/2022	13287	6.4
AEROPUERTO PUERTO CARRENO [38015030]	1/01/1981	15/08/2022	14939	1.7
AGUVERDE [35260070]	18/06/1983	30/07/2022	13532	5.3
CASUARITO [38017040]	15/04/1984	31/07/2022	13481	3.6
LA AURORA [35250010]	1/02/1983	30/06/2022	13528	6
PATEVACAL [35250020]	21/06/1983	1/03/2022	10938	22.6
PTO PAEZ [38015040]	1/01/1981	31/12/1989	3285	78.1
PUERTO FORTUNA [35250030]	22/06/1983	30/04/2022	13798	2.8
PUERTO INFANTE [35260060]	16/06/1983	30/06/1986	1073	92.8
RONCADOR [38010020]	8/02/1984	30/09/1994	3234	78.4
SAN JORGE [35260080]	18/06/1983	31/01/2021	12408	9.7
TAPON EL [34035020]	1/01/1981	30/08/2014	9890	34
TUPARRO BOCAS - TOMO [34035010]	1/01/1981	31/12/2019	10181	28.5
VUELTA MALA [35260050]	15/06/1983	30/06/2022	13044	8.5

Debido a que no se encuentran estaciones dentro de la cuenca, se considera la posibilidad de hacer uso de otras fuentes de información, como los datos provenientes de reanálisis. De acuerdo con Urrea Minota (2017) y Báez-Villanueva, et al (2018), el producto CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations) obtiene un mejor desempeño para Colombia con respecto a los demás evaluados. Dicho producto contiene mapas de precipitación diaria desde el año 1981, que cubren prácticamente todo el planeta (entre los 50°S - 50°N, y para todas las longitudes) con una resolución espacial de 0.05°, aproximadamente 5.6 km (Funk, y otros, 2015).

Por lo anterior, se busca establecer si la precipitación es representada adecuadamente por dicho producto comparándola con la observada en las estaciones de precipitación del IDEAM, para ello se selecciona la ventana de tiempo 1985-2015, en la que se tiene información de varias estaciones con poca cantidad de faltantes como se observa en la **Figura 17**, seleccionando las estaciones Aceitico [35250040], Aeropuerto Puerto Carreno [38015030], Aguaverde [35260070], Casuarito [38017040], La Aurora [35250010], Puerto Fortuna [35250030], San Jorge [35260080] y Vuelta Mala [35260050].

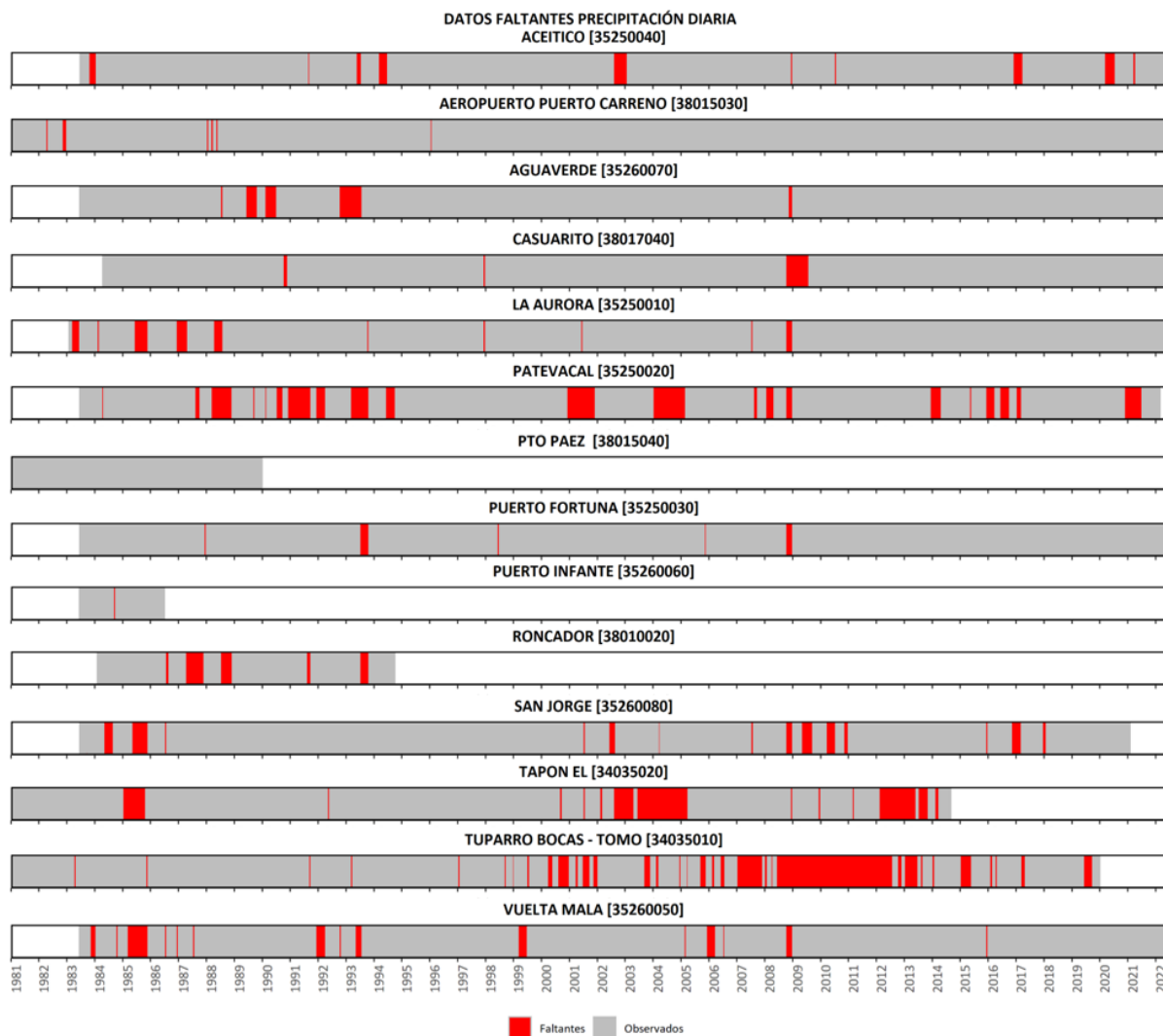


Figura 17. Información disponible de precipitación indicando periodos de datos observados y faltantes.

La precipitación observada en las estaciones mencionadas fue comparada con la estación más cercana de CHIRPS buscando establecer el desempeño de dicha información con respecto a la obtenida por el IDEAM, para ello se descarga la información de reanálisis desde el repositorio oficial en el periodo mencionado para la zona de estudio, obteniendo datos para todas las estaciones indicadas en la **Figura 18.**

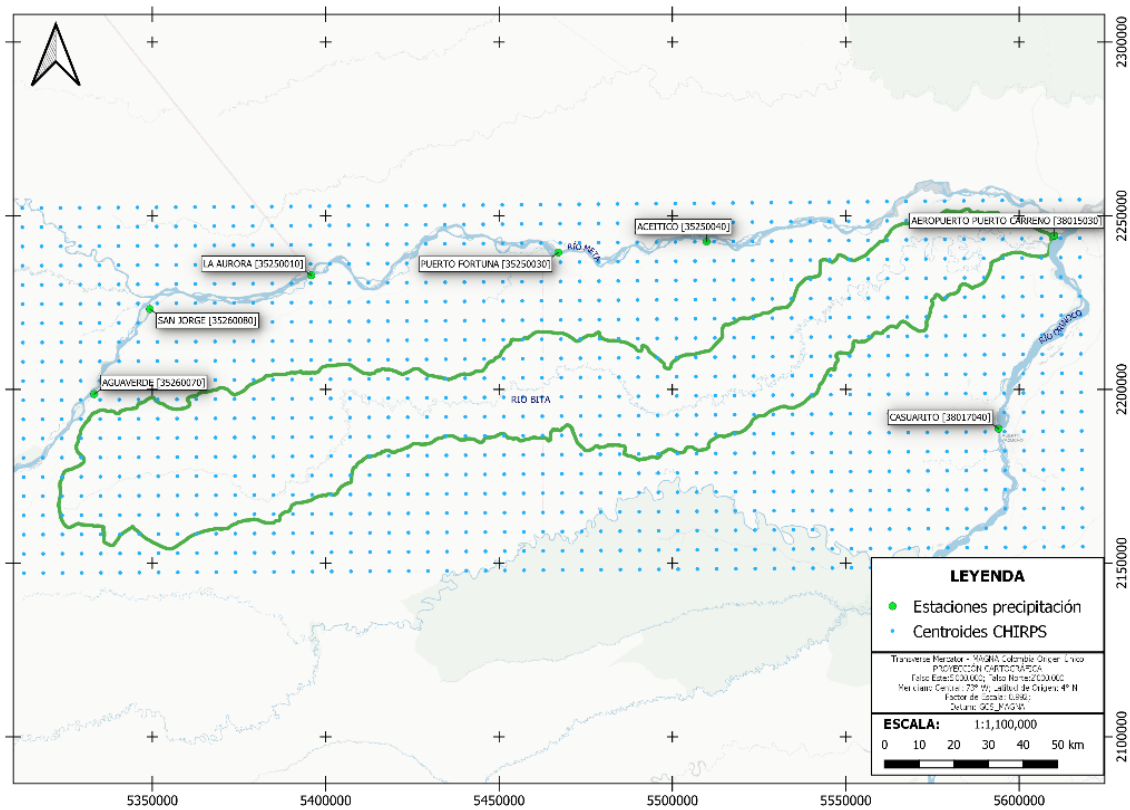


Figura 18. Localización estaciones de precipitación y de reanálisis CHIRPS.

Con el fin de realizar la comparación mencionada se seleccionan las estaciones de CHIRPS más cercanas a cada una de las estaciones del IDEAM indicadas, obteniendo una buena representación de la precipitación a escala mensual, observándose un comportamiento interanual muy similar, con una adecuada representación espacial, así como de la magnitud de la precipitación, como se indica en la **Figura 19.**

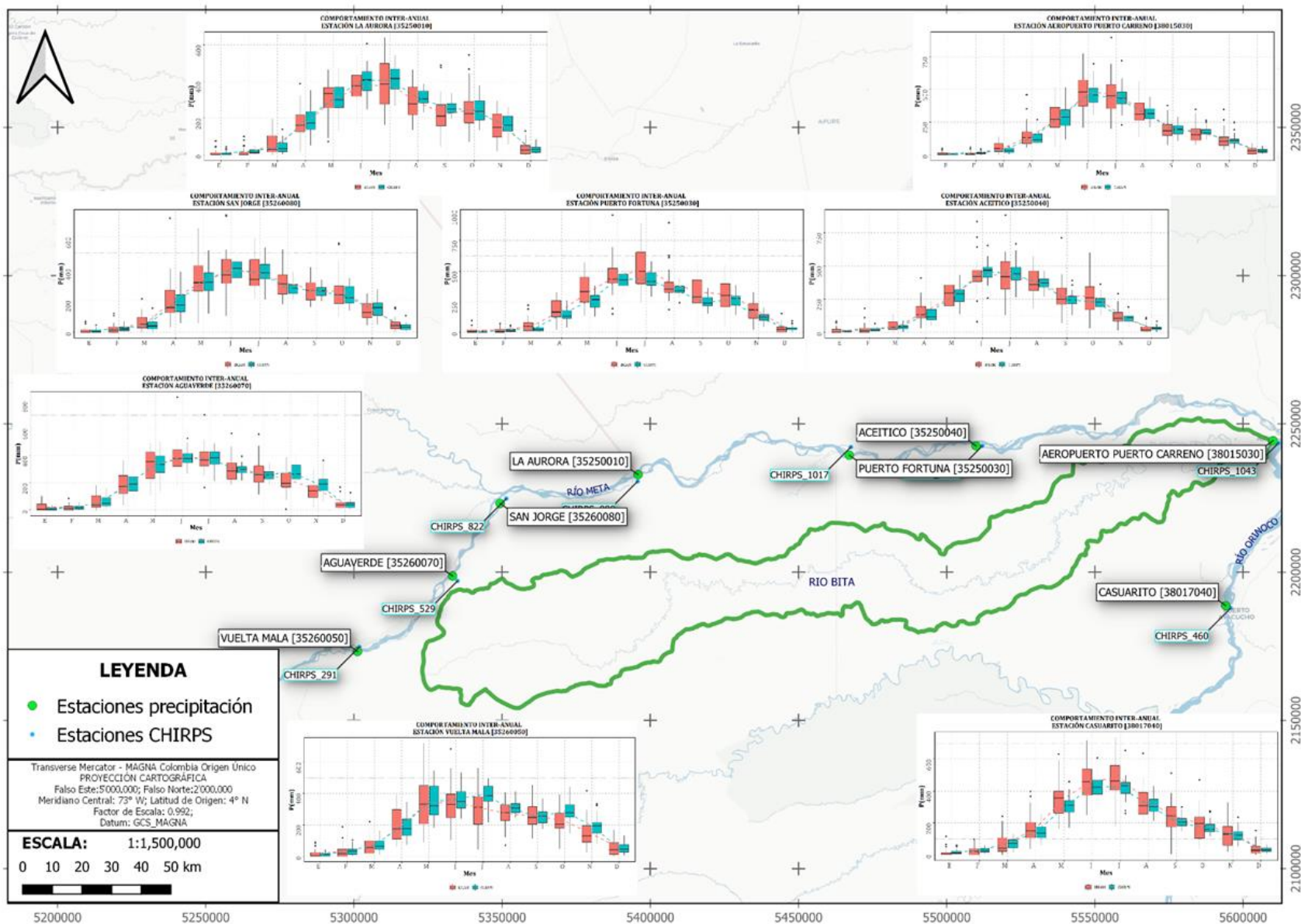
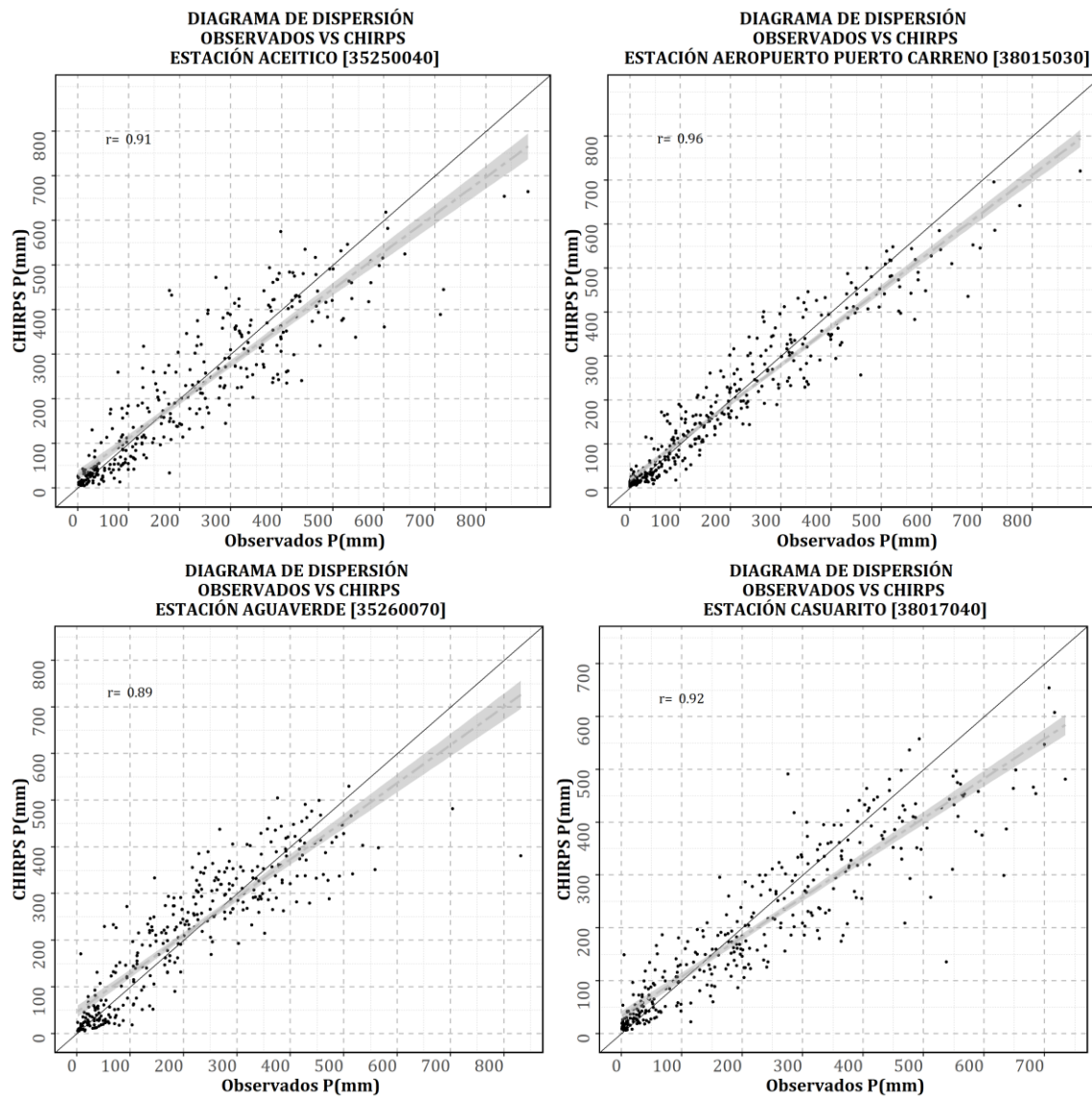


Figura 19. Comparación con graficas boxplot de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.

A su vez, en la Figura 20 se observa en las gráficas de dispersión una muy buena representación de la magnitud de la precipitación mensual con valores de correlación entre 0.83 y 0.96, además, de acuerdo con las métricas indicadas en la Tabla 8 dicho ajuste es validado con valores de las métricas de desempeño de Nash-Sutcliff (NSE) y Kling Gupta (KGE) entre 0.64 y 0.91, así como valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre 50 y 90 mm, y un error cuadrático medio (MAE) entre 36 y 68 mm, que para una precipitación mensual del orden promedio de 200 mm, se consideran aceptables.



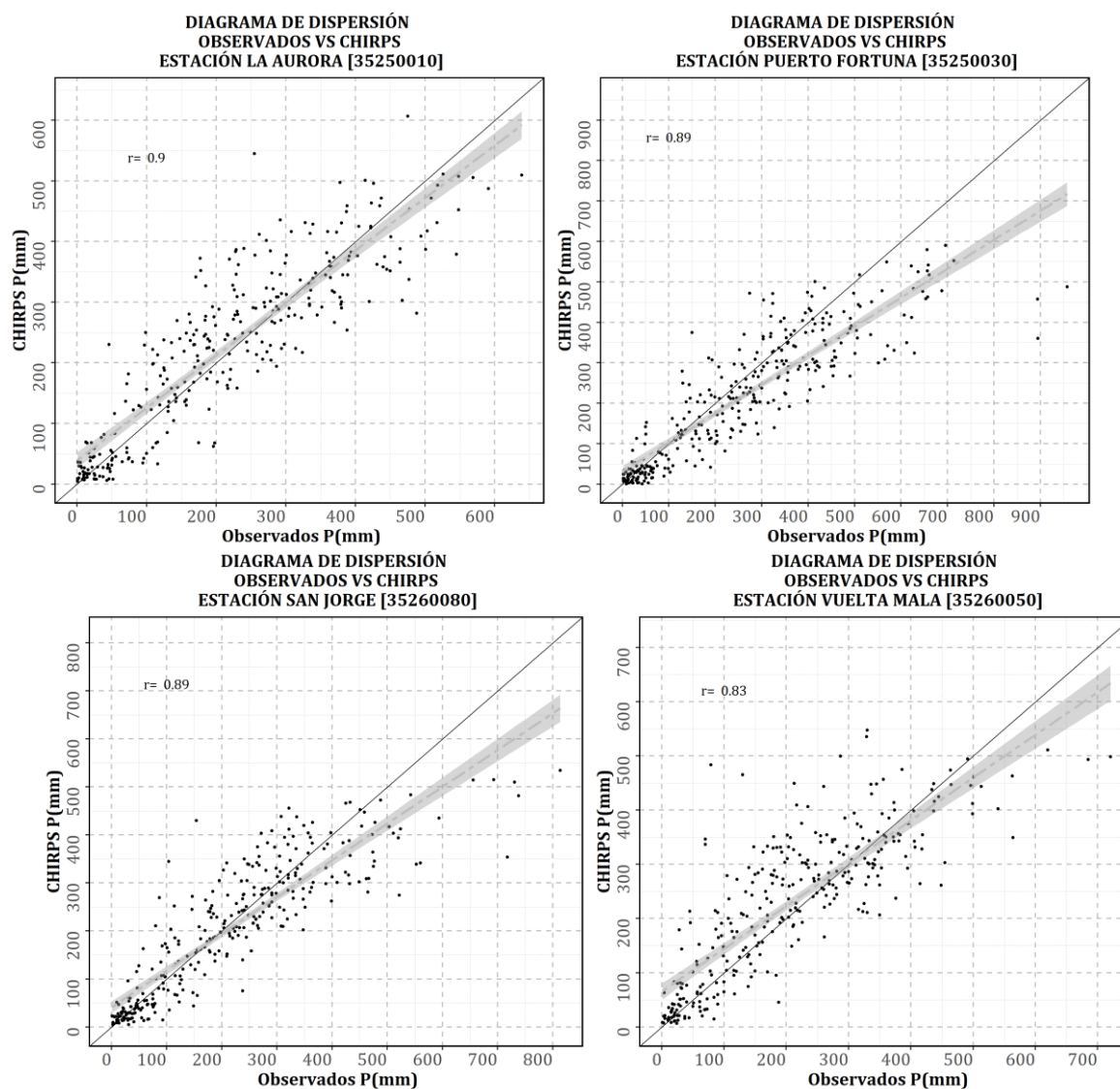


Figura 20. Comparación con graficas de dispersión de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.

Tabla 8. Métricas escala diaria comparación CHIRPS-IDEAM

ESTACIÓN	NSE	KGE	RMSE	MAE
ACEITICO [35250040]	0.82	0.87	74.93	52.66
AEROPUERTO PUERTO CARRENO [38015030]	0.91	0.89	52.95	36.94
AGUVERDE [35260070]	0.78	0.86	70.40	51.04
CASUARITO [38017040]	0.81	0.78	77.96	53.63
LA AURORA [35250010]	0.78	0.88	69.01	51.91
PUERTO FORTUNA [35250030]	0.74	0.72	98.54	67.76
SAN JORGE [35260080]	0.77	0.82	75.45	51.66
VUELTA MALA [35260050]	0.64	0.79	85.15	60.15

7.1.2. Temperatura

7.1.2.1. Caracterización de la información disponible

Para la temperatura inicialmente se realiza la revisión de información disponible y posterior descarga de esta para las estaciones de propiedad del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) para el periodo seleccionado como línea base (1981-2005). Una vez realizado lo anterior, se observa que la cuenca del río Bita no cuenta con estaciones dentro de su delimitación, por lo tanto, se obtienen los datos de las estaciones en un rango de búsqueda más extenso que en el caso de la precipitación indicadas en la **Figura 21**, las cuales cuentan con la información inventariada en la **Tabla 9** y además poseen una amplia variedad de elevaciones necesaria para el proceso posterior.

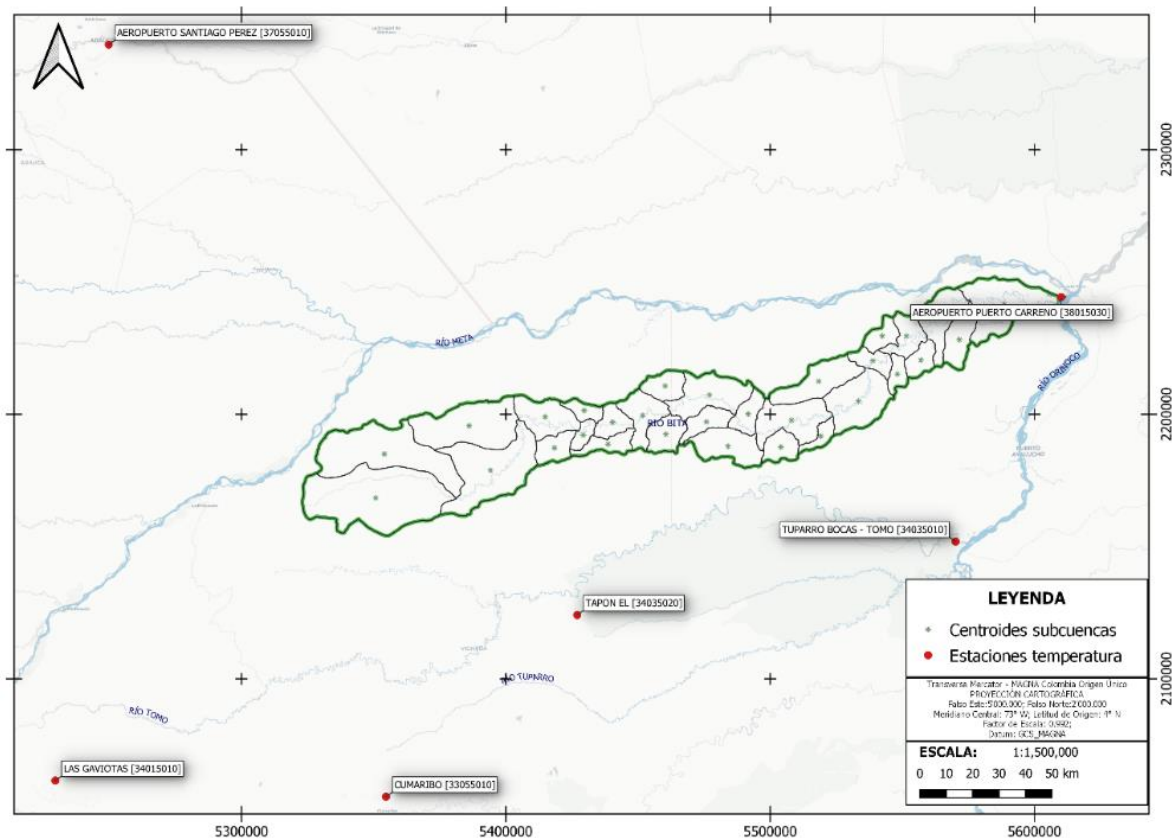


Figura 21. Localización estaciones de temperatura.

Tabla 9. Inventario información disponible de precipitación estaciones IDEAM

NOMBRE	FECHA INICIO DATOS	FECHA FIN DATOS	NO. DATOS	FALTANTES (%)
CUMARIBO [33055010]	25/07/1991	31/12/2005	3926	57.0
LAS GAVIOTAS [34015010]	1/01/1981	29/11/2005	8264	9.5
TUPARRO BOCAS - TOMO [34035010]	2/01/1981	31/12/2005	5314	41.8
TAPON EL [34035020]	1/01/1981	31/05/2003	6066	33.6
AEROPUERTO PUERTO CARRENO [38015030]	1/01/1981	31/12/2005	8206	10.1
AEROPUERTO SANTIAGO PÉREZ [37055010]	2/01/1981	31/12/2005	8430	7.7

Debido a que la temperatura es función de la altura se propone la creación de estaciones virtuales dentro de la cuenca correspondientes a los centroides de las subcuencas, en cada uno de estos puntos se calcula dicha variable haciendo uso de un ajuste por elevación de la regresión lineal de la temperatura diaria futura en las estaciones del IDEAM.

Para ello, en primera medida se realiza la descarga de los datos de cambio climático de los modelos definidos previamente en los centroides indicados en la **Figura 22**, estos cambian con respecto a los de la precipitación por la ampliación del rango de búsqueda.

