

**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FALLO EN EL SUMINISTRO DE AGUA EN CUENCAS  
ANDINAS INFLUENCIADAS POR LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO  
CLIMÁTICO – CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO BALSILLAS**

**AUTORAS:**

**EYDY MICHELL ESPINOSA ROMERO  
PAULA CAROLINA SOLER ORTIZ**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C  
2019**

**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE FALLO EN EL SUMINISTRO DE AGUA EN CUENCAS  
ANDINAS INFLUENCIADAS POR LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y CAMBIO  
CLIMÁTICO – CASO DE ESTUDIO CUENCA DEL RÍO BALSILLAS**

**AUTORAS:**

**EYDY MICHELL ESPINOSA ROMERO  
PAULA CAROLINA SOLER ORTIZ**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental**

**Director  
DARWIN MENA RENTERÍA  
Ingeniero Ambiental y Sanitario  
MSc en Evaluación de Recursos Hídricos**

**Codirector  
MIGUEL ANGEL CAÑON RAMOS  
Ingeniero Ambiental  
MSc (c) Hidrosistemas**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C  
2019**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

Firma director trabajo de grado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darnos la oportunidad de culminar nuestra carrera, por realizar este proyecto y hacernos crecer a nivel personal y profesional.

A nuestros padres y hermanos, por su amor, apoyo, trabajo y sacrificio en todos estos años, para lograr alcanzar nuestro título profesional.

Agradecemos a nuestro director Darwin Mena Rentería por la confianza que depositó en nosotras para llevar a cabo el proyecto.

A nuestro codirector Miguel Ángel Cañón Ramos por haber compartido sus conocimientos y guiarnos a lo largo de la investigación.

Al Ingeniero Freddy Santiago Duarte Díaz por la ayuda y conocimientos brindados en la realización del proyecto.

Al Consultorio Estadístico de la Universidad Santo Tomas por su apoyo y su valiosa asesoría en el desarrollo de nuestro proyecto.

A Abel Solera docente de la Universidad Politécnica de Valencia por su asesoría en etapas fundamentales del proyecto.

A todas personas involucradas con el desarrollo de la investigación que con su colaboración y conocimiento aportaron y permitieron que este proyecto de investigación se culminara.

## CONTENIDO

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMEN .....                                                         | 9  |
| ABSTRACT .....                                                        | 10 |
| INTRODUCCIÓN .....                                                    | 11 |
| 1. OBJETIVOS .....                                                    | 12 |
| 1.1 Objetivo General .....                                            | 12 |
| 1.2 Objetivos Específicos .....                                       | 12 |
| 2. MARCO CONTEXTUAL .....                                             | 13 |
| 2.1 Planteamiento del problema .....                                  | 13 |
| 2.2 Justificación .....                                               | 13 |
| 2.3 Caso de estudio .....                                             | 14 |
| 2.3.1 Descripción general de la cuenca .....                          | 14 |
| 2.3.2 Climatología .....                                              | 17 |
| 3. MARCO TEÓRICO .....                                                | 26 |
| 3.1 Cambio climático .....                                            | 27 |
| 3.1.1 Escenarios de cambio climático .....                            | 28 |
| 3.1.2 Modelo de circulación general (GCM) .....                       | 29 |
| 3.1.3 Experimento Regional Coordinado de Reducción del Clima (CORDEX) |    |
| 30                                                                    |    |
| 3.1.4 Método de reducción de escala .....                             | 31 |
| 3.2 Modelación hidrológica .....                                      | 34 |
| 3.2.1 Hydro-BID .....                                                 | 34 |
| 3.2.2 Modelos SIMGES y SIMRISK .....                                  | 36 |
| 3.3 Modelo GARCH .....                                                | 37 |
| 4. METODOLOGÍA .....                                                  | 38 |
| 4.1 Fase preliminar .....                                             | 39 |
| 4.1.1 Obtención y tratamiento de los datos .....                      | 39 |
| 4.2 Fase de modelación .....                                          | 41 |
| 4.2.1 Calibración y validación de Hydro-BID .....                     | 41 |
| 4.2.2 Análisis de cambio climático .....                              | 41 |

|                                                                                                                                     |                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 4.2.3 Modelación bajo escenarios de cambio climático.....                                                                           | 44                               |
| 4.2.4 Generación de series sintéticas de caudales .....                                                                             | 