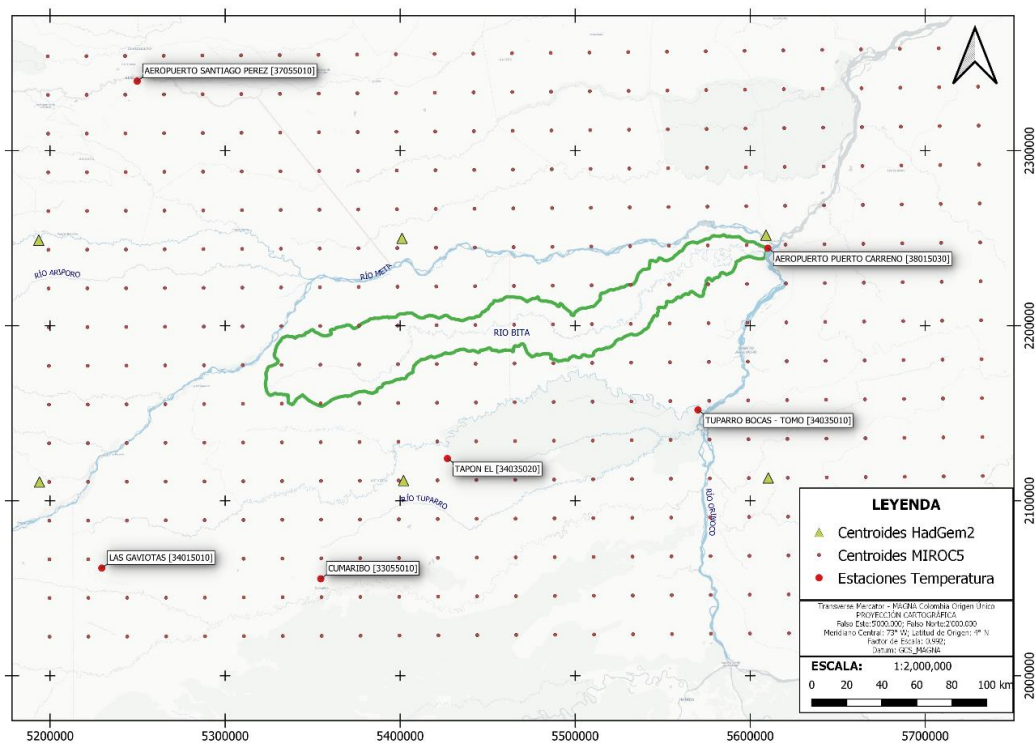


Figura 22. Localización centroides GCMs para temperatura.

Una vez obtenidas las series de temperatura para los centroides de los modelos, se sigue el mismo proceso que en la precipitación, se realiza reducción de escala mensual utilizando la metodología propuesta por Pabón (2012) y posteriormente la reducción de escala diaria propuesta por Güiza-Villa (2019), como se indicó previamente en la **Figura 15**. De esta manera, se obtienen las series diarias futuras de temperatura para cada una de las estaciones propiedad del IDEAM indicadas previamente, posterior a ello se realiza una regresión lineal diaria en función de la elevación de las estaciones del IDEAM, con la que se ajusta la precipitación diaria para cada uno de los centroides de las subcuencas en función igualmente de su elevación.

De acuerdo con lo anterior se obtienen las series de temperatura para los modelos y escenarios seleccionados, las cuales serán utilizadas como insumo para la modelación hidrológica y se encuentran anexas al presente documento.

7.2. Selección de los modelos de circulación global (GCMs)

Una vez definida la fuente de información de la precipitación dentro de la cuenca se pre-seleccionan los modelos de cambio climático de la cuarta comunicación de cambio climático del IPCC consignados en la tercera comunicación de cambio climático del IDEAM (2015): MIROC5, HADGEM2 y INMCM4, en función de lo indicado en los artículos de Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez (2017) , Palomino-Lemus (2015) y Ortega & Arias (2018), en los que se consideran los modelos con mejor ajuste para la región en la que se encuentra el proyecto, lo cual se ejemplifica en la **Figura 23**.

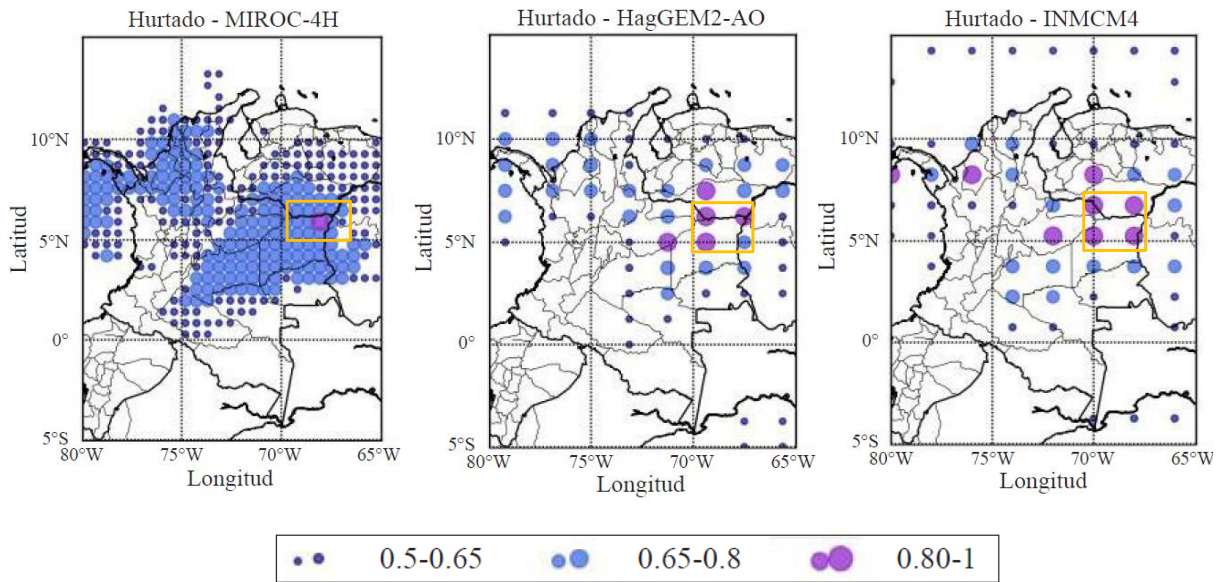


Figura 23. Correlaciones mayores a 0.65 para la zona de estudio (amarilla) con los modelos seleccionados.

Fuente: Tomado de Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez (2017)

Con el fin de establecer el modelo o modelos a seleccionar se realiza una comparación de la línea base de los modelos con los datos observados en las estaciones propiedad del IDEAM, para ello se utiliza el periodo 1981-2005 ya que es la información disponible conjunta como línea base de los modelos de circulación global MIROC5, HADGEM2 y INMCM4, preseleccionados anteriormente y de las estaciones IDEAM indicadas previamente.

En primera medida se observa en la **Figura 24** la localización de los centroides de los modelos seleccionados, observándose únicamente 4 puntos para los modelos HADGEM2 y INMCM4 a diferencia del modelo MIROC5 que cuenta con mayor densidad de información.

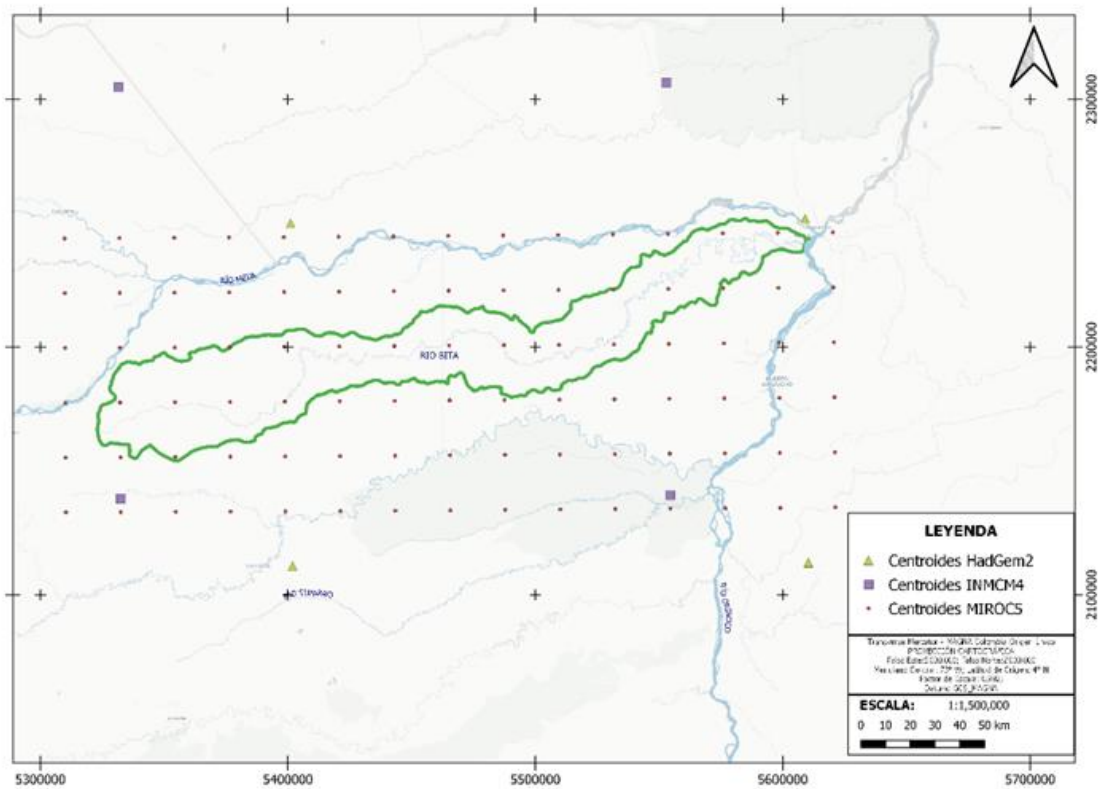


Figura 24. Localización centroides modelos de cambio climático pre-seleccionados.

En la **Figura 25** se indica la variación interanual de la precipitación tanto para los valores observados en las estaciones del IDEAM así como de los modelos GCM, se puede observar una buena representación de la variación interanual para todos los modelos, pero no se ven tan bien representadas las magnitudes mensuales, visualmente parecen ser mejor representadas por los modelos MIROC5 y HADGEM2, ya que en la mayoría de estaciones y meses la cantidad de precipitación mensual observada no es alcanzada por el modelo INMCM4.

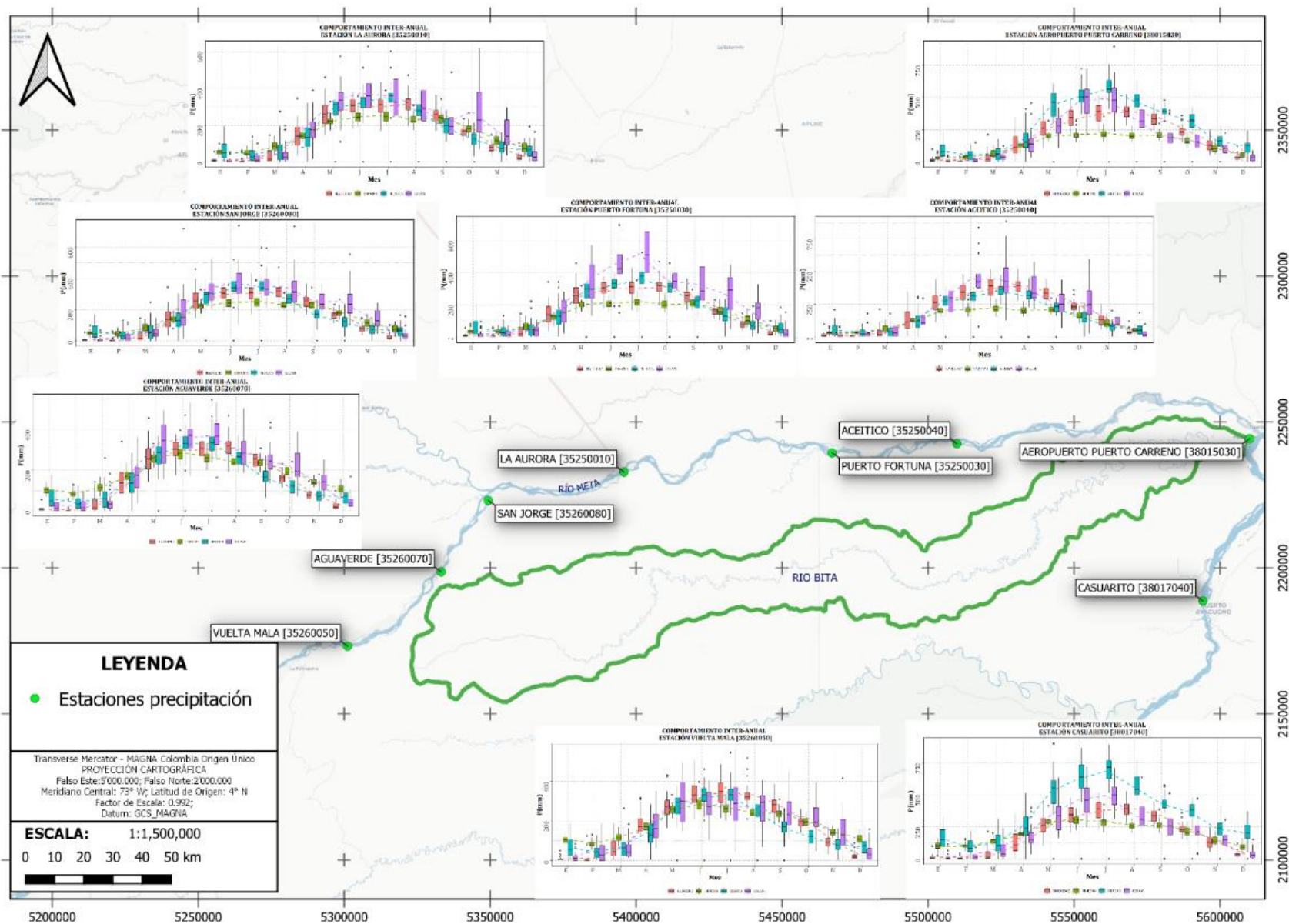


Figura 25. Comparación con graficas boxplot de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y de los modelos de circulación global MIROC5, HADGEM2 y INMCM4.

De manera cuantitativa se evalúa el desempeño de los modelos GCM, indicándose en la **Tabla 10** los valores de las métricas para la precipitación mensual, calculando Nash-Sutcliff (NSE), Kling Gupta (KGE), raíz del error cuadrático medio (RMSE) y error cuadrático medio (MAE), para cada uno de los modelos con respecto a los valores observados en la línea base, resaltando los de mejor desempeño en cada métrica y cada estación.

Tabla 10. Métricas escala mensual comparación GCMs-IDEAM

ESTACION	NSE	NSE	NSE	KGE	KGE	KGE	RMSE	RMSE	RMS	MAE	MAE	MAE
	HAD	INM	MIR	HAD	INM	MIR	HAD	INM	E MIR	HAD	INM	MIR
ACEITICO [35250040]	0.58	0.25	0.48	0.71	0.26	0.55	119	159	133	87	109	93
AEROPUERTO PUERTO CARRENO [38015030]	0.50	0.30	0.25	0.68	0.27	0.48	129	153	158	91	100	125
AGUAVERDE [35260070]	0.55	0.53	0.47	0.72	0.46	0.64	95	97	103	72	76	80
CASUARITO [38017040]	0.51	0.43	- 0.29	0.68	0.37	0.28	127	138	208	91	103	172
LA AURORA [35250010]	0.38	0.31	0.33	0.60	0.36	0.56	119	126	124	90	92	88
PUERTO FORTUNA [35250030]	0.44	0.15	0.45	0.51	0.23	0.53	140	172	138	103	123	103
SAN JORGE [35260080]	0.46	0.38	0.33	0.60	0.40	0.54	113	121	126	79	82	89
VUELTA MALA [35260050]	0.28	0.45	0.18	0.66	0.46	0.55	106	93	113	80	76	87
PROMEDIO	0.36	0.33	- 0.10	0.60	0.34	0.37	124	132	156	90	96	122

A su vez realizando graficas de dispersión de los valores observados vs los simulados por los modelos se observa que el modelo INMCM4 tiende a subestimar las magnitudes mensuales como se observa en la **Figura 26** para la estación Aeropuerto Puerto Carreño [38015030], las demás estaciones tienen un comportamiento muy similar.

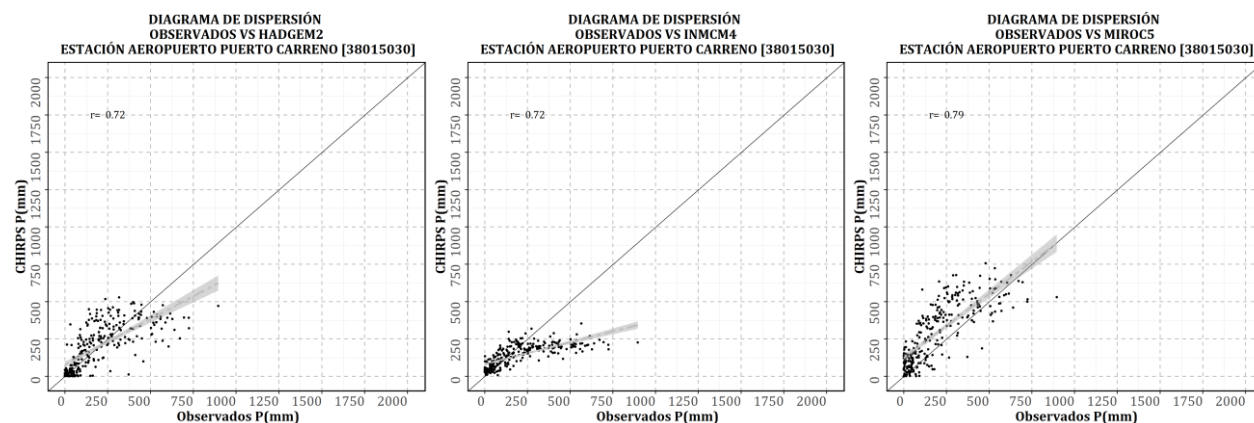


Figura 26. Comparación con graficas de dispersión de los datos mensuales observados por estaciones IDEAM y modelados por reanálisis CHIRPS.

Dado lo anterior, se seleccionan los GCMs HADGEM2 y MIROC5 como modelos definitivos, considerando sus valores en las métricas de ajuste indicadas previamente, además, considerando la subestimación de la precipitación mensual y en algunos casos poca representación del comportamiento interanual del modelo INMCM4, el cual es descartado. Los resultados pueden observarse en el Anexo 1.

7.3. Downscaling series cambio climático

Una vez establecidos los modelos a evaluar, se consideran los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 que suponen un incremento de temperatura de 2.4°C y 4.9°C respectivamente (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C., 2015), por lo que se asume el escenario RCP 4.5 como el optimista y el RCP 8.5 como el pesimista. Una vez seleccionados modelos y escenarios se realiza la descarga de las variables de precipitación y temperatura a resolución diaria para el periodo 2022-2100 del repositorio del quinto proyecto de Inter comparación de modelos acoplados (WCRP, 2022).

Con el fin de obtener una representación adecuada de la precipitación a escala mensual se hace uso del factor de ajuste propuesto por Pabón (2012) para la reducción de escala a dicha resolución, lo cual como se mencionó previamente se consigue con los datos de CHIRPS y de las estaciones propiedad del IDEAM. Posteriormente, se realiza una desagregación diaria usando el método de máxima entropía, todo

lo anterior siguiendo el método de reducción de escala espacial propuesto por Güiza-Villa (2019), de acuerdo con el proceso indicado en la **Figura 27**.

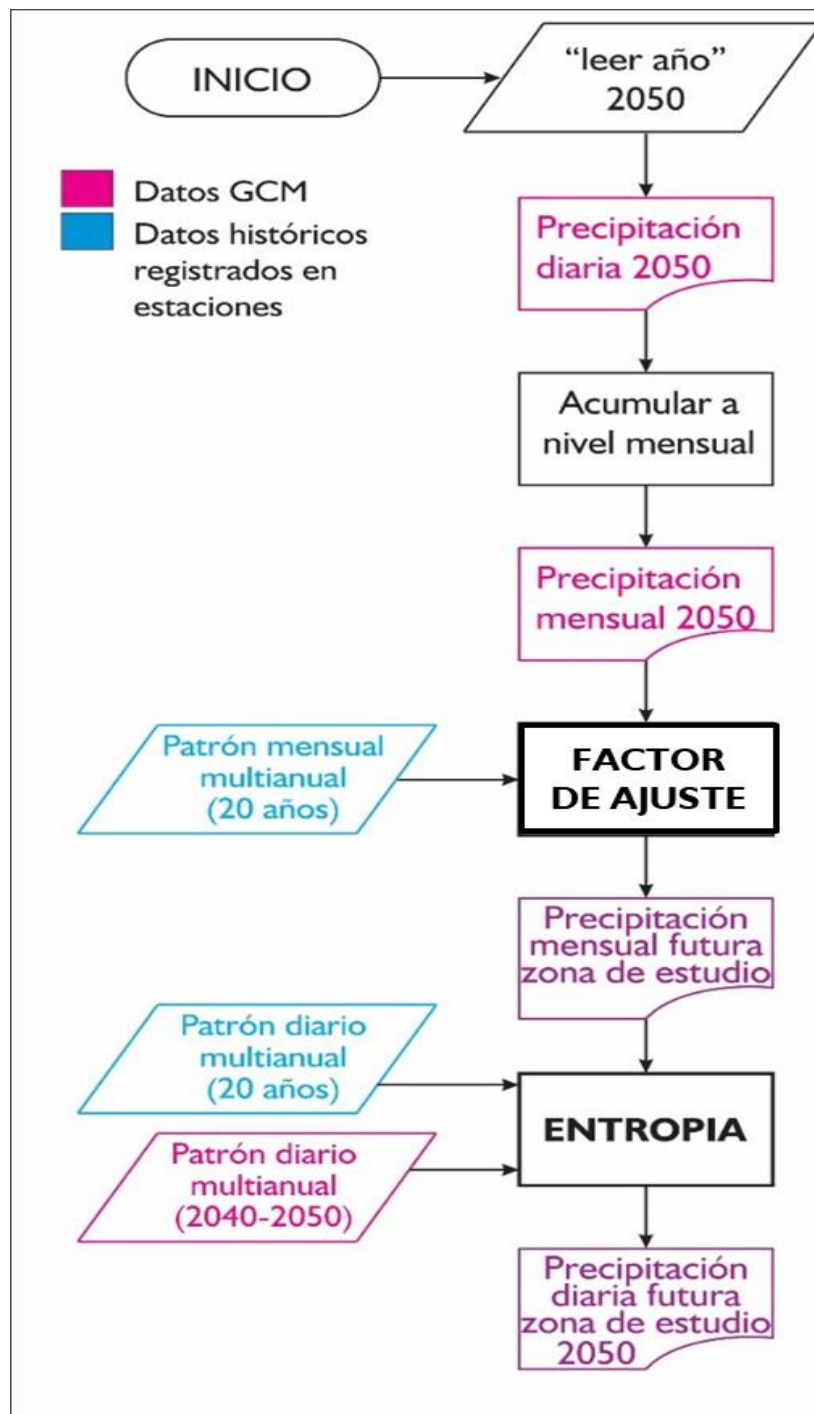


Figura 27. Metodología para la reducción de escala espacial de las variables meteorológicas de los escenarios de cambio climático, ejemplo año 2050.

Fuente: Tomado de Güiza-Villa (2019)

Realizando el procedimiento anterior se obtienen las series de precipitación para los modelos y escenarios seleccionados, las cuales serán utilizadas como insumo para la modelación hidrológica y se encuentran anexas al presente documento. Los resultados se pueden observar en el Anexo 2.

7.4. Modelación hidrológica HEC-HMS (SMA)

Con el fin propósito de estimar la oferta hídrica en cada una de las unidades hidrográficas de nivel 1 de la cuenca hidrográfica del río Bitá, se hace necesario tener una serie de caudales en cada una de las corrientes principales; sin embargo, esto no es posible ya que no se cuenta con estaciones de registro de caudal en estas y no existe alguna estación hidrológica dentro de la misma. Para tal fin, se tomó como base el modelo hidrológico implementado en el POMCA del río Bitá, en donde se utilizó el modelo Soil Moisture Accounting - SMA, desarrollado por US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, de los EUA.

7.4.1. Programa HEC-HMS

Para la simulación de las lluvias, se utilizó el programa HEC-HMS, (Hydrologic Engineering Center -Hydrologic Modeling System) del U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos. El software realiza la simulación hidrológica tipo evento, lineal y semi-distribuido, permitiendo estimar, a partir de las condiciones de lluvia dadas, los hidrógramas de caudal en la salida de una cuenca o varias subcuencas.

Este modelo HMS además está diseñado para simular la escorrentía superficial que resulta de una precipitación, mediante la representación de la cuenca mediante una interfaz gráfica con un sistema de componentes interconectados (subcuencas, tramos, uniones, fuentes, sumideros, depósitos y derivaciones). Cada componente modela un aspecto del proceso lluvia-escorrentía, permitiendo obtener respuestas tanto gráficas (hidrógramas) como tablas de comportamiento de cada una de las subcuencas.

7.4.1.1. Componentes de un Proyecto en HMS

Para realizar una modelación en HMS es necesario realizar un nuevo proyecto, en el cual se guardan los diferentes datos de la cuenca, datos hidrológicos y meteorológicos, básicamente un proyecto consta de cuatro componentes:

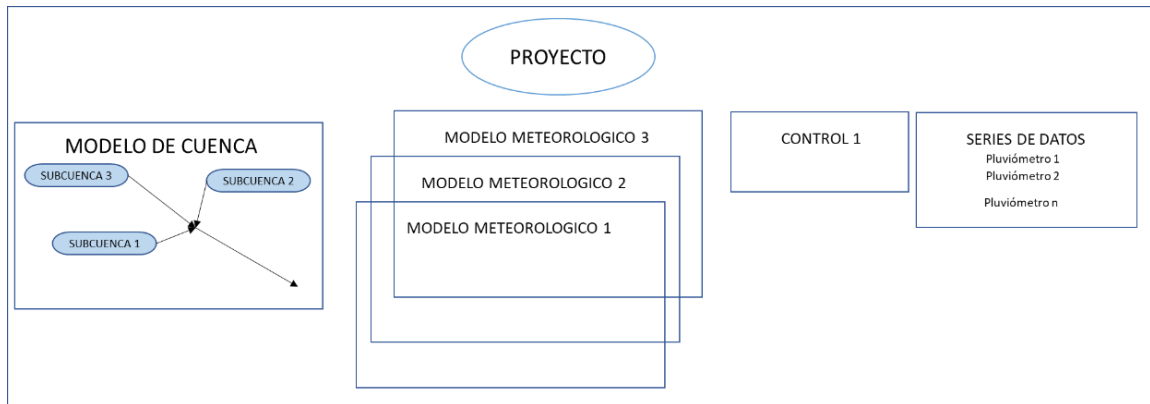


Figura 28. Componentes de un Proyecto en HMS

Modelo de la Cuenca: En este se da información al software sobre las características de la cuenca y subcuencas, para el caso de la cuenca del río Bita el modelo cuenta con 30 subcuencas.

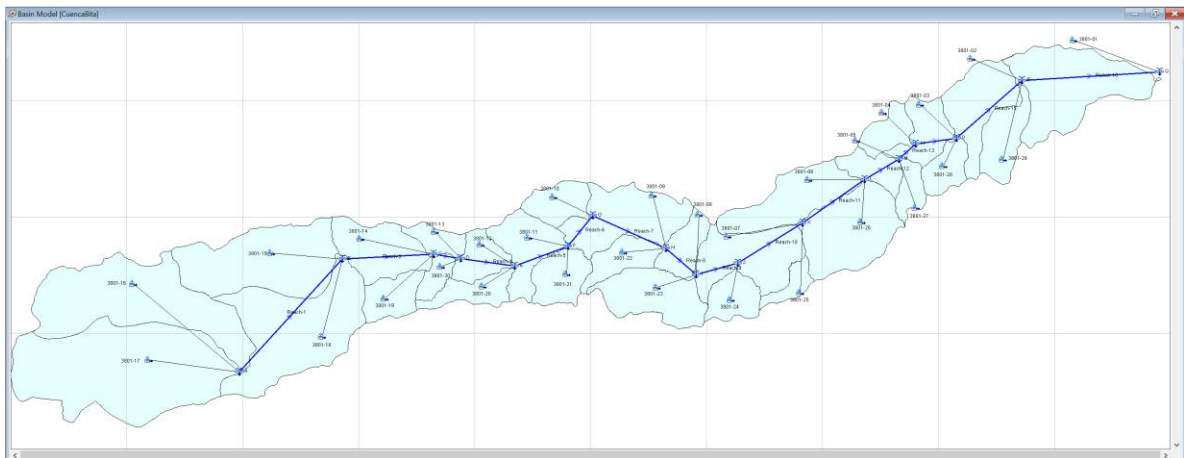


Figura 29. Modelo de la cuenca

Modelo meteorológico: El modelo meteorológico utiliza datos de precipitaciones, evapotranspiración, los cuales se asignan a cada una de las subcuencas. En el caso de los modelos con información obtenida de las estaciones del IDEAM (año 1990 a 2022) cuentan con 11 estaciones pluviométricas.

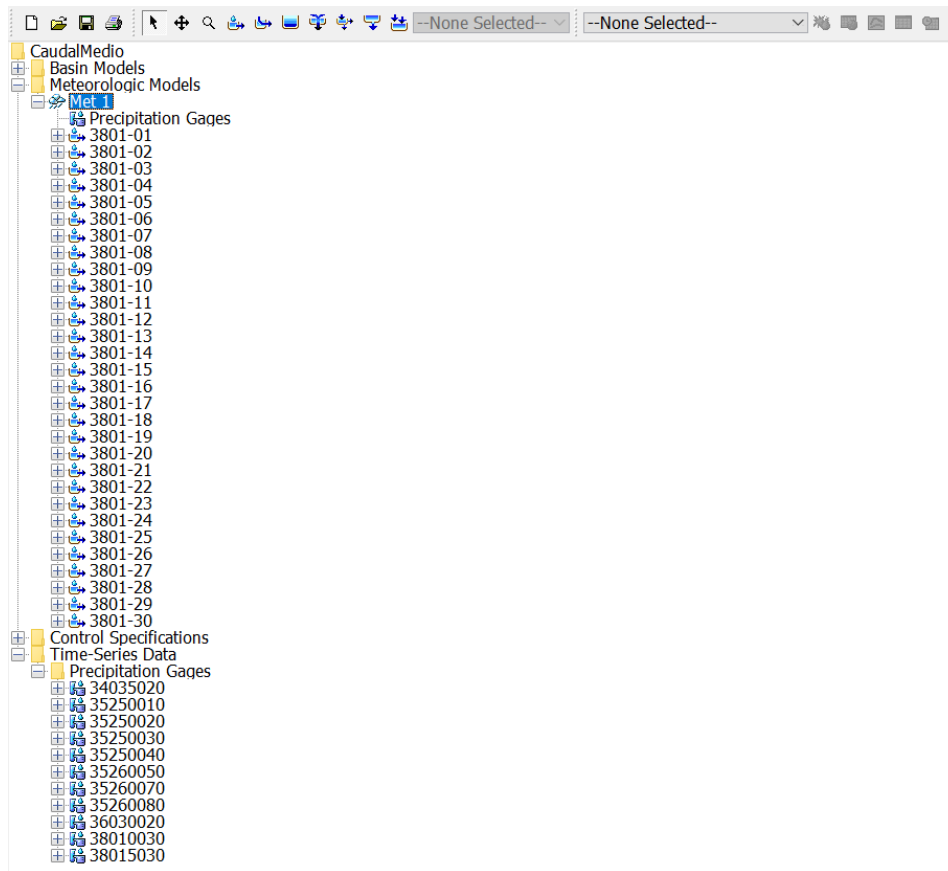


Figura 30. Modelo meteorológico

Para el caso de los modelos realizados con series de precipitaciones obtenidas mediante modelos de cambio climático (HadGem2 y Miroc 5), se obtuvo una estación para centroide de las respectivas subcuencas para un total de 30 estaciones sintéticas.

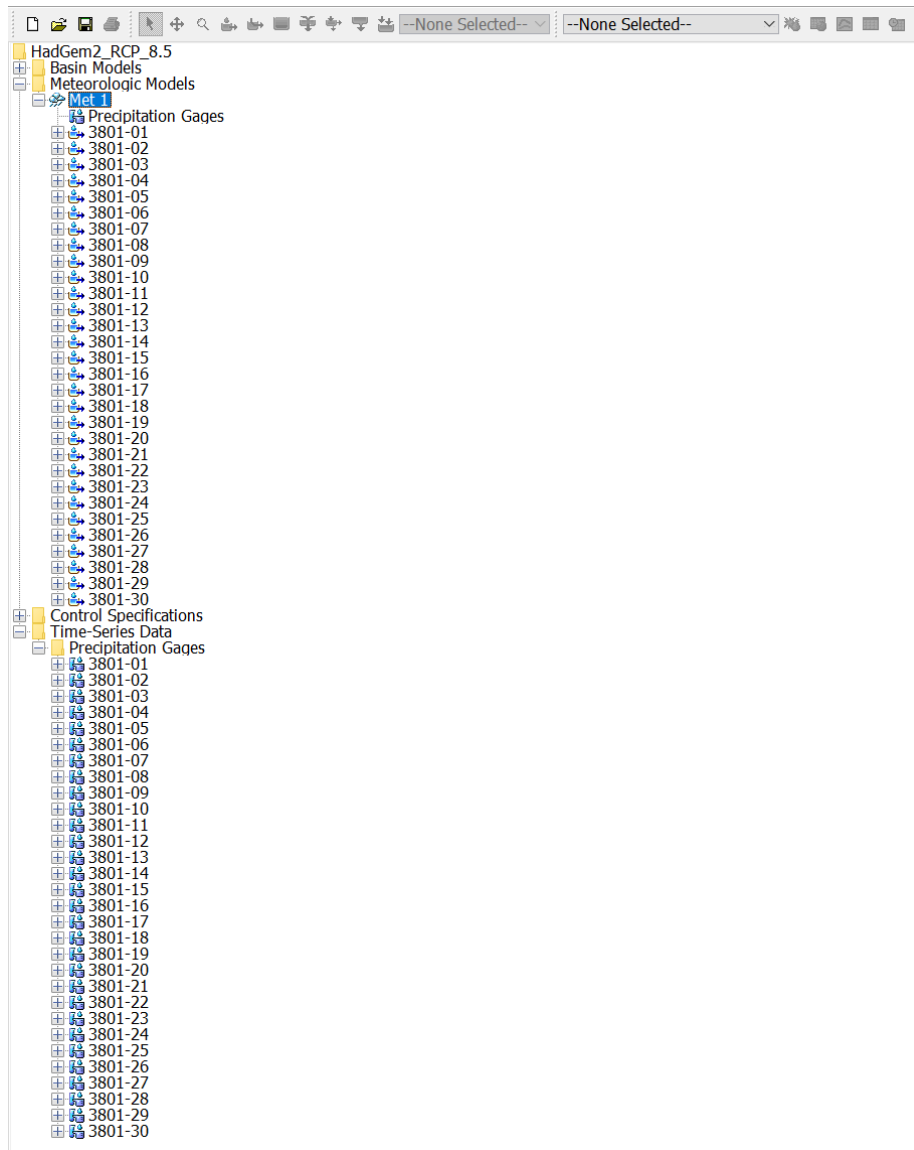


Figura 31. Modelo meteorológico de cambio climático

Especificaciones de control: Las especificaciones de control para cada modelo corresponden a la indicación que se le hace al programa de cuando debe empezar y terminar de calcular para un intervalo de tiempo determinado, el intervalo para el cálculo es diario por lo cual los modelos con información medida inician su cálculo el 01 de enero de 1990 y terminan el 31 de diciembre de 2021, para los modelos de cambio climático inician el 01 de enero de 2022 al 31 de diciembre de 2100.

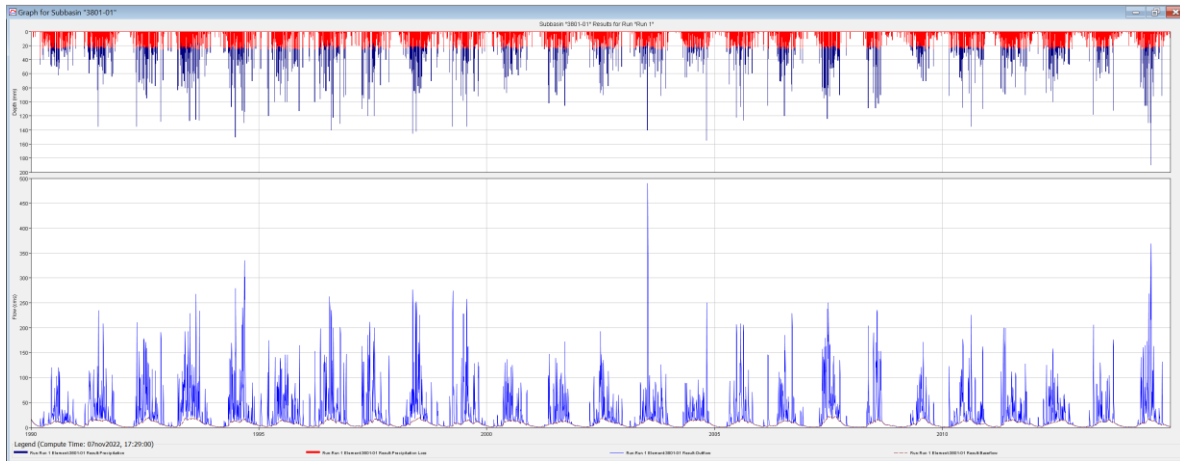


Figura 32. Intervalo de cálculo de 1990 a 2022

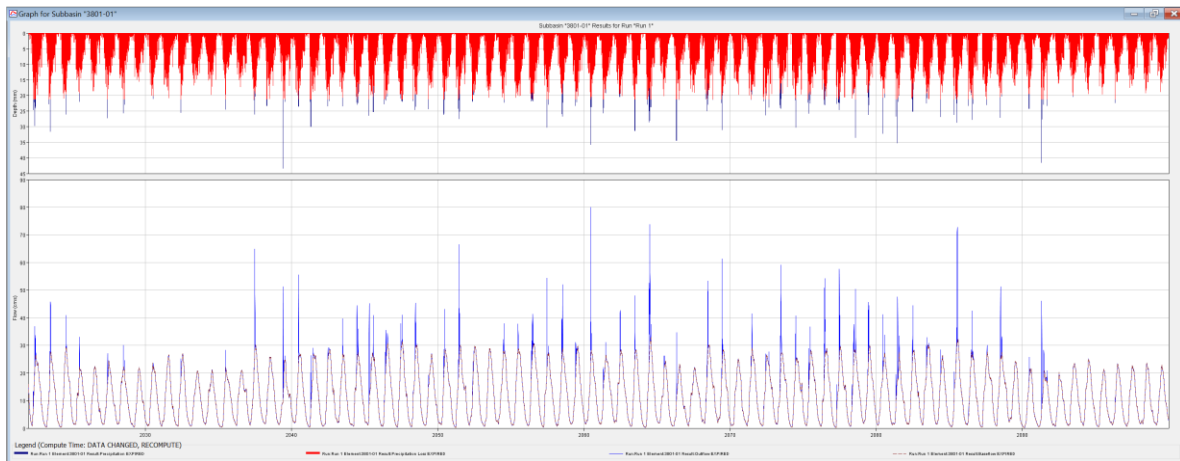


Figura 33. Intervalo de cálculo de 2022 a 2100

7.4.2. Implementación modelo SMA

El modelo SMA es un modelo hidrológico continuo que estima el exceso de precipitación rastreando la interceptación, infiltración, percolación, y evapotranspiración usando un modelo de almacenamiento de cinco capas tal como se muestra en la **Figura 34**, los tanques o almacenamientos incluyen interceptación de vegetación, depresión de superficie, perfil de suelo, agua subterránea superior y agua subterránea inferior, la información requerida para la aplicación del modelo es la siguiente:

- Área de la cuenca y/o unidades hidrográficas nivel 1
- Tiempo de retardo (Lag)

- Tormentas registradas en pluviógrafos u observatorios.
- Precipitación diaria y/o horaria correspondiente a las fechas del período a simular.
- Caudales máximos horarios y/o diarios de la creciente que se quiere simular, para poder calibrar el modelo.

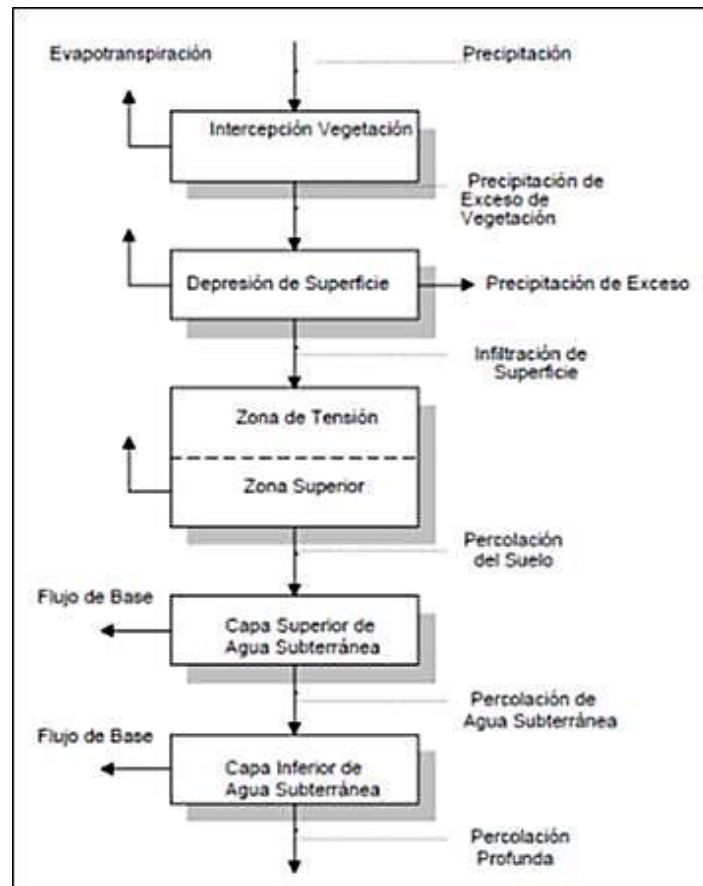


Figura 34. Diagrama del modelo de aproximación de humedad de suelo.

Fuente: Manual HEC-HMS, 2015

La implementación del modelo hidrológico del río Bitá, se realizó a través del software libre del Sistema de Modelación Hidrológica HMS, del US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, HEC, de los EUA, que permite simular el proceso lluvia-escurrimiento mediante diversos modelos que tiene incluidos dentro de su software, para este caso se implementó el modelo SMA de acuerdo con la metodología desarrollada y presentada en la **Figura 36**.

Para la utilización validación y calibración del modelo lluvia – escorrentía, se tomó como referencia la estación Santa Rita, ubicada sobre la corriente del río Vichada que tiene un área aferentes de 25293.1 km², según la clasificación según densidad de drenaje esta categorizada como drenada, pendiente suave, según el factor de forma la cuenca tiende a ser alargada y baja susceptibilidad a las avenidas, las cuales son características muy similares a la cuenca del río Bita, situación que permitió seleccionar para realizar una transposición de caudales en la cuenca total del río Bita, donde se estima que este valor debe ser más o menos cercano a 341.35 m³/s y el valor simulado en la salida de cuenca con el modelo SMA es de 340.27 m³/ubicada sobre la corriente Vichada.

Para la estimación de la oferta hídrica se implementó el modelo hidrológico mencionado, se calibró y validó de acuerdo con los parámetros establecidos en el modelo para el desarrollo del POMCA del río Bita y con base en este modelo, se modificaron las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración obtenidas a partir de los datos de CHIRPS e IDEAM y posteriormente se implementó el modelo con los datos de cambio climático de los modelos MIROC5 y HADGEM2 para los escenarios 2023-2053, 2054-2084, y 2085-2100, se generaron dos modelos para las condiciones actuales y 12 modelos para los escenarios de oferta hídrica como se presenta en la **Figura 35**.

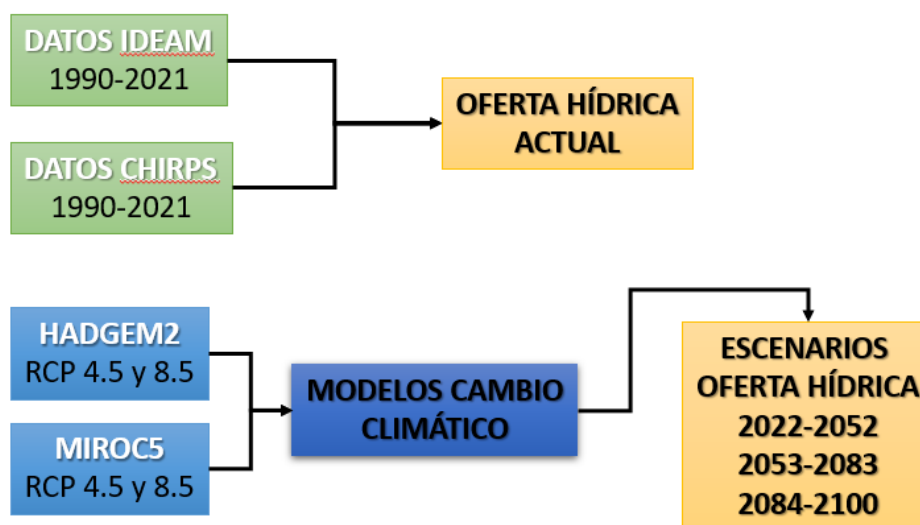


Figura 35. Escenarios de simulación modelo hidrológico.

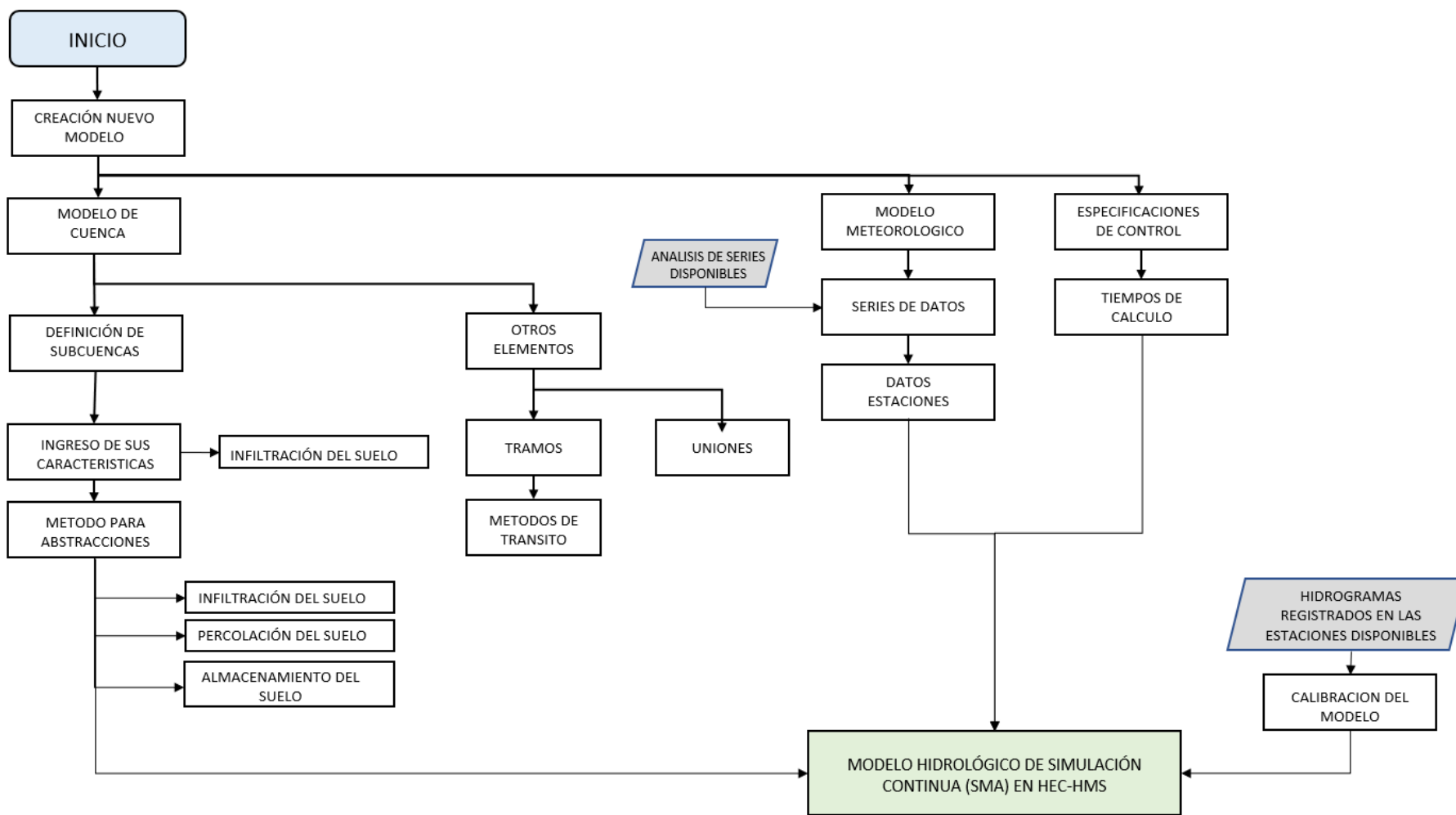


Figura 36. Metodología implementación modelo hidrológico SMA, cuenca río Bita.

Fuente: Adaptado Manual HEC-HMS, 2015

Una vez realizada la corrida de los modelos mencionados para cada una de las unidades hidrográficas nivel I (30 microcuencas), para cada una se realizaron los análisis estadísticos a nivel diario y mensual que permiten analizar los resultados obtenidos en cuanto a la oferta hídrica total para la cuenca del río Bitá. A manera de ejemplo se van a mostrar los resultados obtenidos para cada escenario para la unidad hidrográfica 3801-01 correspondiente a la salida de la cuenca hidrográfica.

A manera de resumen se generó una gráfica que contiene los resultados a escala mensual de los caudales obtenidos para la oferta hídrica actual (con datos de CHIRPS e IDEAM) y para los modelos de cambio climático para cada RCP en cada escenario de tiempo seleccionado. La primera parte contiene un análisis estadístico de la serie de datos de cada cuenca hidrográfica en donde se analizan las principales medidas de tendencia central, asimetría, dispersión y sesgo de los datos obtenidos que permiten observar cómo es el comportamiento de la serie a esta escala temporal, acompañada de su respectiva gráfica de la serie de tiempo a escala mensual.

Luego, se presenta la curva de duración de caudales mensuales que presenta el porcentaje del tiempo que un determinado valor de caudal es igualado o excedido durante el periodo analizado y representa de forma simple y directa el rango de variación de caudales en un punto específico de una corriente, para este caso se calcularon los porcentajes de excedencia más utilizados o empleados para diagnosticar (75.0%, 85.0%, 90.0%, 95.5% y 97.5%)

Por último, se presentan los análisis de los caudales medios mensuales multianuales (condición época media), los caudales máximos mensuales multianuales (condición época húmeda) y los caudales mínimos mensuales multianuales (condición época seca). En la **Figura 37** se presenta los resultados de la estimación de la oferta hídrica total para el escenario 1992-2021 con datos del IDEAM y en la **Figura 38** se presenta los resultados de la estimación de la oferta hídrica total para el escenario 1992-2021 con datos del CHIRPS lo cual nos permite ver los cambios producidos entre los dos datos obtenidos.

Posteriormente a manera de ejemplo se presentan en las **Figura 39 a Figura 44**, los resultados de la oferta hídrica total para los modelos de cambio climático HADGEM2 para el RCP 4.5 y MIROC5 para el RCP 8.5 para los escenarios 2022-2052, 2053-2083, y 2084-2100 respectivamente. En el Anexos 3, 4 y 5, se encuentran los resultados obtenidos para cada unidad hidrográfica nivel I, para la condición actual y para los escenarios de cambio climático implementados. De la **Figura 45 a la Figura 49** se presenta la zonificación de los resultados obtenidos.

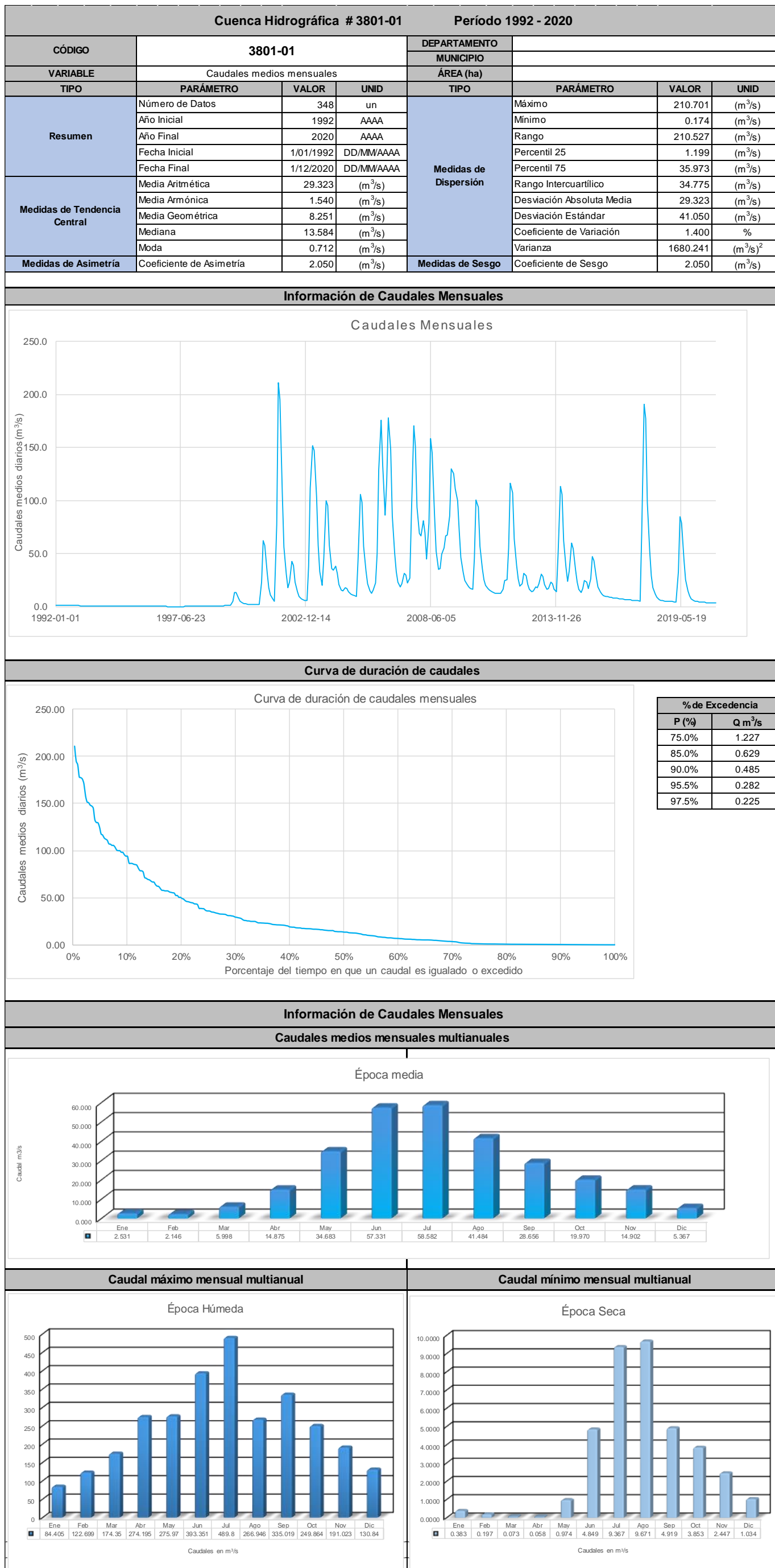


Figura 37. Resultados oferta hídrica datos IDEAM (1992-2020)

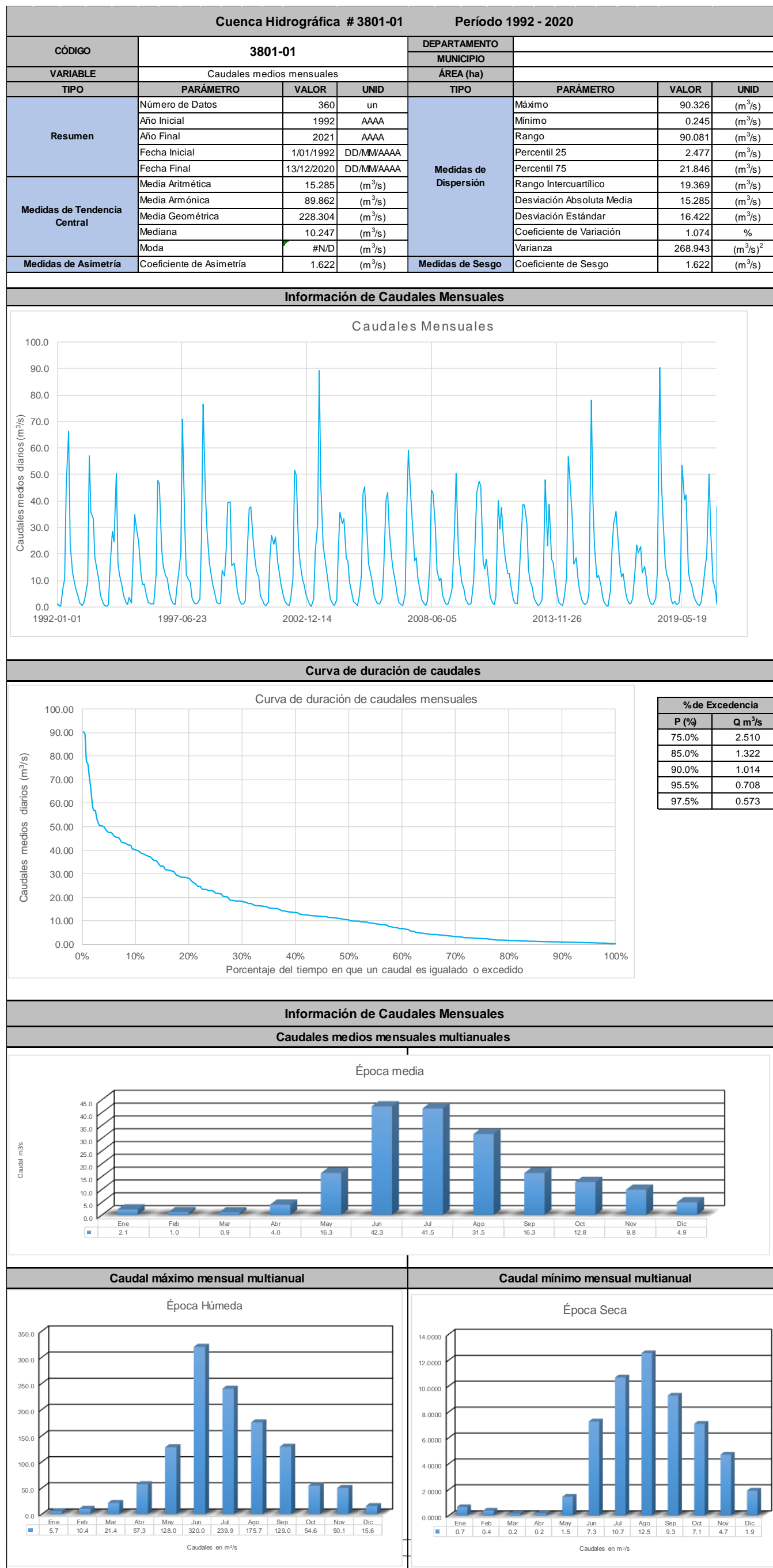


Figura 38. Resultados oferta hídrica datos CHIRPS (1992-2020)

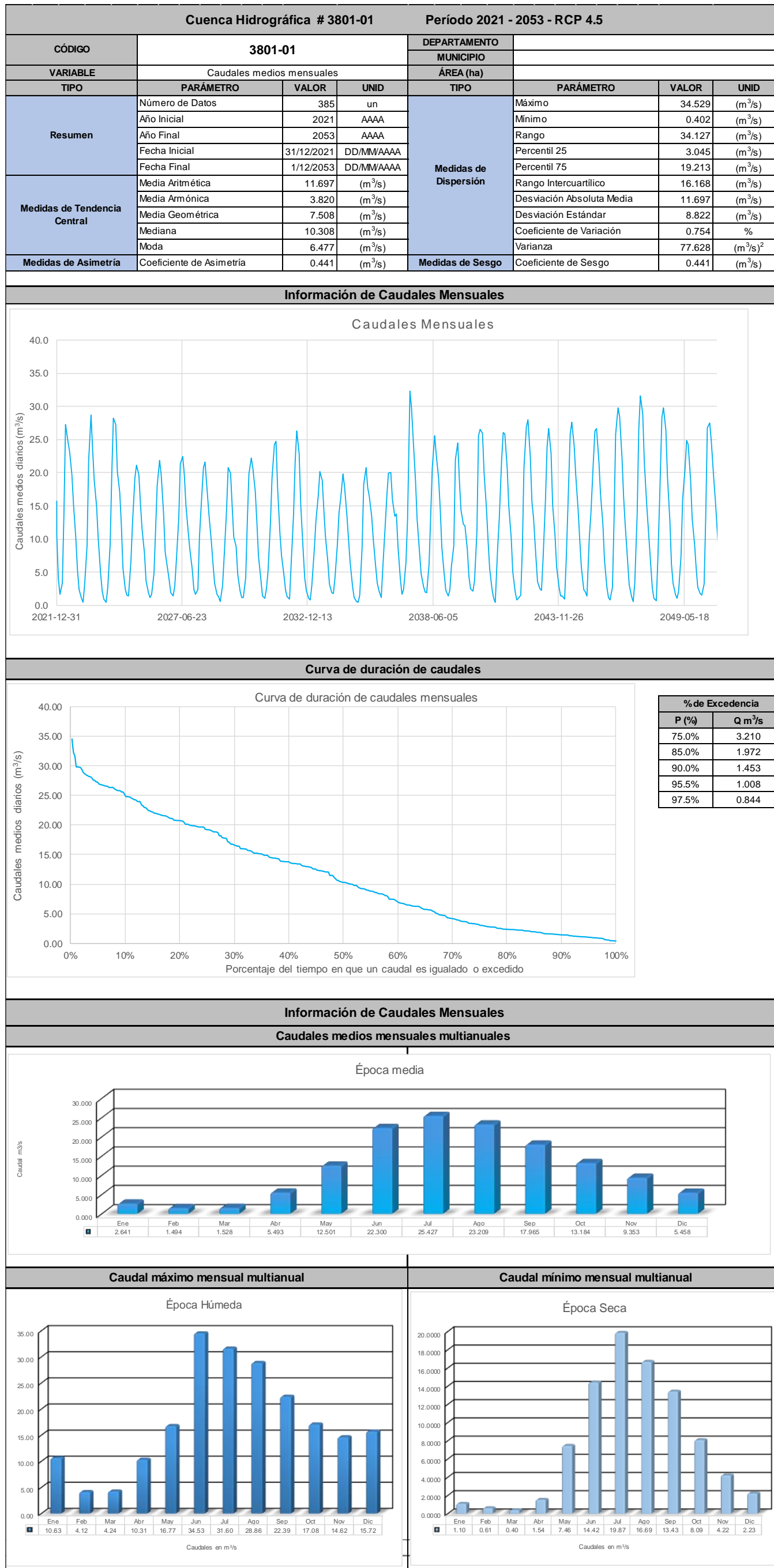


Figura 39. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2022-2052)

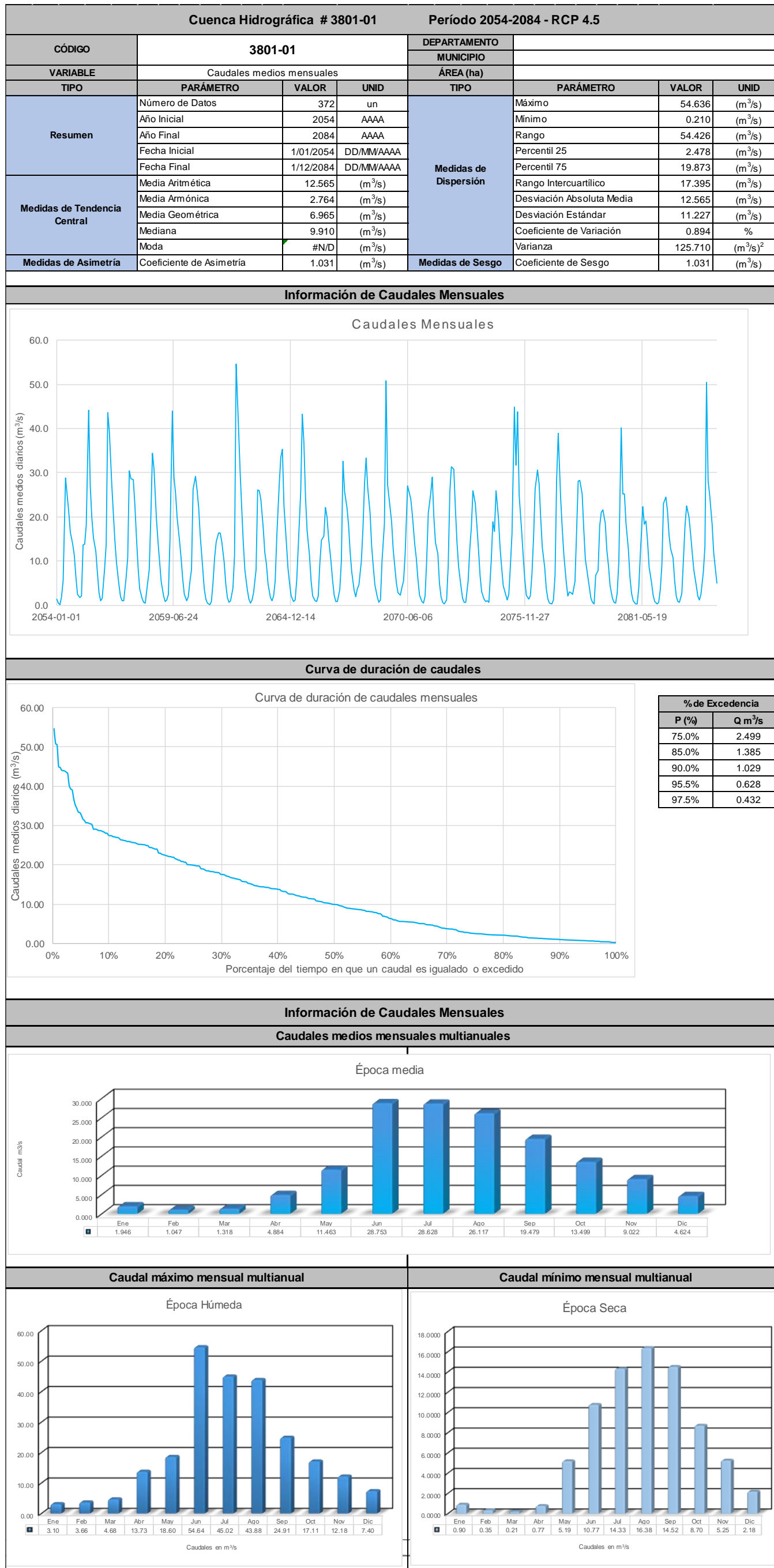


Figura 40. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2053-2083)

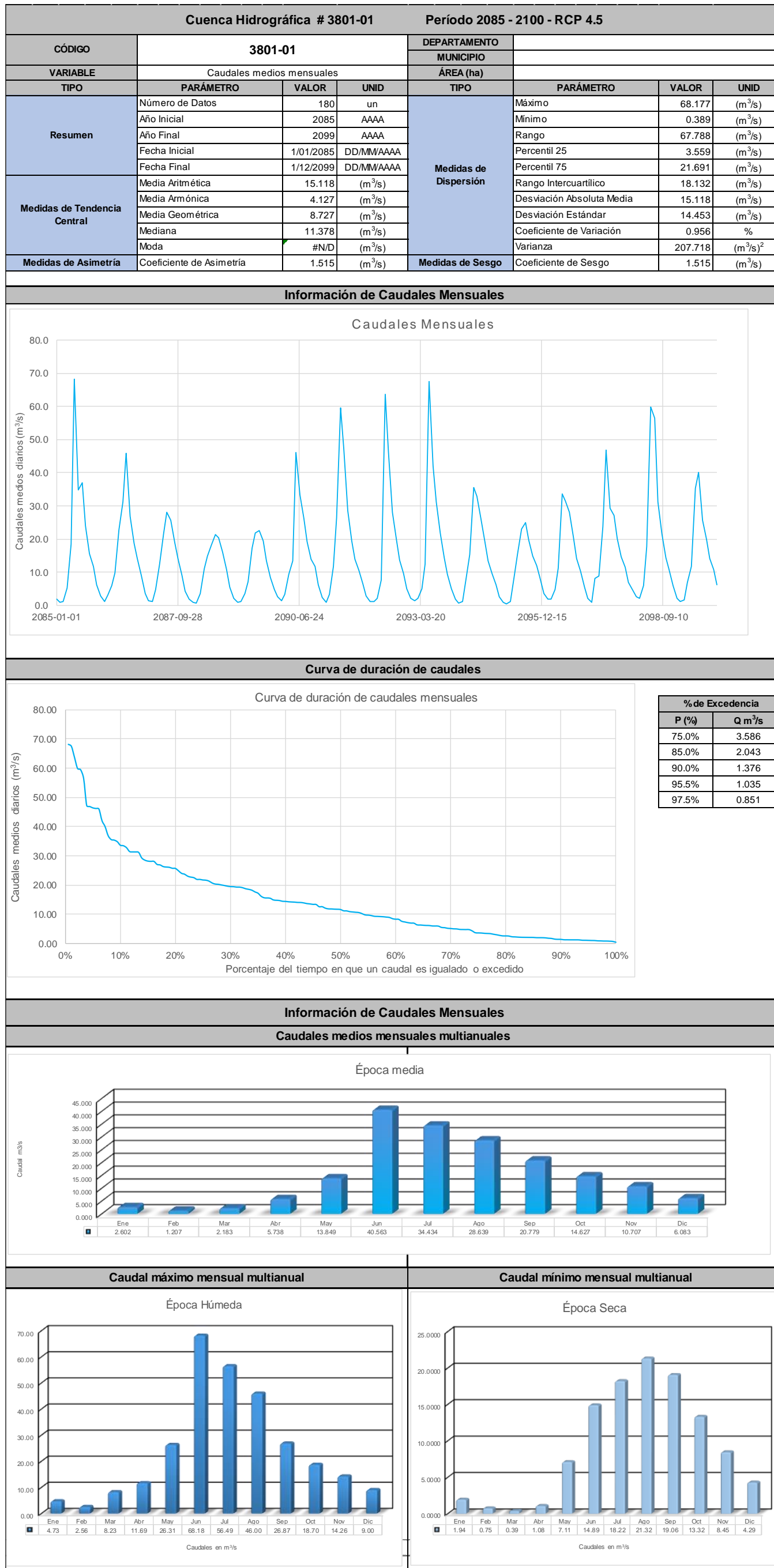


Figura 41. Resultados oferta hídrica datos HAGMEN2 RCP 4.5 (2084-2100)

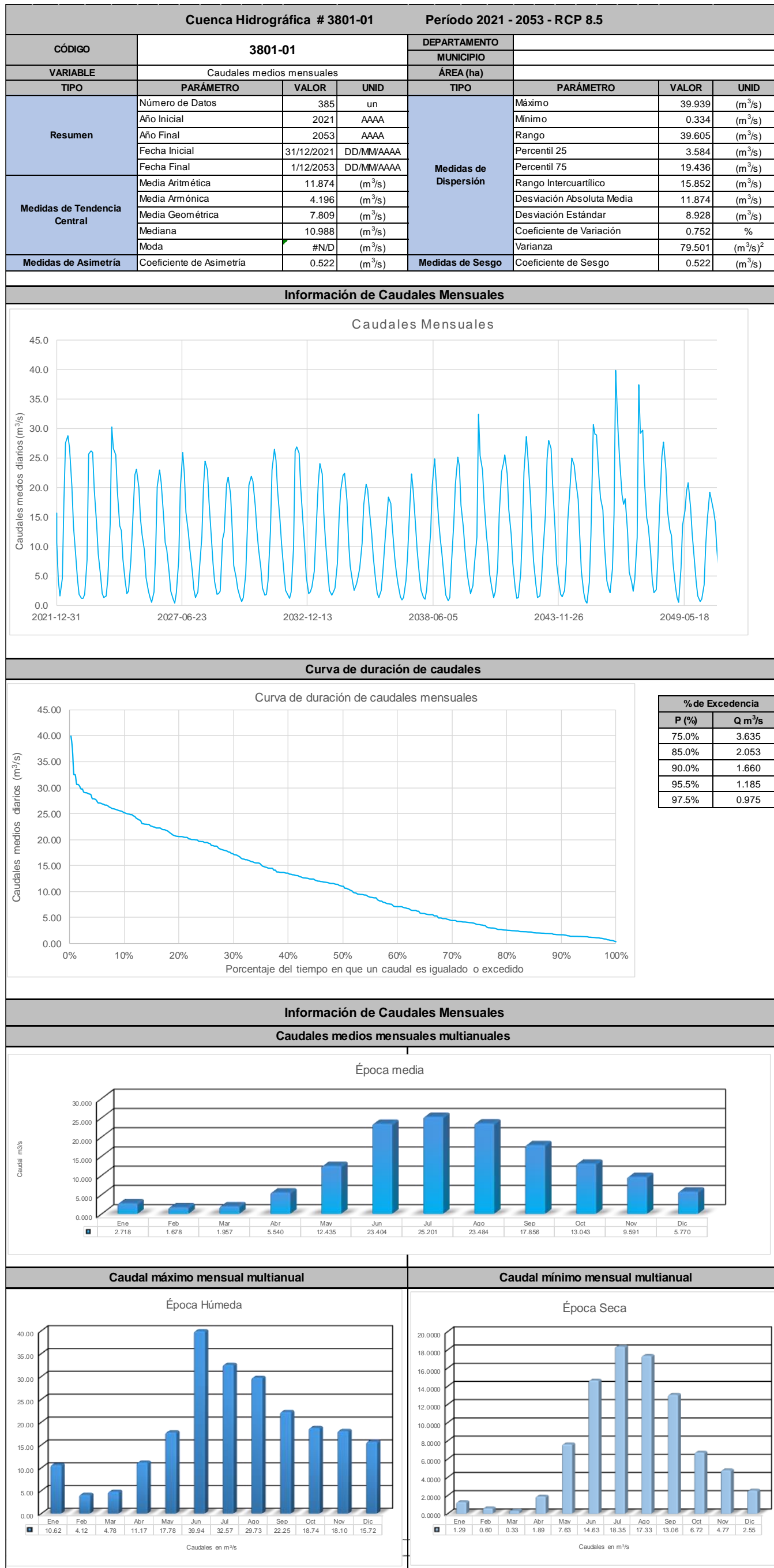


Figura 42. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2022-2052)

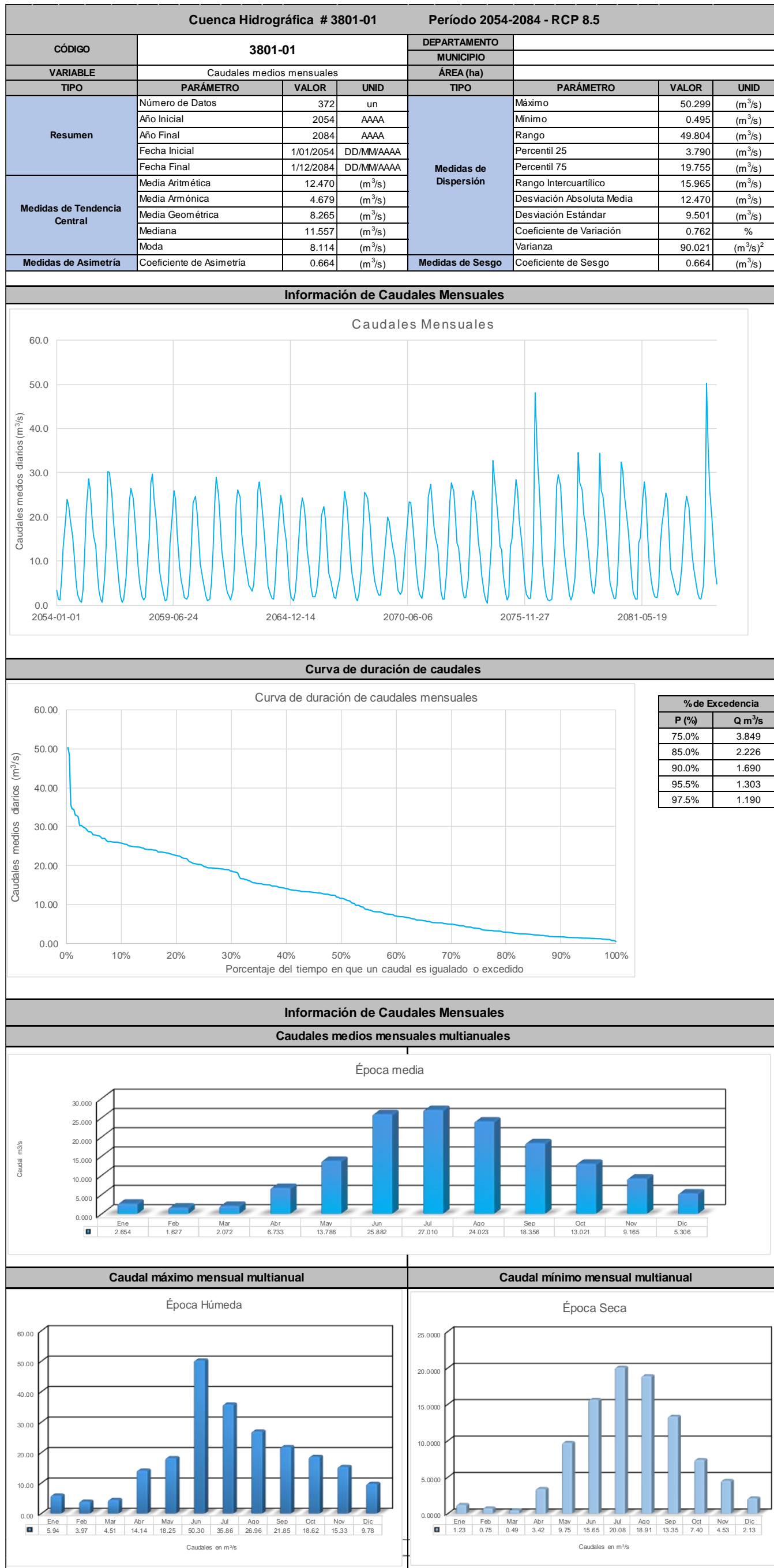


Figura 43. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2053-2083)

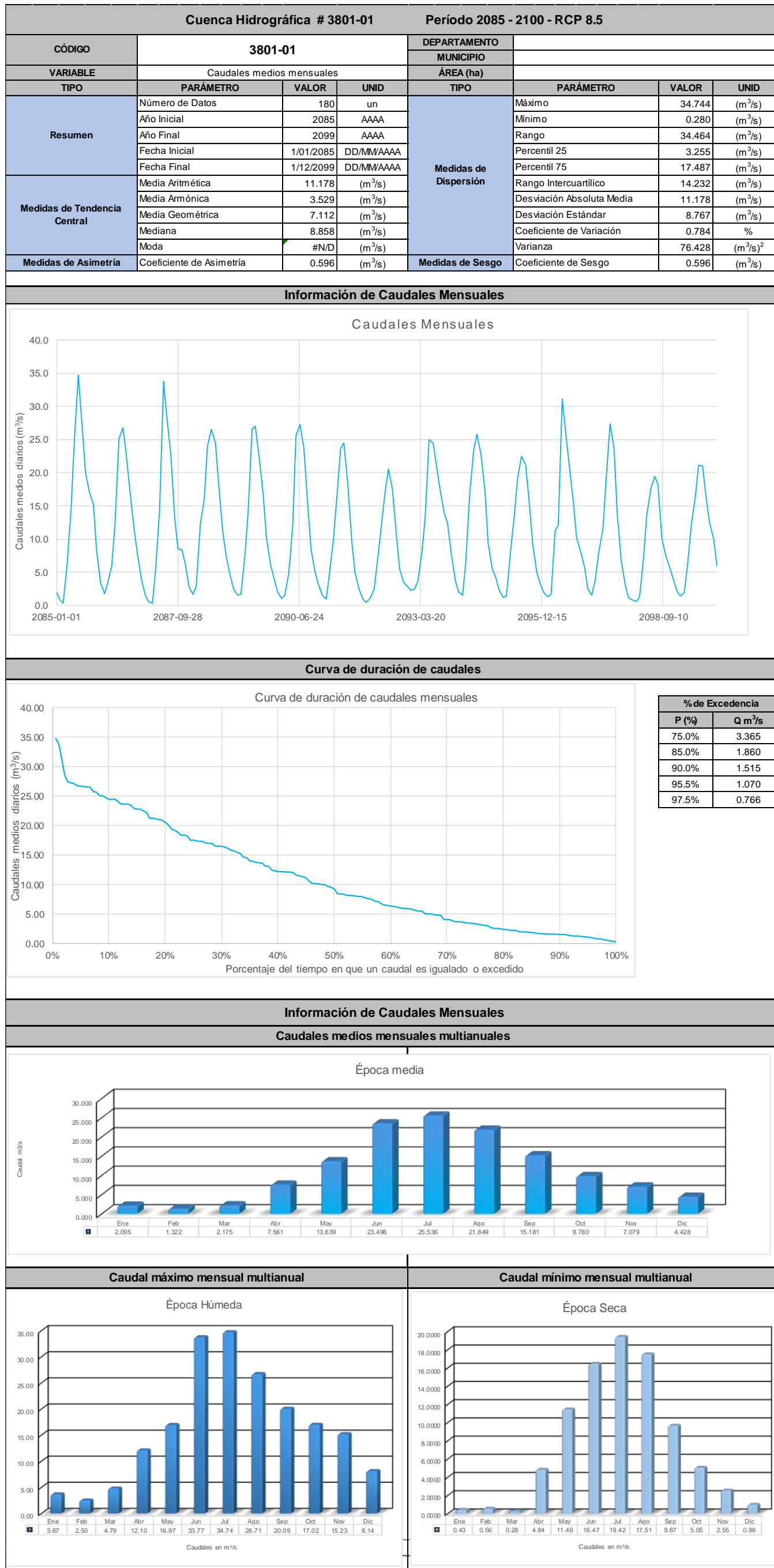


Figura 44. Resultados oferta hídrica datos MIROC5 RCP 8.5 (2084-2100)

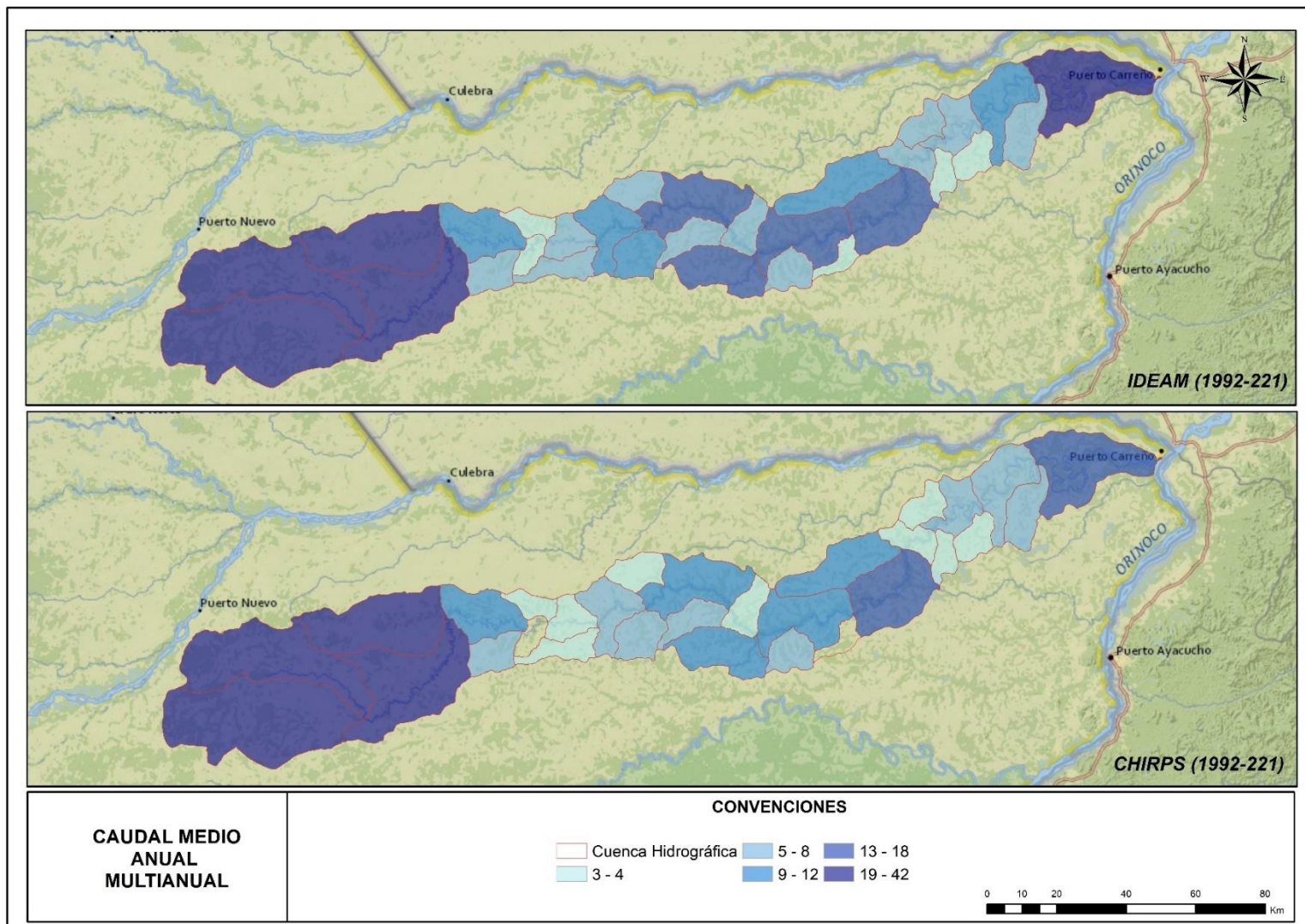


Figura 45. Zonificación del caudal medio anual multianual

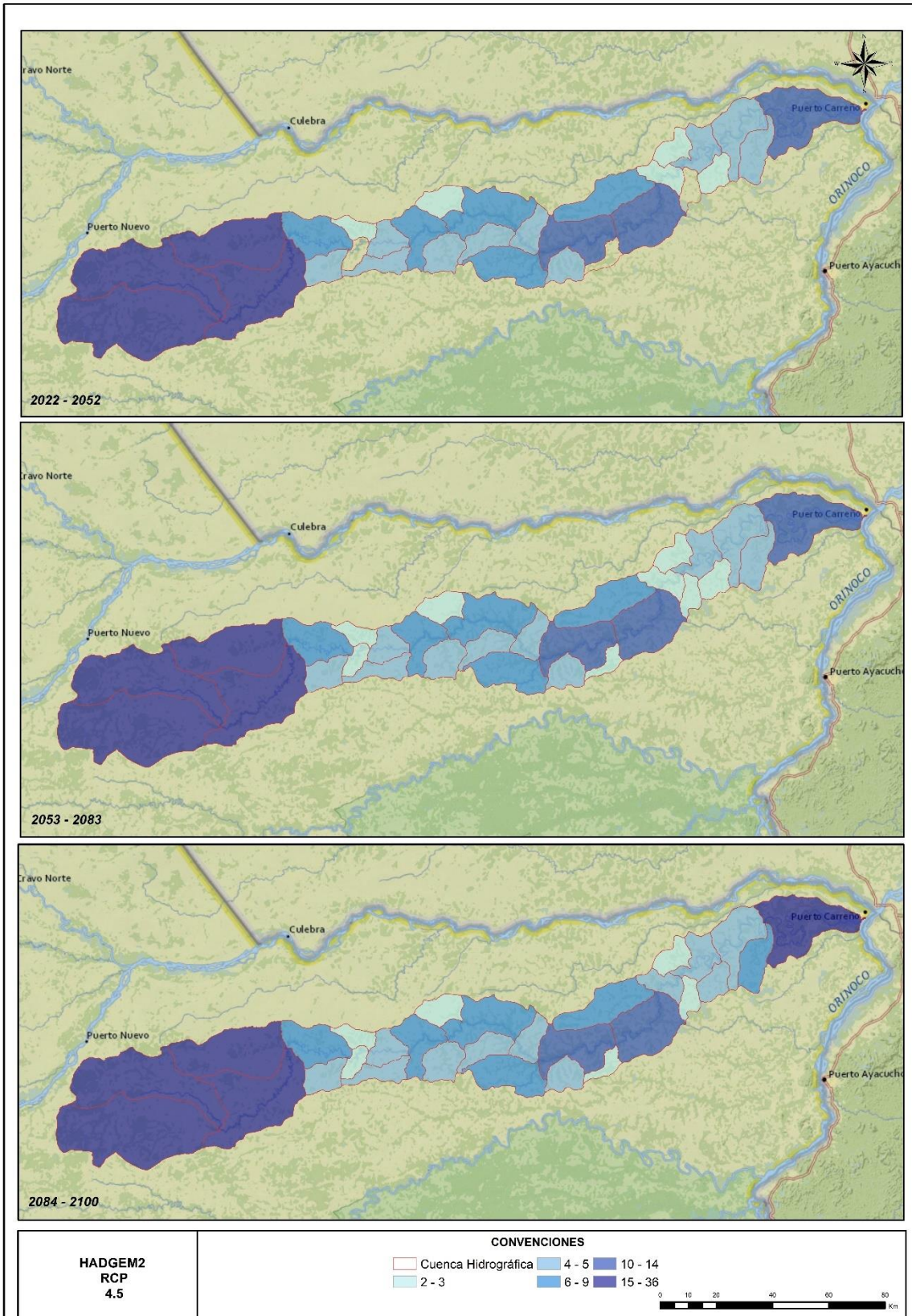


Figura 46. Zonificación de resultados del modelo HADGEM2 para el RCP4.5

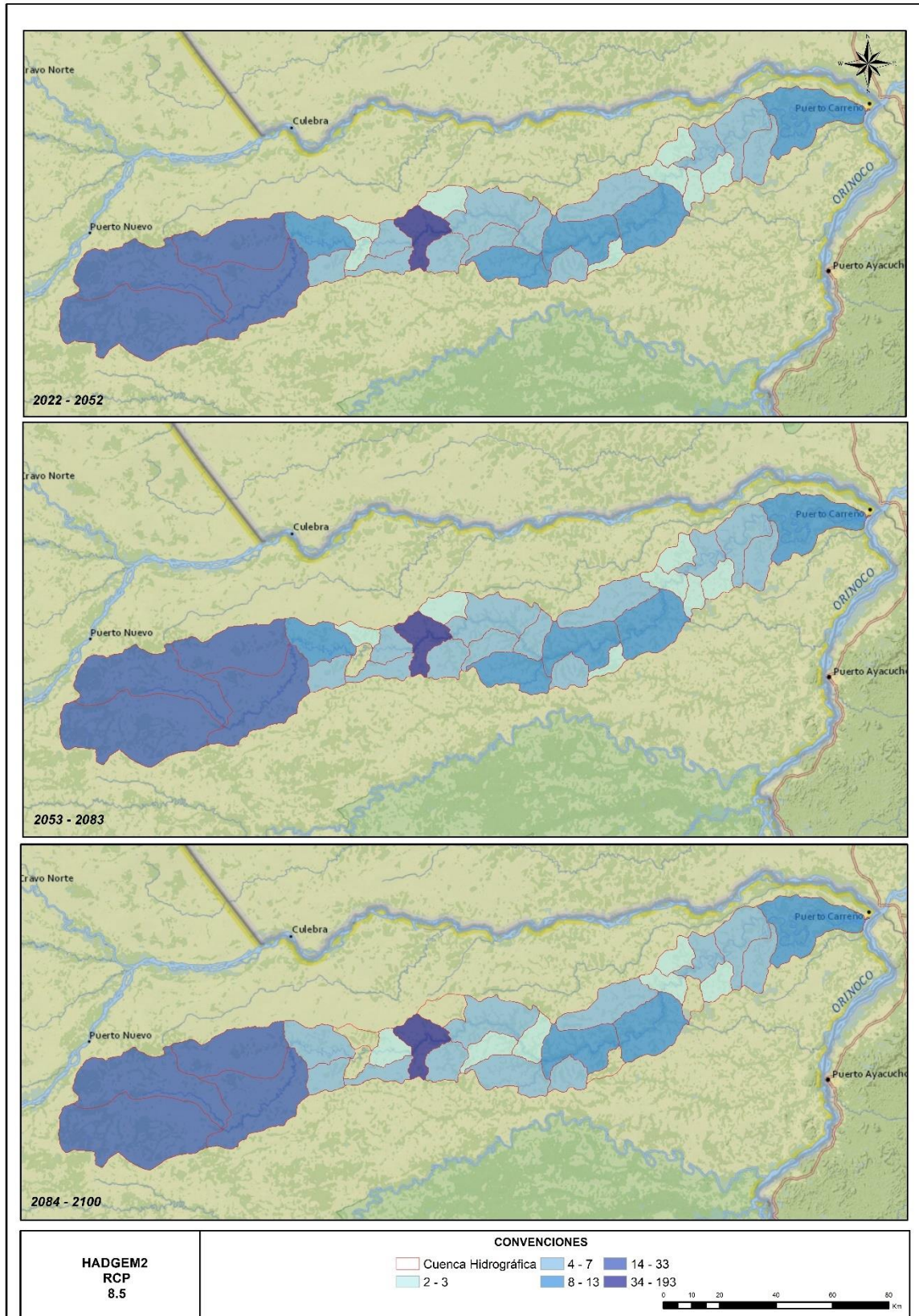


Figura 47. Zonificación de resultados del modelo HADGEM2 para el RCP8.5

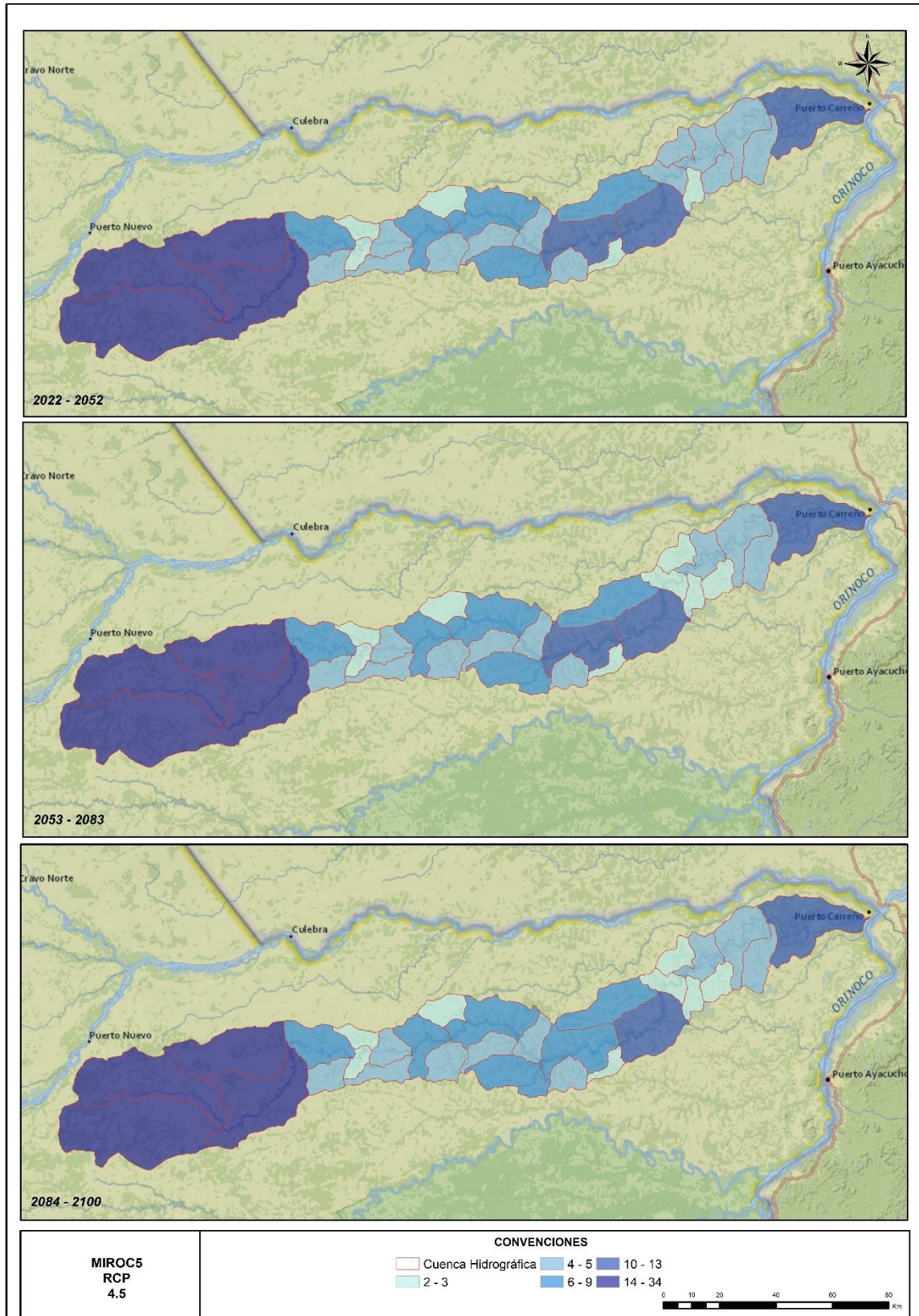


Figura 48. Zonificación de resultados del modelo MIROC5 para el RCP4.5

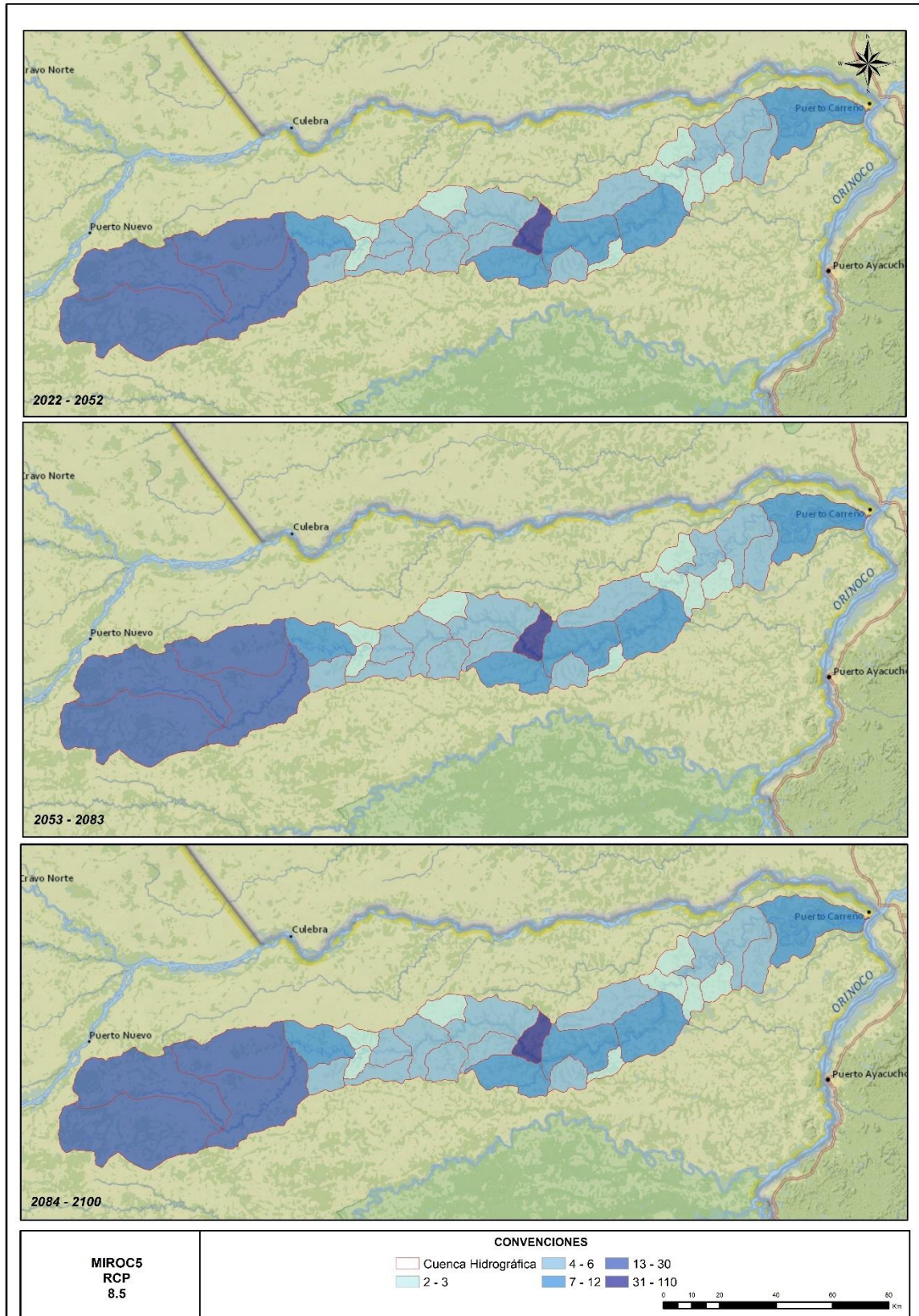


Figura 49. Zonificación de resultados del modelo MIROC5 para el RCP8.5

7.5. Estimación y proyección demanda hídrica

Los parámetros y lineamientos temáticos para la estimación de la demanda hídrica superficial para la cuenca del río Bitá, son desarrollados de acuerdo con lo establecidos por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2018. Los requerimientos de agua por tipo de usos como los usuarios de la cuenca, en conjunto con diferentes estudios realizados previamente en la jurisdicción de CORPORINOQUIA, en el marco del proyecto de formulación del POMCA.

La estimación de la demanda hídrica superficial se realiza a partir de los datos estadísticos de diferentes entidades gubernamentales como el ICA, IDEAM, DANE, proyectados para el año 2019, de acuerdo con las tendencias económicas y sociales identificadas por cada una de ellas, junto con los procedimientos y resoluciones actuales para los módulos de consumo doméstico (RAS – 2017), y los estimados por la Corporación.

7.5.1. Estimación de la Demanda Hídrica

La estimación de la demanda de agua tiene como propósito determinar el comportamiento que los diferentes sectores socioeconómicos establecidos en una determinada zona de estudio. Su importancia recae específicamente en su distribución y proporción de la oferta disponible. La presión ejercida por cada uno de los sectores y su tendencia o proyección futura en la evaluación del crecimiento económico y social, son una base importante para que las autoridades ambientales, tomen las medidas que consideren necesarias para la protección de la oferta hídrica.

La presión ejercida de todos los sectores sobre oferta hídrica guarda una estrecha relación en la evaluación de la vulnerabilidad hídrica, para mantener una buena gestión del agua, y generar alternativas enfocadas en la protección, y preservación en la disponibilidad y oferta futura del recurso.

La demanda hídrica, se planteó de acuerdo con el cálculo de las presiones ejercidas a nivel de las subcuencas establecidas, considerando los sectores socioeconómicos extractivos encontrados durante

el censo realizado en el POMCA del río Bitá y aplicando la metodología propuesta por el IDEAM, en el Estudio Nacional del Agua (Ideam, 2018).

7.5.1.1. Demanda Hídrica – Censo de Usuarios del Recurso Hídrico

Teniendo en cuenta la carencia de información en el conocimiento de la demanda de agua para el desarrollo de las actividades socioeconómicas de los pobladores de la región, el desconocimiento de los usos y tipos de usuarios del mismo, al igual que las condiciones en que se devuelven las aguas a las corrientes después de ser usadas, se realizó la estimación de la demanda hídrica por censo, a través del cual se establecerá de una manera aproximada la demanda real y potencial del recurso en cada una de las corrientes que conforman el área de la cuenca del río Bitá.

Los usos identificados durante el censo fueron en su orden, los siguientes:

- Uso Pecuario.
- Uso Doméstico
- Uso Agrícola

En cuanto a la evaluación por consumo de agua, se identificó a la población permanente e intermitente de la zona, de la misma manera aquellos que por un corto período de tiempo deciden permanecer en el desarrollo de actividades de ocio y descanso. La población se relacionó bajo los siguientes grupos.

- Permanentes.

Igualmente se identificaron los usos pecuarios más importantes, esto, con relación al mayor número de especies de animales comerciales, diferenciados de acuerdo con su fase productiva. Las especies comerciales más importantes encontradas durante las visitas realizadas fueron las siguientes.

- Bovinos
- Porcinos
- Avícola

- Equinos

De la misma forma para el sector agrícola, los cultivos más abundantes en la zona y, de los cuales se estimó su consumo son los presentados a continuación:

- Yuca
- plátano
- Palma
- Marañón
- Caucho

La cuantificación de la demanda por cada uno de los mencionados ítems se realizó a partir de la información presentada por cada usuario, en caso de que no existiera la seguridad del caudal captado parte del este, se aplicaban los módulos de consumo utilizados en la estimación de la demanda potencial, los cuales fueron los presentados en el capítulo anterior. Considerando que algunos de los cultivos no se encuentran descritos en la documentación disponible de las autoridades ambientales, estos se relacionaron con un cultivo de características similares.

El resultado del análisis de la demanda hídrica total permite identificar, que en su mayor parte el consumo de agua es generado por el desarrollo de actividades agrícolas, tal como se presenta en la siguiente ilustración.

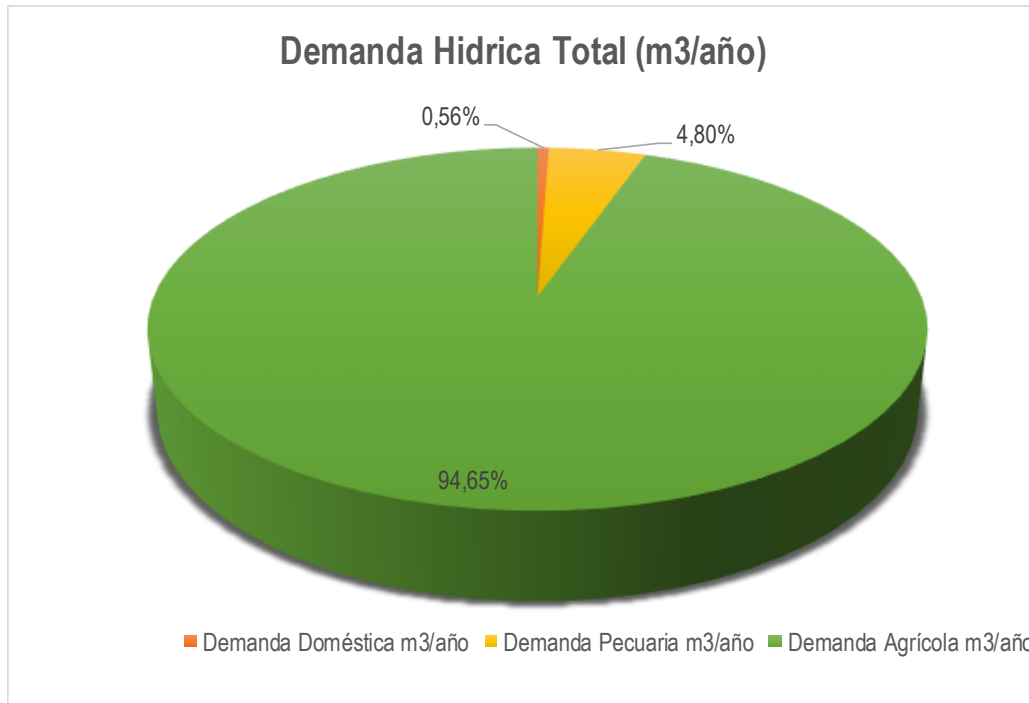


Figura 50. Demanda Hídrica Total (m3/año).

Fuente: Consorcio Río Bita, 2019.

La siguiente tabla, muestra el resumen de la demanda por los subsectores estudiados, se presenta la demanda hídrica total del área de estudio teniendo en cuenta la información del uso y aprovechamiento del recurso que se pudo obtener.

Tabla 11. Demanda total Hídrica de acuerdo con el Censo de Usuarios

Subzona	Código Subzona	Subcuenca	Código Subcuenca	Habitantes Censados	Demanda Doméstica m3/año	Ganado	Demanda Pecuaria m3/año	Hectáreas	Demanda Agrícola m3/año	Demanda Hídrica Censada m3/año
Río Bita	3801	Cuenca río Bita-Caño Componele-El Buey-Pinzonera	3801-01	232	15.807	370	11479,25	176	3.274.698,24	3.301.984,42
Río Bita	3801	Caño Corral de Piedra-Carro Voltiado-Monserrate	3801-02	34	2.317	310	9617,75	2	37.212,48	49.146,76
Río Bita	3801	Interfluvio No. 11 río Bita	3801-03	25	1.703	465	14426,625	63	1.172.193,12	1.188.323,08
Río Bita	3801	Caño Veladero	3801-04	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Río Bita	3801	Interfluvio No. 10 río Bita	3801-05	5	341	38	1178,95	1	18.606,24	20.125,86
Río Bita	3801	Caño del Avión	3801-06	9	613	100	3102,5	0	0,00	3.715,70
Río Bita	3801	Interfluvio No. 8 río Bita	3801-07	12	818	255	7911,375	101	1.879.230,24	1.887.959,22
Río Bita	3801	Interfluvio No. 7 río Bita	3801-08	24	1.635	313	9710,825	3	55.818,72	67.164,75
Río Bita	3801	Interfluvio No. 6 río Bita	3801-09	11	749	448	13899,2	1	18.606,24	33.254,91
Río Bita	3801	Caño Barro	3801-10	12	818	437	13557,925	3	55.818,72	70.194,25
Río Bita	3801	Interfluvio No. 5 río Bita	3801-11	18	1.226	357	11075,925	12	223.274,88	235.577,21
Río Bita	3801	Interfluvio No. 4 río Bita	3801-12	6	409	0	0	0	0,00	408,80
Río Bita	3801	Caño NN No. 1	3801-13	13	886	0	0	1	18.606,24	19.491,97
Río Bita	3801	Interfluvio No. 2 río Bita	3801-14	8	545	200	6205	1	18.606,24	25.356,31
Río Bita	3801	Caño NN No. 2	3801-15	17	1.158	534	16567,35	2	37.212,48	54.938,10
Río Bita	3801	Caño El Pendare	3801-16	17	1.158	533	16536,325	3	55.818,72	73.513,31
Río Bita	3801	Cuenca Alta río Bita	3801-17	48	3.270	466 2	144638,55	11	204.668,64	352.577,59
Río Bita	3801	Interfluvio No. 1 río Bita	3801-18	65	4.429	277 9	86218,475	25	465.156,00	555.803,14

Río Bita	3801	Caño NN No. 3	3801-19	3	204	230	7135,75	0	0,00	7.340,15
Río Bita	3801	Caño NN No. 4	3801-20	4	273	41	1272,025	0	0,00	1.544,56
Río Bita	3801	Caño NN No. 5	3801-21	27	1.840	206	6391,15	5	93.031,20	101.261,95
Río Bita	3801	Caño Múribo	3801-22	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Río Bita	3801	Caño Cumariane	3801-23	16	1.090	172	5336,3	2	37.212,48	43.638,91
Río Bita	3801	Caño Guaípe	3801-24	14	954	76	2357,9	3	55.818,72	59.130,49
Río Bita	3801	Caño NN No. 6	3801-25	6	409	0	0	0	0,00	408,80
Río Bita	3801	Interfluvio No. 9 río Bita	3801-26	38	2.589	278	8624,95	6	111.637,44	122.851,46
Río Bita	3801	Caño Tigre	3801-27	5	341	0	0	0	0,00	340,67
Río Bita	3801	Caño Matesarabia	3801-28	6	409	43	1334,075	2	37.212,48	38.955,36
Río Bita	3801	Caño Tres Bocas	3801-29	4	273	5	155,125	0	0,00	427,66
Río Bita	3801	Interfluvio No. 3 río Bita	3801-30	0	0	0	0	0	0,00	0,00
Totales				679	46.263	128 52	398.733	423	7.870.439,52	8.315.435,35

Fuente: Consorcio Río Bita, 2022

7.5.1.2. Demanda hídrica proyectada

La estimación de la demanda hídrica proyectada se separa en tres grandes grupos, (demanda doméstica, pecuaria y agrícola). La demanda doméstica se determina a partir de diferentes tasas de crecimiento en función del crecimiento poblacional registrados durante diferentes años según los registros del DANE. La demanda pecuaria al igual que para la doméstica se determina según las tasas de crecimiento de animales para uso comercial en la región (Municipios de Puerto Carreño y primavera) obtenidos con diferentes registros de años previos registrados por el Instituto Colombiano Agropecuario.

De acuerdo con los registros doméstico y pecuario se obtienen las tasas de crecimiento lineal las cuales se utilizan como parámetro para la aplicación en cada uno de los registros según subcuenca.

Igualmente, para la demanda agrícola y por la escasa información en cada uno de los años de registro, se utilizan datos regionales y/o departamentales para poder obtener una tasa de crecimiento y/o decrecimiento aplicado a cada uno de los años de registro.

En resumen, se presentan los resultados asociados a la subzona hidrográfica del río Bitá actualizada a la fecha (2021) y para los escenarios estimados (2052, 2083, 2100). Ver anexo 6.

Tabla 12. Resumen de resultados para la demanda hídrica proyectada.

Subzona	Código Subzona	Proyección	DEMANDA DOMÉSTICA m3/año	DEMANDA PECUARIA m3/año	DEMANDA AGRÍCOLA m3/año	DEMANDA HÍDRICA TOTAL m3/año
Río Bitá	3801	2021	51,209	394,275.2	8,381,711.20	8,827,195.42
Río Bitá	3801	2052	132,826	14,260.4	11,410,253.16	11,557,339.47
Río Bitá	3801	2083	209,496	833.8	15,533,090.31	15,743,420.53
Río Bitá	3801	2100	249,068	192.6	18,213,769.99	18,463,030.81

7.6. Índices de estado del recurso hídrico

Luego de obtener la oferta hídrica total generada a partir de la modelación hidrológica y la estimación de la demanda hídrica total de la cuenca actual y proyectada para cada uno de los escenarios se estimaron tres indicadores del "Sistema de Indicadores Hídricos" propuesto por el IDEAM en el ENA

2018, que pretenden responder a los cuestionamientos sobre la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectaciones para este caso la oferta hídrica. Estos índices están asociados al régimen natural (Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento- IVH). En la **Figura 51**, se presenta la metodología utilizada para el cálculo de los indicadores estimados para los diferentes escenarios y modelos implementados y en la **Tabla 13**, se presentan los resultados obtenidos para cada índice. Ver anexo 7.

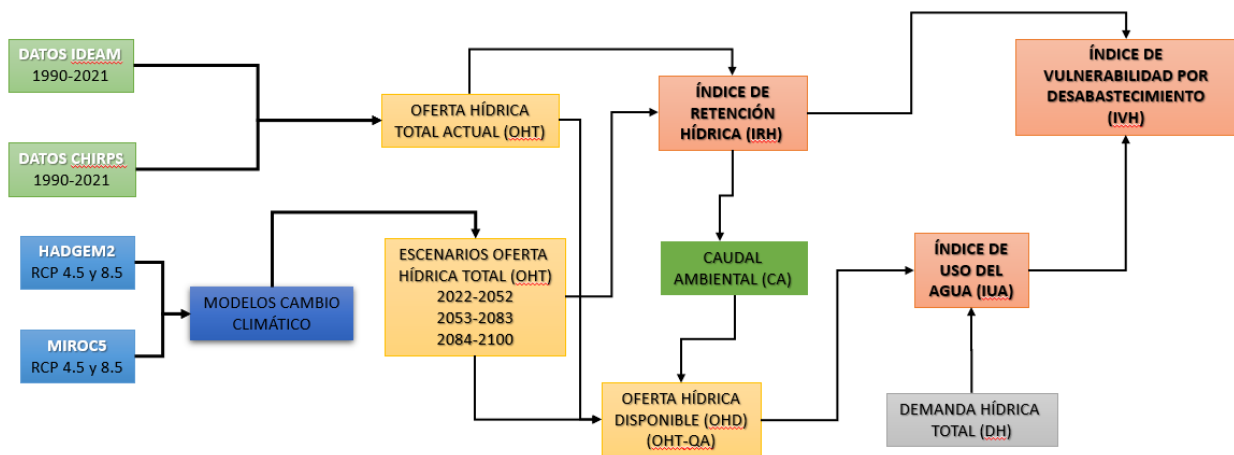


Figura 51. Metodología estimación indicadores hídricos

Tabla 13. Indicadores hídricos estimados cuenca río Bita para diferentes modelos y escenarios

MODELO	ESCENARIO	OFERTA HÍDRICA TOTAL (m³/s)	CAUDAL AMBIENTAL (m3/s)	OFERTA HÍDRICA DISPONIBLE (m³/s)	DEMANDA HÍDRICA TOTAL (m3/s)	ÍNDICE DE RETENCIÓN HÍDRICA			ÍNDICE DE USO DEL AGUA			ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO
						IRH	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IUA	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IVH
IDEAM	1992-2021	345.41	57.85	287.56	0.280	0.586	Baja	Baja retención y regulación de humedad	0.10%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Medio
CHIRPS	1992-2022	270.25	54.30	215.95	0.280	0.621	Baja	Baja retención y regulación de humedad	0.13%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Medio
HADGEM2 RCP 4.5	2022-2052	241.19	79.00	162.19	0.366	0.697	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.23%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2053-2083	260.03	78.90	181.13	0.499	0.675	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.28%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2084-2100	260.81	88.90	171.91	0.585	0.685	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.34%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
HADGEM2 RCP 8.5	2022-2052	236.33	61.20	175.13	0.366	0.711	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.21%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo

MODELO	ESCENARIO	OFERTA HIDRICA TOTAL (m³/s)	CAUDAL AMBIENTAL (m³/s)	OFERTA HIDRICA DISPONIBLE (m³/s)	DEMANDA HIDRICA TOTAL (m³/s)	ÍNDICE DE RETENCIÓN HÍDRICA			ÍNDICE DE USO DEL AGUA			ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO
						IRH	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IUA	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IVH
	2053-2083	217.95	69.08	148.87	0.499	0.682	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.34%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2084-2100	183.58	57.70	125.88	0.585	0.663	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.47%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
MIROC5 RCP 4.5	2022-2052	210.83	66.10	144.73	0.366	0.699	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.25%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2053-2083	240.11	49.40	190.71	0.499	0.709	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.26%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2084-2100	194.37	64.50	129.87	0.585	0.692	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.45%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
MIROC5 RCP 8.5	2022-2052	208.70	48.30	160.40	0.366	0.713	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.23%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo

MODELO	ESCENARIO	OFERTA HIDRICA TOTAL (m³/s)	CAUDAL AMBIENTAL (m³/s)	OFERTA HIDRICA DISPONIBLE (m³/s)	DEMANDA HIDRICA TOTAL (m³/s)	ÍNDICE DE RETENCIÓN HÍDRICA			ÍNDICE DE USO DEL AGUA			ÍNDICE DE VULNERABILIDAD POR DESABASTECIMIENTO
						IRH	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IUA	CALIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	IVH
	2053-2083	215.70	49.85	165.86	0.499	0.709	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.30%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo
	2084-2100	200.95	70.40	130.55	0.585	0.693	Moderada	Media retención y regulación de humedad	0.45%	Muy Bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible	Bajo

7.7. Medidas de adaptación y mitigación de cambio climático

7.7.1. Instrumentos vigentes en el territorio nacional

Con el objetivo de establecer medidas de adaptación y mitigación ante el cambio climático en la cuenca del río Bita conforme los instrumentos de planificación territorial y ambiental existentes en el territorio nacional, se ha realizado una revisión de dichos instrumentos con foco en las medidas orientadas a la conservación del recurso hídrico, con el ánimo de identificar y relacionar las acciones promovidas con los resultados obtenidos de los modelos de estimación de la oferta hídrica para los escenarios planteados de cambio climático en el área de la cuenca. En la **Tabla 14**, se pueden observar los principales aspectos identificados, conforme con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Tabla 14. Instrumentos de planificación que involucran la cuenca hidrográfica del río Bita

INTRUMENTOS	PLANTEAMIENTO	OBSERVACIONES
PLANES ESTRATÉGICOS, EN LAS ÁREAS HIDROGRÁFICAS O MACROCUENCAS	En la macrocuenca se definirán los lineamientos y directrices para la gestión integral del agua y de los demás recursos naturales, así como la definición de acuerdos, acciones e inversiones que podrán ser implementadas por cada uno de los actores claves.	Realiza esfuerzos dirigidos a la planificación ambiental de largo plazo que, con visión nacional, constituye el marco para la formulación, ajuste y/o ejecución de los diferentes instrumentos de política.
PROGRAMA NACIONAL DE MONITOREO DEL RECURSO HÍDRICO, EN LAS ZONAS HIDROGRÁFICAS	Definición y desarrollo del programa de monitoreo por zonas hidrográficas constituidas.	Se focaliza en monitorear el estado del recurso hídrico y el impacto que sobre este tienen las acciones desarrolladas en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.
PLANES DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS, EN SUBZONAS HIDROGRÁFICAS O SU NIVEL SUBSIGUIENTE	<p>A nivel de Subzonas hidrográficas, tiene como objetivo definir la zonificación ambiental que le permita a entidades, gremios, comunidades, tener un modelo para que el agua siga fluyendo y para la prevención del Riesgo y con ella obtener un plan ordenado de proyectos que ayuden a lograr un modelo de territorio para producir, para vivir, para el agua y para disfrutar de los paisajes.</p> <p>Los municipios, deberán tener en cuenta en sus propios ámbitos de competencia lo definido por el Plan, como norma de superior jerarquía, al momento de formular, revisar y/o adoptar el respectivo Plan de Ordenamiento Territorial, con relación a:</p>	Contiene esfuerzos dirigidos a la planeación del uso coordinado del suelo, de las aguas, de la flora y la fauna y el manejo de la cuenca en la perspectiva de mantener el equilibrio entre el aprovechamiento social y económico de tales recursos y la conservación de la estructura fisicobiótica de la cuenca y particularmente del recurso hídrico.

<p>PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE MICROCUENCAS, EN LAS CUENCAS DE NIVEL INFERIOR AL DEL NIVEL SUBSIGUIENTE DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. La zonificación ambiental. 2. El componente programático. 3. El componente de gestión del riesgo. <p>A nivel de microcuencas pretende formular e implementar un plan en el que se definen los proyectos y actividades a ejecutar por la autoridad ambiental competente, con el fin de solucionar la problemática identificada en el diagnóstico, estableciendo el cronograma de ejecución, costos y responsables.</p> <p>Constituye un esfuerzo dirigido a la preservación, restauración y uso sostenible de la microcuenca.</p>
---	---

En los siguientes numerales se presentan los diferentes instrumentos y estudios relativos a la zona de la Orinoquia donde se plasman las principales estrategias relacionadas con la adaptación al cambio climático.

7.7.2. Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los

Andes

El proyecto “Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los recursos hídricos de los Andes (AICCA)” es implementado en conjunto con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Min Ambiente). Tiene como objetivo generar y compartir datos e información y experiencias relevantes para la adaptación a la variabilidad climática y el cambio climático, útiles para la formulación de políticas en sectores seleccionados. El proyecto AICCA busca apoyar la inclusión de la perspectiva de cambio climático en la normatividad y demás instrumentos vigentes para el manejo de los recursos hídricos y el desarrollo agropecuario; así como la ejecución de actividades piloto de adaptación en diferentes sectores relacionados con el agua (IDEAM, 2018).

7.7.3. Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía.

En el estudio del PRICCO, se plantean las siguientes líneas estratégicas dentro del componente de gestión de información bajo escenarios de cambio climático.

- Hidropolítica basada en la conservación: Aseguramiento de la calidad y provisión del agua para mantener la salud de los ecosistemas y sustentar las actividades productivas humanas.
- Ruralidad climáticamente inteligente: Incrementar la resiliencia de los agroecosistemas y la armonía entre las actividades productivas y las dinámicas de la biodiversidad.
- Asentamientos humanos resilientes y bajos en carbono: Limitar los impactos de vectores en los asentamientos urbanos orinoquenses y mejorar la capacidad de respuestas ante eventos de aumento de temperaturas y aguaceros.
- Minería e hidrocarburos: Minimizar los impactos de eventos extremos sobre el sector en la región de la Orinoquía y mejorar las capacidades de adaptación y mitigación al cambio climático.

7.7.4. POMCA del Río Bita

En relación al POMCA del río Bita, el contenido programático con foco en la oferta hídrica y el cambio climático, cuenta con las siguientes estrategias:

LÍNEA ESTRATÉGICA	ÁREA TEMÁTICA O PROGRAMA	PROYECTO
Conservación de áreas protegidas y ecosistemas estratégicos que contribuyan a la estructura ecológica principal de la cuenca	Fortalecimiento de las áreas protegidas y ecosistemas estratégicos	Formulación, implementación y seguimiento de los planes de manejo de las áreas protegidas declaradas Declaratoria y/o formulación y/o implementación de acciones para el fortalecimiento de ecosistemas estratégicos y estrategias complementarias de conservación
		Recuperación de la cobertura vegetal en zonas de importancia hídrica de la cuenca alta del río Chicamocha
		Identificación de humedales presentes en la cuenca con el fin de priorizar su caracterización,

		delimitación y posterior formulación de herramienta de planificación
		Implementación de esquema de pagos por servicios ambientales (PSA)
		Conservación de la diversidad florística de la cuenca, mediante fortalecimiento de estructuras de investigación en torno a viveros y jardín botánico con participación de instituciones educativas
		Estrategias de investigación para la conservación y monitoreo de especies de fauna silvestre en peligro, endémicas y valores objeto de conservación identificadas en la cuenca del río alto Chicamocha y conservación de especies de fauna silvestre catalogada en categoría de amenaza y endémica
		Acotamiento de rondas hídricas en corrientes priorizadas
Fortalecimiento institucional y gestión integral del recurso hídrico	Manejo y uso eficiente del recurso hídrico	Implementación de un sistema piloto de cosecha de agua
		Implementación de un sistema piloto de recolección de precipitación de agua lluvia
		Diseño e implementación de medidas de adaptación a los efectos del cambio climático para los sectores de abastecimiento de agua potable y agricultura. (PORH)
Cultura ambiental	Gobernanza del agua	Recuperación de saberes y cultura tradicional para la sostenibilidad ambiental de la cuenca
		Educación ambiental como estrategia transversal en la protección y conservación de las áreas y ecosistemas estratégicos para adecuado manejo y uso eficiente del recurso hídrico
Fortalecimiento del aparato productivo de los sectores presentes en la cuenca	Ordenamiento productivo	Implementación de buenas prácticas en torno a la gestión de los usos agropecuarios
		Implementación de acciones para el fortalecimiento de negocios verdes

7.7.5. Informe deforestación y vulnerabilidad climática de la región Orinoquia

(Fundación Grothendieck, 2021)

El Informe deforestación y vulnerabilidad climática de la región Orinoquia es producto de la articulación interinstitucional entre el Centro de Investigación de Cambio Climático de la Fundación Grothendieck, la Fundación Cultural Llano Adentro, la Fundación Universitaria de Ciencias para la Salud (FUCS), el Programa de Investigación de Política Exterior Colombiana (PIPEC) y el Observatorio Regional ODS de la Universidad de los Andes.

Esta investigación de carácter interinstitucional e interdisciplinario nace a partir de la necesidad de visibilizar y potenciar los estudios sobre vulnerabilidad climática en Colombia y, específicamente, en la Región Orinoquia, con el fin de que se tomen las medidas territoriales y nacionales pertinentes para mejorar la capacidad adaptativa de las instituciones y, con ello, de las comunidades. En este informe se presentan las apuestas y estrategias institucionales a nivel nacional y regional para enfrentar la deforestación como una de las problemáticas que más hace vulnerable al cambio climático a la región Orinoquia. Esto con el fin de conocer los avances, las posibilidades y los retos que enfrenta la región para mejorar su capacidad adaptativa.

En el documento, para el Vichada se establecieron 24 medidas para la mitigación y adaptación en torno a la deforestación, las cuales se centran en la restauración y el enriquecimiento de bosques riparios, en la gestión de recursos hídricos, la implementación de mecanismos para reducir la deforestación en torno a la biodiversidad y servicios ecosistémicos. En general en el departamento se espera la consolidación de una estrategia de educación ambiental en la cual se alcance el cuidado, protección y conservación del ambiente. Dentro de los programas en Vichada se presenta “gestión de la información y el conocimiento ambiental”, programa creado para generar conciencia en torno a la mitigación de los GEI y la adaptación al cambio climático. En torno a la reducción de la deforestación se establece el compromiso de continuar con los Certificados de Incentivos Forestales para mantener una reforestación comercial en el país, siendo el segundo departamento con mayor área de plantaciones comerciales.

7.7.6. LEY 2169 DE 2021. por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática.

De esta Ley se destaca el artículo 6, que comprende las metas nacionales de adaptación al cambio climático a 2030, entre estas para el sector ambiente se destacan:

- Diseñar e implementar un Sistema Integrador de Información sobre Vulnerabilidad, Riesgo y Adaptación al Cambio Climático.
- Formular o ajustar 135 Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) incorporando consideraciones de variabilidad y cambio climático.
- Reducir las áreas afectadas por incendios forestales, de manera articulada e interinstitucional, operativizando los procesos para la gestión, conocimiento y reducción del riesgo de Incendios forestales.
- Incrementar la red de monitoreo con transmisión en tiempo real conectada a sistemas de alerta temprana.
- Desarrollar e incorporar un indicador que refleje el avance en el acotamiento de rondas hídricas.
- Promover acciones priorizadas en los Planes Estratégicos de Macrocuencas.

De igual forma, el artículo 13, incluye medidas para el logro de las metas en materia de mitigación, entre estas para el sector ambiente se destacan:

- Acciones orientadas a la masificación de soluciones basadas en la naturaleza en áreas boscosas y ecosistemas degradados para la conservación ecosistémica, dentro de las cuales se incluyen acciones de restauración ecológica, recuperación, rehabilitación, protección y uso sostenible de los ecosistemas.
- Acciones tendientes al desarrollo de sistemas de monitoreo y detección temprana de Incendios forestales

8. Discusión

Conforme los resultados obtenidos de la aplicación metodológica y los objetivos planteados para el presente documento de investigación, el análisis e interpretación de los resultados, así como la información obtenida durante el estudio, se presenta de forma discriminada a continuación, abordando la generación de series hidrometeorológicas como insumo para la evaluación de la oferta hídrica, con base en los escenarios de cambio climático globales disponibles y su desescalamiento estadístico, la evaluación de la oferta hídrica de la cuenca bajo los escenarios de cambio climático a partir de la evaluación de escenarios de oferta hídrica y la aplicación de sistemas de indicadores hídricos y el planteamiento de medidas de adaptación y mitigación con foco en su incorporación en los instrumentos de ordenación territorial.

8.1. Generación de series hidrometeorológicas como insumo para la evaluación de la oferta hídrica con base en los escenarios de cambio climático globales disponibles y su desescalamiento estadístico

Como demuestran los diferentes estudios, el cambio climático está afectando cada vez al ciclo hidrológico global, pero a nivel nacional o local sigue existiendo mucha incertidumbre para pronosticar su impacto a escalas espaciales y temporales menores debido a que el desarrollo de los recursos hídricos como su gestión (Anandhi et al, 2011), han sido llevados a cabo a partir de la presunción de estacionalidad de las series temporales hidrológicas (Milly, 2008), los datos hidrológicos históricos proporcionan información valiosa sobre los procesos y eventos, estos no son indicativos del régimen hidrológico futuro. Además, incluso cuando se detectan cambios hidrológicos, la atribución de causas, incluido el cambio climático, a menudo sigue siendo incierta. (ONU-Agua, 2019).

Luego del desarrollo metodológico planteado y de los resultados obtenidos para la evaluación de la oferta hídrica, con base en los escenarios de cambio climático globales seleccionados para la

cuenca hidrográfica del río Bita y su desescalamiento estadístico para cuencas hidrográficas con poca o nula instrumentación hidrometeorológica podemos mencionar:

Para cuencas con poca o nula o instrumentación, especialmente para zona de estudio (Departamento de Vichada) es posible realizar el uso de otras fuentes de información como es el caso del producto CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations), teniendo en cuenta que los valores medidos por CHIRPS en comparación con las mediciones realizadas en las estaciones de precipitación del IDEAM para la ventana de tiempo seleccionada (1985-2015), se obtiene una buena representación de la precipitación a escala mensual, observándose un comportamiento interanual muy similar, con una adecuada representación espacial, así como de la magnitud de la precipitación.

Así mismo, las pruebas de correlación presentan una buena representación de la magnitud de la precipitación mensual con valores de correlación entre 0.83 y 0.96, además, de acuerdo con las métricas de desempeño de Nash-Sutcliffe (NSE) y Kling Gupta (KGE) entre 0.64 y 0.91, así como valores de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre 50 y 90 mm, y un error cuadrático medio (MAE) entre 36 y 68 mm, se consideran muy aceptables para la zona de estudio, razón por la cual pueden ser validados para el desarrollo de estudios hidroclimatológicos o la implementación de modelos hidrológicos, situación que valida y complementa casos de estudios similares como (Urrea V., 2017) y (Cuenca J., Pedraza A. 2018)

En relación con los resultados obtenidos para la oferta hídrica total estimada a partir de los datos del IDEAM y CHIRPS para el período (1922-2022) y como línea base para realizar la comparación con los modelos de cambio climático, para lo cual, en la **Figura 52**, se aprecia el caudal medio mensual mutianual para el período mencionado, en donde se aprecia que la oferta hídrica estimada con los datos del IDEAM a partir de una extrapolación de la información tiende a sobreestimar para casi todos los meses en un 25%, siendo los meses con mayores precipitaciones donde se refleja las mayores

diferencias, solamente para el mes de diciembre se presenta un aumento del 9%, a nivel anual, aproximadamente se presenta un 22% superior al estimado con CHIRPS, esto se genera principalmente por las sobreestimaciones que pueden generarse al emplearse métodos de interpolación o extrapolación para generar la precipitación en la cuenca a partir de información hidrometeorológica disponible cercana a la cuenca.

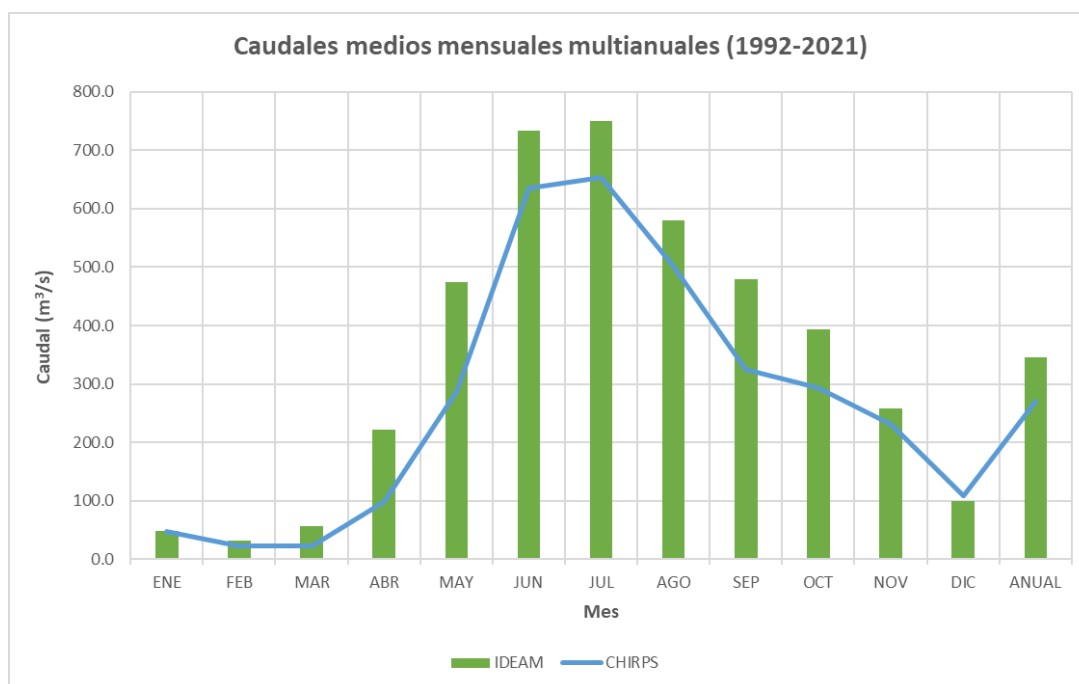


Figura 52 Comparación oferta hídrica estimada por IDEAM y CHIRPS (1992-2021)

8.2. Evaluación de la oferta hídrica de la cuenca bajo los escenarios de cambio climático a partir de la evaluación de escenarios de oferta hídrica y la aplicación de sistemas de indicadores hídricos

A partir de los estudios realizados por Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez (2017), Palomino-Lemus (2015) y Ortega & Arias (2018), en donde se evalúa el desempeño de diferentes modelos de circulación global para Colombia, se consideraron los tres modelos con mejor ajuste para la región en la que se encuentra la cuenca hidrográfica del río Bitá. A partir de la evaluación de las métricas de desempeño con los datos de precipitación de las estaciones del IDEAM, se seleccionaron los modelos MIROC5 y

HADGEM2 dada su buena representación de la variación interanual de la precipitación, generando las series para los escenarios 2022 – 2052, 2053 – 2083 y 2084 – 2100 y poder estimar la oferta hídrica total de la cuenca mediante la aplicación del modelo hidrológico continuo SMA.

La obtención de proyecciones o escenarios regionales de cambio climático, mediante procesos de downscaling estadístico utilizando datos climáticos locales, está sujeta a una serie de fuentes de incertidumbre que afectan a todos los pasos del proceso de su generación (Willems y Vrac, 2011). Entre ellas cabe destacar las asociadas al establecimiento de los escenarios alternativos de posibles evoluciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, las asociadas a los modelos globales de circulación general y las debidas a los propios métodos de regionalización en zonas o lugares donde se carece de instrumentación hidrometeorológica. (Khalili, Van Nguyen, 2017).

Cuantificar adecuadamente los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos bajo diferentes modelos hidrológicos es un gran desafío en las regiones con poca instrumentación hidrometeorológica (Vandana et al, 2019), el impacto del cambio climático sobre los procesos hidrológicos en cuencas hidrográficas y sobre la estimación de la producción hídrica de la misma se reportan en varios casos de estudios a nivel global en la literatura, en donde los cambios de temperatura y precipitación proyectados para el próximo siglo inducirán modificaciones importantes en los regímenes hidrológicos de los cuerpos de agua, Así mismo, Los efectos del cambio climático global amenazan la disponibilidad de recursos hídricos en todo el mundo y pueden modificar su patrón temporal en donde los resultados de la simulación muestran un aumento en los caudales altos y una reducción en los caudales bajos, pero la frecuencia de caudales altos y bajos aumenta durante períodos futuros. (Boyer et al., 2010, Fang et al., 2015, Luo et al., 2017 y Abeysingha et al., 2020).

Aunque todavía no hay un consenso general sobre las herramientas óptimas y metodologías a implementar para hacer esta clase de análisis, generalmente este tipo de estudios consisten en procesar resultados de escenarios de cambio en las variables climáticas provenientes de modelos de circulación

regional (MCR) –precipitación, temperatura, humedad relativa, etc.– como entrada en modelos hidrológicos a diferentes escalas temporales para algunos estudios desarrollados en nuestro continente (Martínez, et al., 2012, Villa, 2013, Dolores y Huarhua, 2015 y Copana, 2018) muestran que los resultados de este trabajos serán útiles para desarrollar un plan de adaptación de la gestión del agua en la cuenca de estudio y los mismos pueden ser replicables para las cuencas hidrográficas poco estudiadas en las regiones de la Orinoquia y la Amazonia.

En relación con la evaluación de la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Bitá bajo los escenarios de cambio climático para los diferentes escenarios estimados, se puede establecer que el modelo HADGEM 2 para los tres escenarios (2022-2052, 2053-2083, y 2084-2100), muestra una disminución de la oferta hídrica en promedio del 10% y 23% para los dos RCP (4.5 y 8.5) respectivamente, en relación con el escenario CHIRPS (1992-2021). Para el caso del modelo MIROC5 se presenta una disminución de la oferta hídrica para los tres escenarios en promedio del 23% para los dos RCP. El escenario (2022-2052), es donde se evidencia una disminución de la oferta hídrica especialmente para los meses de mayo a agosto para los dos modelos en relación con la oferta hídrica estimada con CHIRPS.

Es importante mencionar, que la disminución de la oferta hídrica se presenta especialmente en los meses con aumento de precipitación entre los meses de mayo a noviembre y se presenta aumento de la oferta hídrica para los meses secos entre diciembre y abril, como se puede evidenciar en la **Figura 53 a Figura 55** donde se muestra los escenarios de análisis para los dos modelos de cambio climático utilizados.

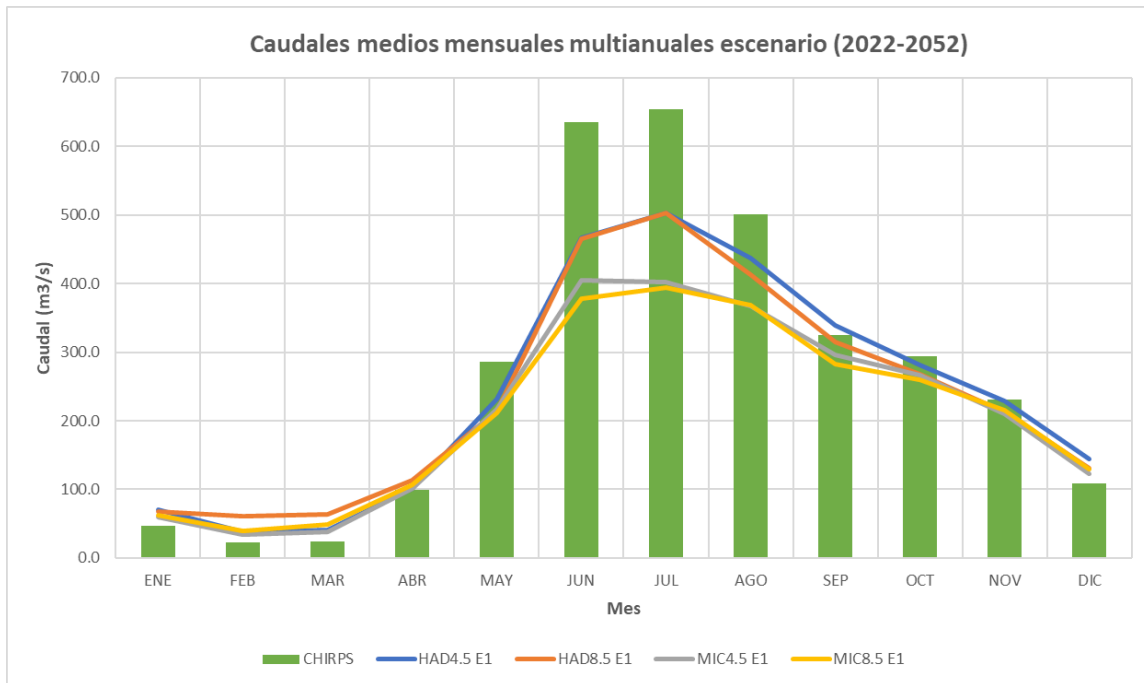


Figura 53 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2022-2052)

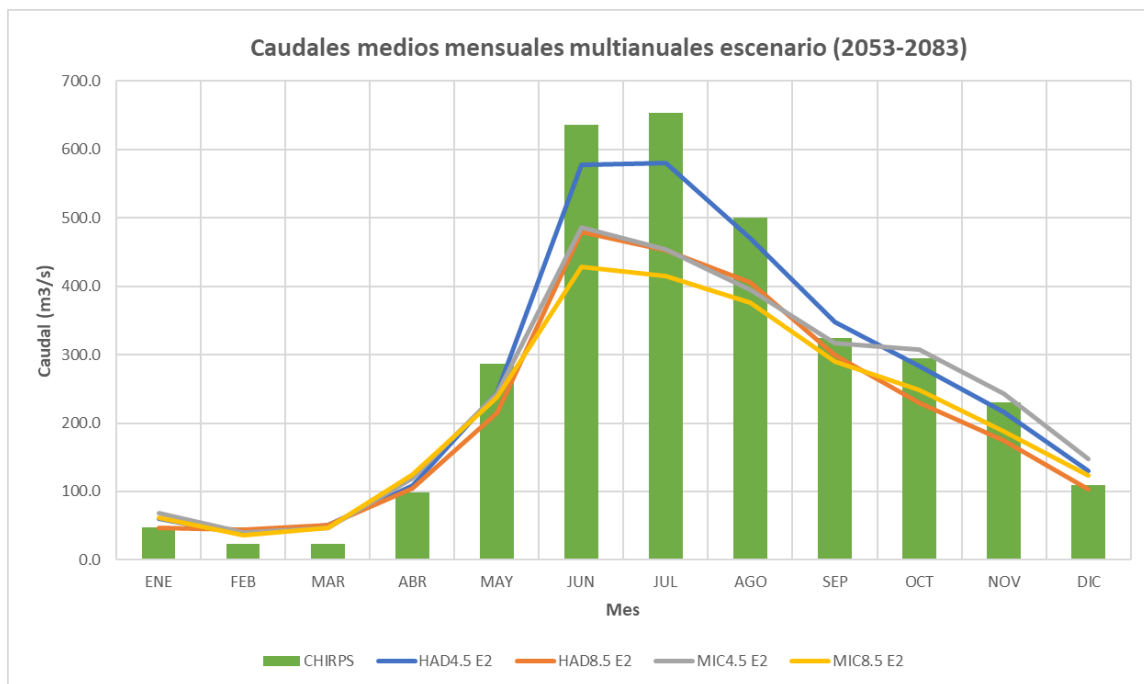


Figura 54 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2053-2083)

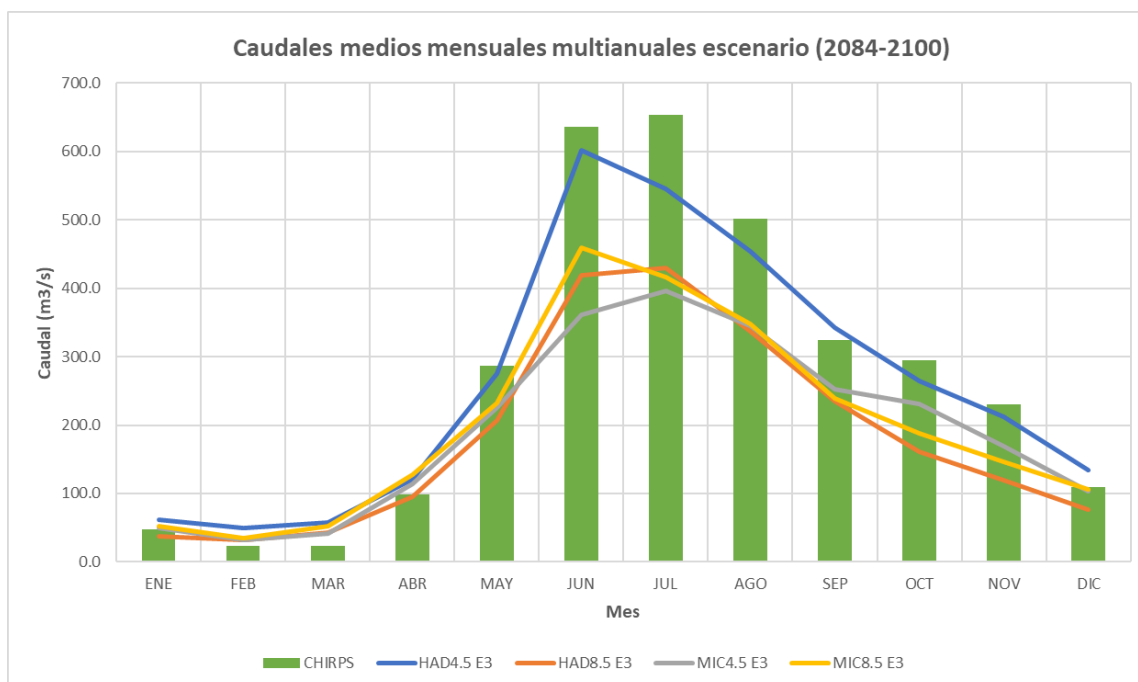


Figura 55 Caudales medios mensuales multianuales para los modelos de cambio climático escenario (2084-2100)

Adicionalmente, para las series de cambio climático obtenidas para los dos modelos de cambio climático, se realizó un análisis de la tendencia de la oferta hídrica mediante el test Mann-Kendall para el período (2022-2100), el cual permite detectar y localizar el punto aproximado de inicio de una determinada tendencia y consiste básicamente en la comparación entre los valores que componen una misma serie temporal, en orden secuencial (Silva, 2007), La existencia de una tendencia estáticamente significativa es evaluada por el valor de Z. el valor positivo de Z indica cuando hay aumento en la tendencia y el valor negativo indica disminución en la tendencia.

Para este caso, se realizó el análisis de tendencia para la oferta hídrica anual generada para el periodo (1992-2022) para los datos de IDEAM y CHIRPS, encontrándose una tendencia positiva para la oferta estimada con los datos extrapolados del IDEAM, situación contraria con lo proyectado por el IDEAM en sus estudios nacionales del agua y una tendencia negativa para CHIRPS, mostrando un pequeño descenso de la oferta hídrica anual.

Por otra parte, el modelo HADGEM2 para ambos RCP, en el período (2022-2100), muestra una tendencia negativa, sugiriendo una disminución de la oferta hídrica anual en relación con lo mostrado a nivel mensual multianual y el modelo MIROC5 para ambos RCP muestra una tendencia casi estable de la oferta hídrica anual en el tiempo.

Así mismo, al aplicar los índices de estado del recurso hídrico, se puede apreciar que la demanda hídrica total proyectada es muy baja en relación con la oferta hídrica disponible, lo cual genera que no exista una gran presión sobre el recurso hídrico y que el IUA se mantenga en una calificación muy baja para los tres escenarios y modelos evaluados, para el IRH que mide la cantidad de humedad que pueden retener las cuencas para la zona de estudio se presentan condiciones de baja a moderada regulación, se presenta un cambio de baja a moderada para los escenarios de cambio climático analizados para los dos RCP.

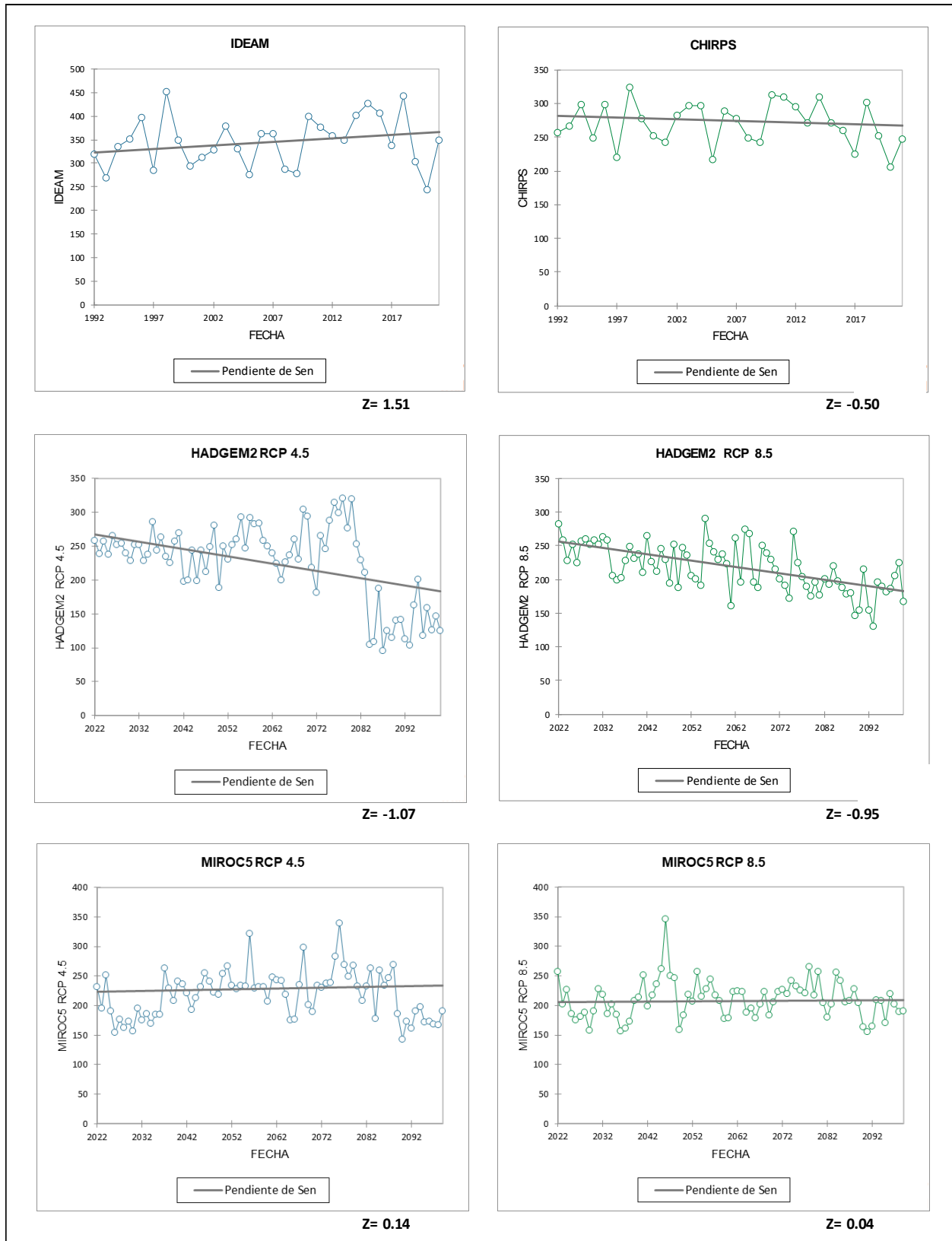


Figura 56 Análisis de la tendencia de la oferta hídrica

Por último, en cuanto al Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento IVH para los escenarios de cambio climático evaluados se presenta un bajo nivel debido a que las condiciones de la cuenca por no ser impactadas por intervenciones antrópicas invasivas en especial grandes ocupaciones humanas la demanda hídrica proyectada no es tan fuerte en relación con la oferta hídrica total y disponible de la cuenca del río Bitá, a pesar que para los escenarios evaluados se van a presentar disminuciones de la oferta hídrica.

8.3. Medidas de adaptación y mitigación de cambio climático y su incorporación en los instrumentos de planificación territorial y ambiental

La primera etapa implementada consistió en realizar una revisión documental acerca de la normatividad, los instrumentos de planificación territorial y de gestión ambiental y la institucionalidad colombiana que tiene injerencia en el cambio climático y el recurso hídrico, para lo cual, en la jurisdicción de la cuenca, se han encontrado algunos documentos orientativos que brindan algunos lineamientos enfocados a la adaptación al cambio climático, sin embargo, en los instrumentos de planificación territorial de los municipios de Puerto Carreño y La Primavera, no se han incorporado. Por otro lado, desde el nivel nacional se cuenta con normativa que brinda una guía para la inclusión del cambio climático en el ordenamiento territorial, sin embargo, se considera que el foco principalmente a nivel nacional se orienta en la inclusión de medidas de mitigación y a pesar de los lineamientos establecidos, queda en potestad del territorio la adecuada adopción de estos criterios para que en los municipios establezcan un modelos de ocupación del territorio y la ejecución de proyectos programáticos en cuanto a las medidas de adaptación de cambio climático enfocadas al ordenamiento territorial entorno a la oferta hídrica.

8.3.1. Propuesta programática para la cuenca del río Bita de acuerdo a las proyecciones de oferta hídrica bajo los escenarios de cambio climático

Como punto de partida para una propuesta programática para la cuenca del río Bita, con foco en la conservación del recurso hídrico, se debe partir de la premisa de la importancia que tiene la planificación del territorio a partir de la visión del sistema hídrico interconectado que define cuenca hidrográfica.

En este sentido, esta importancia está sustentada en que la cuenca es el espacio del territorio en el cual se puede ver integralmente el recurso hídrico, los recursos naturales y las dinámicas del desarrollo socio-económico, lo que permite planificar con la toda la información para generar alternativas de toma de decisiones para el uso de los recursos de agua y tierra de la cuenca, sin generar conflictos o realizar intervenciones sin causar impactos aguas abajo.

Por otra parte, las medidas de gestión del recurso hídrico en contexto de cambio climático, pueden llegar a ser redundantes en los diferentes instrumentos de planeación territorial, si se realizan de manera particular y no de forma integrada territorial ni sectorial, o sin actualizaciones periódicas. En general en Colombia cada sistema, cada entidad, cada institución elabora sus propias guías y orientaciones metodológicas, que muchas veces no se articulan en la práctica. La desarticulación entre instrumentos de planificación, conlleva dificultades en implementación de medidas tanto de gestión del cambio climático como de gestión integral del recurso hídrico y de reducción del riesgo de desastres, cuando son desarrolladas de forma aislada. Por lo que es necesario identificar puntos de articulación de instrumentos que faciliten la formulación de estrategias integrales para el desarrollo y la gestión del cambio climático que trasciendan visiones sectoriales, así como una hoja de ruta que apunte a la articulación y la armonización.

Con el fin de preservar la articulación de las medidas de mitigación y adaptación en los instrumentos de ordenación, se propone considerar los siguientes pasos recomendados por PNUD en la **Figura 57** (PNUD, 2010).



Figura 57. Pasos para diseñar una medida de adaptación

Fuente: PNUD, 2010.

Bajo este lineamiento, a continuación, de la Tabla 15 a la Tabla 20, se describen las medias propuestas como un aporte a la gestión del recurso hídrico en la cuenca del río Bitá. Las medidas consideradas son:

1. Integración del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial relacionados con el recurso hídrico y el cambio climático.
2. Conservación de ecosistemas vulnerables al cambio climático para la provisión de agua.
3. Adaptación basada en ecosistemas.

4. Preservación del agua como eje vital de organización social.
5. Recuperar las áreas degradadas de importancia hídrica
6. Generar huertos multipropósito

Tabla 15. Medida: Integración del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial relacionados con el recurso hídrico y el cambio climático.

Medida 01: Integración del cambio climático en los instrumentos de planificación territorial relacionados con el recurso hídrico y el cambio climático.	
<p><u>Objetivo:</u> Incorporar por parte de las autoridades municipales dentro de sus planes de ordenamiento territorial y planes de desarrollo, la gestión del cambio climático teniendo como referencia los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático del departamento y los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Sectoriales.</p>	<p><u>Descripción:</u> Es responsabilidad de los municipios consultar los Planes Integrales Departamentales y demás instrumentos nacionales para priorizar e incorporar dentro los Planes de Ordenamiento Territorial las medidas que consideren pertinentes.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> Desarrollo y/o aplicación de los instrumentos de gestión de cambio climático relacionados con:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Sectoriales y los Territoriales: Formulados a nivel departamental y eventualmente a escala más detallada a nivel municipal. • Planes de desarrollo de las entidades territoriales y los planes de ordenamiento territorial: Los municipios con base en los lineamientos definidos, deberán consultar el PIGCCT del nivel Departamental correspondiente e incorporar los lineamientos que se hayan definido como prioritarios dentro de sus instrumentos de desarrollo local. 	<p><u>Beneficios:</u> La integración de los planes de gestión del Cambio Climático permiten a las autoridades territoriales identificar, evaluar, priorizar y definir medidas y acciones de adaptación y de mitigación de emisiones de GEI, para ser implementadas en el territorio a partir del análisis de vulnerabilidad e inventario de GEI regionales.</p>

Tabla 16. Medida: Conservación de ecosistemas vulnerables al cambio climático para la provisión de agua.

Medida 02: Conservación de ecosistemas vulnerables al cambio climático para la provisión de agua.	
<p><u>Objetivo:</u> Recuperación, restauración ecológica y conservación de una zona de bosque de galería.</p>	<p><u>Descripción:</u> Conformación de un proyecto que contemple las fases de recuperación, restauración y conservación de zonas ubicadas en ecosistemas de bosque de galería.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> El proceso debe basarse en un diagnóstico de la zona donde se incluya el estado de la vegetación, especies nativas, ecosistemas, fuentes hídricas y procesos erosivos, entre otros, para tal fin se debe articular esta medida con las medidas de manejo ambiental que actualmente se están formulando en el marco del Plan de manejo ambiental de la cuenca del río Bitá, como sitio RAMSAR.</p>	<p><u>Beneficios:</u> Mejorar las condiciones de una zona de bosque húmedo o bosque seco traerá como consecuencia el aumento de la disponibilidad hídrica de la zona, disminuyendo los procesos erosivos e incrementando la capacidad adaptativa al promover la participación comunitaria en este tipo de procesos. Se generará una disminución en la vulnerabilidad al cambio climático para los ecosistemas en el área del proyecto y en aquellos relacionados directa o indirectamente con la zona, debido a la promoción de la recuperación de zonas de bosques que propendan por la disminución de los fenómenos erosivos causados por efectos de vientos, escorrentías y de la acción antrópica. Asimismo, se promoverá la recarga de acuíferos, control de los caudales, mejoramiento del hábitat de especies, aumento del bienestar de las comunidades y empoderamiento humano en el tema de cambio climático, entre otros.</p>

Tabla 17. Medida: Adaptación basada en ecosistemas.

Medida 03: Adaptación basada en ecosistemas.	
<p><u>Objetivo:</u> Apoyar la protección de los ecosistemas y la adaptación de las comunidades locales al cambio climático, además de disminuir su vulnerabilidad, específicamente por la disminución de agua.</p>	<p><u>Descripción:</u> Desarrollo de acciones que contribuyan a mejorar la gobernanza de la región mediante la incorporación de la Adaptación basada en Ecosistemas (AbE), en los procesos regionales de planificación, incluidos los planes de gestión municipal y de cuencas hidrográficas.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> Establecimiento de datos de referencia sobre la cobertura vegetal y el uso del suelo, los ciclos del agua y del carbono, los sistemas de cultivo y la zonificación de riesgos. Esta información, junto con la información climática, apoya sistemas de alerta temprana para incendios e inundaciones.</p> <p>Manejo integrado del recurso hídrico reconociendo el rol de las cuencas hidrográficas, bosques y vegetación asociada en la regulación de los flujos de agua.</p> <p>Reducción del riesgo de desastres mediante la restauración de hábitats que pueden ser una medida eficaz contra las tormentas, inundaciones y erosión.</p> <p>Establecimiento de sistemas agropecuarios diversos, donde la utilización del conocimiento local sobre cultivos, prácticas específicas y variedades de ganado, y el mantenimiento de la diversidad genética de los cultivos agrícolas contribuyen a asegurar la provisión de alimentos frente a condiciones climáticas cambiantes.</p> <p>Manejo de matorrales y arbustos para evitar los incendios forestales.</p> <p>Establecimiento y manejo efectivo de sistemas de áreas protegidas para asegurar la provisión de servicios ecosistémicos que contribuyen a incrementar la resiliencia contra el cambio climático.</p>	<p><u>Beneficios:</u> La AbE puede incorporarse en las políticas y prácticas nacionales, regionales y locales mediante la adopción de un enfoque integrado, participativo y basado en los ecosistemas para el ordenamiento territorial.</p>

Tabla 18. Medida: Preservación del agua como eje vital de organización social.

Medida 04: Preservación del agua como eje vital de organización social.	
<p><u>Objetivo:</u> Propender por conservar las condiciones de oferta hídrica en la cuenca.</p>	<p><u>Descripción:</u> Desarrollo de varios proyectos que contemplen las diferentes acciones a ejecutar en el territorio con foco en la recuperación, restauración y conservación de las fuentes hídricas y de los servicios ecosistémicos.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> Cumplimiento de las regulaciones de las zonas de riesgo. Reevaluación de criterios de diseño y seguridad de las estructuras para la gestión del agua. Manejo integral de recursos hídricos. Potenciación de prácticas ancestrales de manejo de agua. Protección de agua subterránea y planes de restauración. Sistemas de abastecimiento de agua.</p>	<p><u>Beneficios:</u> Reducción en los impactos asociados a la distribución temporal y espacial irregular del recurso, intensificación de inundaciones, cambios en los caudales hidrológicos, incremento de estrés hídrico, deterioro de calidad del agua, mayor riesgo de contaminación de aguas subterráneas, incumplimiento de las regulaciones de las zonas de riesgo, reevaluación de criterios de diseño y seguridad de las estructuras para la gestión del agua y en los sistemas de abastecimiento de agua.</p>

Tabla 19. Medida: Recuperar las áreas degradadas de importancia hídrica.

Medida 05: Recuperar las áreas degradadas de importancia hídrica.	
<p><u>Objetivo:</u> Promover la recuperación del suelo, las coberturas vegetales y la dinámica hídrica en los lugares en donde la producción agropecuaria ya no es viable debido al avanzado estado de deterioro del suelo.</p>	<p><u>Descripción:</u> Desarrollo de acciones de conservación y restauración para recuperación de la producción hídrica.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> Consiste en iniciar procesos para la estabilización y recuperación del suelo a partir del establecimiento de coberturas vegetales en altas densidades, ubicadas en las áreas que han perdido capacidad productiva y de regeneración natural. Este tratamiento es recomendado para aquellos lugares en los que la cobertura vegetal y la capa orgánica del suelo han desaparecido, lugares sobrelaborados por la agricultura, es adecuado para terrenos en donde aún con tiempos prolongados de reposo no se activan los procesos de regeneración natural.</p>	<p><u>Beneficios:</u> Con el establecimiento de coberturas vegetales en altas densidades se buscan los beneficios que se le atribuyen a las plantas en la formación y conservación del suelo, entre los que se encuentran la interceptación y reducción de la fuerza de la lluvia y del viento, incrementar la capacidad de infiltración, extraer los excesos de humedad superficial en el suelo y evitar la fragmentación del suelo generada por la desecación. Las raíces aportan a la formación de la estructura, refuerzan la cohesión y la estabilidad del suelo y retienen el desplazamiento de las partículas superficiales. Estos beneficios se suman a los aportes en retención de humedad que se logran con la acumulación y recirculación de la materia orgánica. El crecimiento de vegetación sobre los terrenos con suelos deteriorados inicia procesos que devuelven las propiedades físicas y químicas que contribuyen a reducir los riesgos de erosión. La protección contra la fuerza de la lluvia y el viento, así como una mayor cohesión entre agregados, determina una mayor resistencia a las fuerzas que generan el desplazamiento del suelo. La recuperación de la textura y el incremento de la porosidad por efecto del crecimiento y descomposición de las raíces de las plantas, junto con la acumulación de materia orgánica por recirculación y acumulación de biomasa, incrementa la capacidad de infiltración y almacenamiento de humedad.</p>

Tabla 20. Medida: Generar huertos multipropósito.

Medida 06: Generar huertos multipropósito.	
<p><u>Objetivo:</u> Establecer áreas con plantaciones de especies forrajeras que sirven de complemento a la dieta de especies menores en las épocas en las que se reduce la oferta de alimento, aportando además a la regulación del clima local y a la conectividad del paisaje, entre otros bienes y servicios ecosistémicos.</p>	<p><u>Descripción:</u> Desarrollo de acciones de producción sostenible.</p>
<p><u>Acciones requeridas:</u> Se plantan especies forrajeras formando franjas que rodean las instalaciones pecuarias o el entorno de la vivienda. Se usan como parte de las dietas de los animales, especialmente en época seca. Dentro de las plantas utilizadas se incluyen especies leguminosas. Este grupo ha desarrollado distintos mecanismos biológicos para la captación del nitrógeno atmosférico que circula en los poros del suelo y de minerales como el fósforo que en su ausencia limitan el desarrollo de plantas en suelos tropicales. Asimismo, estas especies actúan como pioneras en los procesos de sucesión ecológica, destacándose como fijadoras de suelo para el control de la erosión, aportando materia orgánica, siendo reguladoras hídricas, sirviendo de refugio y alimento por sus frutos y semillas para las aves silvestres. También son especies de uso doméstico como forraje, frutales de clima frío, colorantes y medicinales.</p>	<p><u>Beneficios:</u> Frente a eventos de sequía, estas áreas aseguran material disponible que se traduce en forraje, protegen los suelos, regulan las corrientes de aire y la radiación solar, con lo cual, contribuyen a una mejor adaptación ante el cambio climático. Es una alternativa que reduce la presión sobre los relictos de vegetación, especialmente en las épocas de poca precipitación, es adecuada para aumentar la productividad de la tierra sin causar degradación. Mantiene la seguridad alimentaria ya que mejora la oferta alimenticia para el sostenimiento de especies menores. Así mismo, ayuda a disminuir la cantidad de inversiones e insumos porque reduce la necesidad de comprar suplementos alimenticios como gallinaza, melaza, etc. También puede funcionar como barrera cortavientos.</p>

8.3.2. Propuesta metodológica de la inclusión del recurso hídrico como determinante ambiental

A partir de los resultados obtenidos del análisis de los instrumentos de planificación, se puede resaltar lo siguiente:

- El Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico, es a nivel nacional, el único instrumento de planificación del recurso hídrico que genera una determinante ambiental en torno a la oferta hídrica y está relacionada directamente con el ordenamiento territorial y específicamente en el modelo de ocupación del territorio.
- Los instrumentos territoriales existentes en la cuenca en relación a la oferta hídrica son poco concisos, se realizan unas recomendaciones en relación al cumplimiento de los objetivos de calidad definidos para el corto, mediano y largo plazo cuerpo de agua y la inclusión de los escenarios de riesgos del recurso hídrico en los diferentes instrumentos de planeación del municipio, para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico desde una perspectiva de oferta, demanda y calidad de agua.
- La normatividad actual a nivel de ordenamiento territorial dentro del componente general establece que un municipio debe realizar la delimitación de las áreas de reserva para la protección del medio ambiente y los recursos naturales. Desde el ordenamiento territorial y el ordenamiento ambiental, principalmente desde el componente del recurso hídrico, es necesario conectar la oferta hídrica dentro del ordenamiento del territorio y por lo tanto se hace necesario realizar una articulación a nivel de los instrumentos, la normatividad y su inclusión en el ordenamiento territorial (Castillo, 2022).

- A nivel del ordenamiento territorial es necesario reconocer las estructuras biofísicas que soportan la ocupación y el uso del territorio, con las restricciones y determinantes que estas pueden plantear el territorio, definiendo las dinámicas territoriales derivadas de las distintas formas de ocupación y la proyección de estas dinámicas.
- En relación a la oferta hídrica a nivel del ordenamiento y planificación del recurso hídrico, requiere generar indicadores de presión que presenten el grado de presión que tiene la fuente hídrica, la capacidad de retención y la regulación hídrica identificando zonas que contengan condiciones más estables de escurrimiento y de regulación de caudales y la vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico señalando las zonas que por el uso (relación oferta y demanda) y la regulación de agua, tienen una mayor o menor fragilidad ante diversas condiciones, como aumento en la demanda de agua, variabilidad climática, degradación de la cuenca o intensificación de amenazas.

9. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en la presente investigación, es posible evaluar el impacto del cambio climático en la oferta hídrica en cuencas hidrográficas poco instrumentadas, como es el caso de la Cuenca hidrográfica del río Bitá en el Departamento del Vichada, a partir de la utilización de series hidroclimáticas, como es el producto CHIRPS (Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations), que son aplicables para la generación de modelos hidrológicos continuos que permiten estimar la oferta hídrica total y disponible de una cuenca. Es importante recalcar que el área de estudio juega un papel importante dado que este producto tiene una resolución espacial de 0.05° (aproximadamente 5,6 Km) y se tendría un solo dato de precipitación para esta área, lo cual nos indica que no sería aconsejable aplicar en cuencas hidrográficas de poca extensión.

Para cuencas poco instrumentadas, mediante la aplicación de productos disponibles para descarga de datos de precipitación mundial, es posible implementar metodologías para realizar la descarga de datos de los modelos de cambio climático en una zona de estudio y apoyarse estos para mejorar la incertidumbre de los mismos dada su resolución espacial. En este caso, se utilizó la metodología del principio de máxima entropía, desarrollada por Guiza, 2018 (2019), para obtener datos de precipitación a escala diaria de modelos de circulación global (MIROC5, HADGEM2 y INMCM4) tratando de conservar la variabilidad espacial y el comportamiento interanual de esta variable, que permite reproducir adecuadamente el comportamiento histórico diario de la precipitación.

En la evaluación de la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del río Bitá bajo los escenarios de cambio climático para los diferentes escenarios estimados, se puede establecer que el modelo HADGEM 2 para los tres escenarios (2022-2052, 2053-2083, y 2084-2100), muestra una disminución de la oferta hídrica en promedio del 10% y 23% para los dos RCP (4.5 y 8.5) respectivamente, en relación con el escenario CHIRPS (1992-2021). Para el caso del modelo MIROC5 se presenta una disminución de la oferta hídrica para los tres escenarios en promedio del 23% para los dos RCP. El escenario (2022-2052), es

donde se evidencia una disminución de la oferta hídrica especialmente para los meses de mayo a agosto para los dos modelos en relación con la oferta hídrica estimada con CHIRPS. Los resultados aportados por los modelos muestran que la oferta hídrica para los escenarios futuros de la cuenca presenta una disminución en su magnitud, que para este caso es superior a lo mencionado por el PRICCO y la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Como indicador de riesgo se estimó el Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento IVH, para los escenarios de cambio climático evaluados se presenta un bajo nivel debido a que las condiciones de la cuenca por no ser impactadas por intervenciones antrópicas invasivas en especial grandes ocupaciones humanas, la demanda hídrica proyectada no es tan fuerte en relación con la oferta hídrica total y disponible de la cuenca del río Bitá, a pesar que para los escenarios evaluados se van a presentar disminuciones de la oferta hídrica.

En los instrumentos de planificación territorial de los municipios de Puerto Carreño y La Primavera, no se ha incorporado lo correspondiente a la normatividad en relación a los instrumentos de planificación territorial y de gestión ambiental, así como los que corresponden a la gestión del cambio climático y del recurso hídrico. En su lugar se elaborado algunos documentos orientativos que brindan algunos lineamientos enfocados a la adaptación al cambio climático. Por otro lado, desde el nivel nacional se cuenta con normativa que brinda una guía para la inclusión del cambio climático en el ordenamiento territorial, sin embargo, se considera que el foco principalmente a nivel nacional se orienta en la inclusión de medidas de mitigación y a pesar de los lineamientos establecidos, queda en potestad del territorio la adecuada adopción de estos criterios para que en los municipios establezcan un modelos de ocupación del territorio y la ejecución de proyectos programáticos en cuanto a las medidas de adaptación de cambio climático enfocadas al ordenamiento territorial entorno a la oferta hídrica.

10. Recomendaciones

La búsqueda de opciones para enfrentar el cambio climático lleva a la necesidad de estimar sus impactos potenciales, por lo que es preciso conocer con mayor detalle en ámbitos territoriales específicos cómo cambiará el clima y su influencia en la oferta hídrica y en los potenciales escenarios de riesgo de desastres, como por ejemplo los incendios forestales. Sin embargo, los experimentos de cambio climático realizados con base en los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (GCMs), fueron pensados para simular la respuesta global y de gran escala ante incrementos en las concentraciones de GEI y no para simular el clima de un lugar en particular (Hamlet, Salathé, Carrasco, 2010). El autor Jha (2012) plantea que, en materia de cambio climático y adaptación, es muy importante generar escenarios regionales para analizar con mayor detalle sus posibles impactos potenciales.

Para futuras investigaciones relacionadas con la ampliación de modelos de circulación global para una zona de estudio, en lo posible se debe realizar la aplicación de los modelos disponibles a la fecha o de los mismo que tengan el mejor desempeño para la zona de estudio, dado que los escenarios actuales planteado por el IDEAM en su Tercera Comunicación de Cambio Climático se generaron a partir de las proyecciones de diversos modelos CMIP5 estimado como el promedio de las proyecciones correspondientes a las cuatro RCP del quinto reporte de evaluación del IPCC . Al utilizar un escenario estimado como el promedio aritmético de estas RCP, se pierde la oportunidad de evaluar posibles condiciones futuras, anulando la utilidad de plantear diversas trayectorias de emisiones de GEI y eliminando, la posibilidad de que los tomadores de decisiones de políticas en el territorio dispongan de un umbral de incertidumbre para formular sus acciones de adaptación al cambio climático (Arias et al 2022).

Se recomienda evaluar para la zona de estudio otros modelos de cambio climático desarrollados a la fecha, para lo cual se sugiere realizar un downscaling estadístico a partir de uno o varios escenarios

que hayan sido utilizados en la zona y evaluar su desempeño en relación con la climatología de referencia que debe evaluarse a la fecha.

Es importante también revisar la forma de desagregación de los datos a nivel diarios, dado que existen diferentes metodologías aplicables para este caso que pueden variar en su implementación y desviar los resultados, para lo cual se sugiere evaluar varias metodologías y evaluar su desempeño.

Para aplicaciones similares o en futuras investigaciones, se sugiere incluir como una variable adicional en el modelo el cambio de uso y cobertura del suelo que puede generar un cambio en la estimación de la oferta hídrica para modelos lluvia escurrentía que interrelacionan las variables climáticas y el suelo y posteriormente, revisar los cambios en los escenarios futuros planteados.

La gestión del riesgo de desastres exige acciones de carácter integral con los fenómenos del cambio climático y sus estrategias de adaptación, vinculadas al ámbito sectorial y territorial y, por lo tanto, requiere también una articulación en la planificación territorial, ambiental y sectorial para el desarrollo de acciones coordinadas en materia de cambio climático.

La nueva política de recurso hídrico, que debe desarrollar a futuro para Colombia, debe incluir la evaluación del riesgo al cambio climático en la dimensión de la oferta hídrica, para que el mismo se articulado al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente (MAVDT, 2010). Lo cual debe ser aplicado a los nuevos estudios del IPCC en relación a las nuevas “Trayectorias socioeconómicas compartidas – SSP”, según las diferentes políticas climáticas aplicables al territorio.

A nivel nacional, se han desarrollado varios trabajos a nivel de proyectos de grado a nivel de pregrado con casos de estudio a nivel local, en donde se puede deslumbrar que las tendencias de posible cambio en el clima local, están relacionadas con el estado físico del territorio en términos de cobertura vegetal como principal regulador hídrico y térmico, este escenario afecta la disponibilidad de

agua para los distintos usos y procesos fisiológicos vegetales, aun cuando la oferta por precipitación sea de tendencia al aumento, es necesario la implementación de modelos que permitan predecir como cambiará el uso del suelo dentro del área estudiada y de esta manera predecir de manera más acertada como podría cambiar la demanda hídrica y se recomienda realizar unos análisis de incertidumbre de los métodos de reducción de escala aplicados en el mismo con el fin de reducir posibles los niveles de error en el proceso de la modelación hidrológica llevada a cabo con las series de datos resultantes de esta metodología. (Pimiento y Restrepo, 2018, Rivera y América, 2018, Velásquez, 2018 y Revueltas, et al, 2020).

Uno de los desafíos para lograr la gestión integral del recurso hídrico en contexto de cambio climático es la necesidad de mayor articulación y alineación entre diferentes procesos de políticas y entre instrumentos de planeación territorial, por cuanto estos instrumentos son liderados muchas veces por diferentes unidades o entidades gubernamentales, con sus propias normas, regulaciones y sistemas de coordinación, generando barreras administrativas y de capacidad que pueden restringir esfuerzos y que se hace necesario alinear.

Dada la importancia que se le ha dado a la cuenca hidrográfica del río Bitá, en declararla como un humedal a nivel RAMSAR, es necesario que las autoridades departamentales y municipales incorporen dentro de sus planes de desarrollo y, planes de ordenamiento territorial, la gestión del cambio climático teniendo como referencia los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Territoriales: de su departamento y los Planes Integrales de Gestión del Cambio Climático Sectoriales. Por otra parte, es necesario realizar la integración de la gestión del cambio climático en los instrumentos de planificación del recurso hídrico, como en los otros instrumentos de planificación ambiental que actualmente se encuentran en desarrollo para la zona declarada.

11. Referencias

- Abeyasingha, N., Islam, A., y Singh, M. (2020). Assessment of climate change impact on flow regimes over the Gomti River basin under IPCC AR5 climate change scenarios. *Journal of Water and Climate Change*.
- ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO GARAGOA. (2017). Caracterización del medio físico biótico - Calidad de agua. Colombia.
- Alarcón, J., Zafra, C., y Echeverri, L. (2019). Cambio climático y recursos hídricos en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*.
- Anandhi, A., Frej, A., Pierson, D. C., Schneiderman, E. M., Zion, M. S., Lounsbury, D., y Matonse, A. H. (2011). Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment, *Water Resour. Res.*, 47. Cambio Climático de la cuenca del río Bitá en el Departamento del Vichada. Especialización en ordenamiento y gestión integral de cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia.
- Arias PA, Villegas LD, Mesa OJ, et al (2022). Implicaciones metodológicas e inconsistencias de la Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático de Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. 46(180):769-794, julio-septiembre de 2022. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1705>
- Avellaneda, K. (2020). Evaluación de la sensibilidad y la capacidad de Adaptación al Cambio Climático de la cuenca del río Bitá en el Departamento del Vichada. Especialización en ordenamiento y gestión integral de cuencas hidrográficas. Bogotá, Colombia.
- BID (2016) Trayectorias de concentración representativas (RCP). [Online]. Available: <https://sector.iadb.org/es/adaptacion/pages/trayectorias-deconcentraci%C3%B3n-representativas-rcp>.

- Bonilla-Ovallos Carlos Andrés y Mesa Oscar José. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Medellín, Colombia. doi: <http://dx.doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Bouwer Laurens M., P. B. (2010). Changes in future flood risk due to climate and development in a Dutch polder area. Elsevier.
- Boyer, C., Chaumont, D., Chartier, I., y Roy, A. (2010). Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries. *Journal of Hydrology*, 65-83.
- Carmi JoAnn, A. I. (2012). Urban Climate Adaptation in the Global South: Planning in an Emerging Policy Domain.
- Castillo Edwin (2022). Propuesta metodológica para incorporar la evaluación de la oferta hídrica como un determinante en el ordenamiento territorial. Universidad de Barcelona.
- Castillo, S. M. (2012). The identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology.
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW W- HILL.
- CIAT y CORMACARENA. (2018). Plan Regional Integral de Cambio Climático para la Orinoquía. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Consorcio Río Bitá. (2018). Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bitá SZH (3801) localizada en los municipios de La Primavera y Puerto Carreño en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de la Orinoquia CORPORINOQUIA.
- Copana Pacuara, C. F. (Octubre de 2018). Efectos del Cambio Climático sobre la disponibilidad de agua y los recursos hídricos en Bolivia: Pronódtico para el 2030. Documento de Trabajo IISEC-UCB No. 05/18.

- CORPORINOQUIA, C. A. (2021). Contrato de consultoría 120.12-6.18.194 de 2018 “Formulación del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bitá SZH (3801) localizada en los municipios de La Primavera y Puerto Carreño. Yopal.
- Cuenca J., Pedraza A. (2018). Validación de las estimaciones de precipitación con CHIRPS e IRE/IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2018).
- DNP. (2012). D. N. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.
- Dolores, Y., y Huarhua, D. (2015). Impacto del cambio climático en la oferta hídrica superficial de la cuenca del río Piura. Trabajo de titulación para optar el título de Ingeniero Agrícola. Lima, Perú.
- Domínguez, E. (2010). Efectos hidrológicos del cambio climático en Colombia. Diversidad y Cambio Climático.
- Fang, G., Yang, J., Chen, Y., Zhang, S., Deng, H., Liu, H., y De Maeyer, P. (2015). Climate Change Impact on the Hydrology of a Typical Watershed in the Tianshan Mountains. *Advances in Meteorology*, vol. 2015, Article ID 960471.
- FAO. (s.f.). Evapotranspiración de Cultivo.
- Franco, J. V. (2013). Sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital. Bogotá.
- Fundación Grothendieck, 2021. Informe deforestación y vulnerabilidad climática de la región Orinoquia.
- Guerrero, L. (2018). Impacto del cambio climático en la relación oferta - demanda del recurso relación oferta - demanda del recurso. Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de Magíster en Geografía. Bogotá, Colombia.
- Guido Aldana, Pedro Antonio (2017). Cambio climático: selección, clasificación y diseño de medidas de adaptación. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. ISBN 978-607-9368-83-8.
- Güiza, N. (2018). Implicaciones del cambio climático en la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello. Trabajo final presentado como requisito para optar al título de: Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Bogotá, Colombia.

- Güiza-Villa, N. (2019). Estimación de los cambios en los índices asociados a la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello bajo escenarios de cambio climático. Obtenido de Trabajo de grado - Maestría: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76347>
- Hamlet, A., Salathé, E., y Carrasco, P. (2010). Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipitation with application to water resources planning studies. Statistical downscaling techniques for global climate model simulations of temperature and precipi. Chapter 4 in Final Report for the Columbia Basin Climate Change Scenarios Project, Climate Impacts Group.
- IDEAM. (2013). GUÍA TÉCNICA PARA LA FORMULACIÓN DE PLANES DE ORDENAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá D.C.: IDEAM.
- Ideam. (2018). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C.
- IDEAM - UNAL, I. d. (2018). Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia.
- IDEAM-PNUD. (2015). Tercera comunicación Nacional de Colombia a la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2015). Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100. Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Disponible en <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/escenarios-de-cambio-climatico-2015.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá D.C.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC; CGACC, (2020), Escenarios de Cambio Climático; Escenario de cambio climático respecto al modelo HADGEM2-ES.

Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC (2007), “Resumen para responsables de políticas:

Escenarios de emisiones”. <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/sres-s.pdf>

Intergovernmental Panel of Climate Change-IPCC, 2013. Data Distribution Centre -DDC-. Definition of

Terms Used Within the Pages DDC. <http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/definitions.html>.

Extraído en Octubre 2013.

Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC (2013). Resumen para responsables de políticas. En:

Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, Suiza.

IPCC (2017). Data Distribution Centre, Scenario Process for AR5, Representative Concentration Pathways (RCPs). [Online]. Available: http://sedac.ipccdata.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html.

IPCC (2018). I. P. Global Warming of 1.5°C.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The Water Footprint Assessment Manual. Febrero 2011. Earthscan. <http://doi.org/978-1-84971-279-8>.

Jha Abhas K, B. R. (2012). Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century.

Karl, T.R., N. Nicholls, y A. Ghazi (1999): “CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes”. Workshop summary. *Climatic Change*, 42. 1999. Págs 3-7.

- Khalili, M., Van Nguyen, V.T. (2017). An efficient statistical approach to multi-site downscaling of daily precipitation series in the context of climate change. *Clim Dyn* 49.
<https://doi.org/10.1007/s00382-016-3443-6>
- Luo, M., Meng, F., Liu, T., Duan, Y., Frankl, A., Kurban, A., y De Maeyer, P. (2017). Multi-Model Ensemble Approaches to Assessment of Effects of Local Climate Change on Water Resources of the Hotan River Basin in Xinjiang. *Water*.
- Martínez, A., Polioptro, F., y Patiño Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. III, núm. 1, 5-20.
- MAVDT, M. d. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.
- Mayorga, R., G. Hurtado y H. Benavides (2011): “Evidencias de cambio climático en Colombia con base en información estadística”. Nota Técnica IDEAM, IDEAM-METEO/001-2011, Bogotá D.C., Colombia. 2011.
- Milly, P. C. (2008). Stationarity is dead: Whither water management? *Ciencia*, Vol. 319, No. 5863, 573–574.
- MINAGRICULTURA. (2015). Anuario Estadístico del Sector Agropecuario. Bogotá, D.C.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico-web.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Económico. (2000). Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Bogotá.
- Monsalve Sáenz, G. (1995). Hidrología en la ingeniería. Bogotá.
- Muñoz, Á., Recalde, C., Cadena, J., Núñez, A., y Díaz, J. (2010). “Resultados del análisis estadístico con FCLIMDEX para Ecuador”. Proyecto PRAA. Disponible en http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/07/Informe_ClimDex-_2010.pdf

- ONU-Agua. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Paris: Lucart Estudio S.A.
- ONU-Agua. (2020). Informe de políticas de ONU-AGUA sobre el Cambio Climático y el Agua.
- Ortega, G., & Arias, P. (2018). Evaluación de la representación de la precipitación y la temperatura media por modelos CMIP5 sobre Colombia y el neotrópico: implicaciones en regímenes hidrológicos. Seminario nacional de hidráulica e hidrología.
- Pabón Caicedo, J. (2012). Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 36(139), 261-278.
- Palomino-Lemus, R., Córdoba-Machado, S., Gámiz-Fortis, S. R., Castro-Díez, Y., & Esteban-Parra, M. J. (2015). Summer precipitation projections over northwestern South America from CMIP5 models. *Global and Planetary Change*. Volume 131, 11-23.
- Pimiento, M., y Restrepo, L. (2018). Análisis de la relación oferta-demanda hídrica en la cuenca del río Gualí bajo escenarios de cambio climático. Trabajo de grado para optar al título de ingeniera ambiental. Bogotá, Colombia.
- Planificación Integral Consultores S.A.S. (2017). Formulación de la Fase I del estudio regional del agua (ERA) e implementación y actualización del instrumento económico tasa por uso de agua en la jurisdicción de Corporinoquia. Bogotá, D.C.
- PNUD (2010), A Toolkit for Designing Climate Change Adaptation Initiatives: UNDP and Bureau of Development Policy, New York.
- PREDECAN. (2009). Articulando la gestión del riesgo y la adaptación al cambio climático en el sector agropecuario.
- Reszka, P. B. (2012). A methodology for the estimation of ignition delay times in forest fire modelling.

- Revueltas, J., Zabaleta, A., Mercado, T., y 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.
- Riahi, K. v. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*.
- Rivera, J., y América, D. (2018). Aproximación de la oferta hídrica futura de la cuenca del río Chuza bajo. Proyecto de grado bajo la modalidad de investigación e innovación para por el título de Ingeniero(a) ambiental. Bogotá, Colombia.
- Rojas, L. (2020). Herramientas para la modelación hidrológica de series a resolución subdiaria bajo escenarios de cambio climático en páramos andinos, Cuenca de la Quebrada Calostros, Parque Natural Nacional Chingaza, Colombia. Trabajo de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Bogotá, Colombia.
- Ruíz Carrascal, C. (2018). Impacto potencial del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca de la Quebrada Sopetrana, Antioquia. Trabajo de grado para optar al título de. Envigado, Colombia.
- Sönke Kreft, D. E. (2017). *The Global Climate Risk Index 2017*.
- Suraj Mal, R. S. (2018). *Climate Change, Extreme Events and Disaster Risk Reduction*.
- UNESCO. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020 AGUA Y CAMBIO CLIMÁTICO. Colombella.
- Urrea, Viviana & Ochoa, Andres & Mesa, Oscar. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014.
- Vandana, K., Islam, A., Parth Sarthi, P., Sikka, A., y Kapil, H. (2019). Assessment of potential impact of climate change on streamflow: a case study of the Brahmani River basin, India. *Journal of Water and Climate Change* .

Villa, E. (2013). Impacto del cambio climático sobre la disponibilidad de agua y sus efectos sobre los usos de agua. Memoria para optar el título de Ingeniería Civil. Santiago de Chile, Chile.

WCRP. (22 de Septiembre de 2022). Coupled Model Intercomparison Project 5 (CMIP5). Obtenido de World Climate Research Programme: <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip5/>

WEF, W. E. (2020). The Global Risks 2020 Report.

Weart, Spencer (2011). «International Cooperation: Democracy and Policy Advice (1980s)». The Discovery of Global Warming. American Institute of Physics.

Willems P., Vrac M., (2011). Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. Journal of Hydrology, Volume 402, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.030>.

WWF Colombia. (2020). Bitá: un río excepcional. Obtenido de: <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=365361>

12. Anexos



Universidad[®]
Católica
de Manizales

VIGILADA MINEDUCACIÓN

*Obra de Iglesia
de la Congregación*



Hermanas de la Caridad
Dominicas de La Presentación
de la Santísima Virgen

Universidad Católica de Manizales
Carrera 23 # 60-63 Av. Santander / Manizales - Colombia
PBX (6) 8 93 30 50 - www.ucm.edu.co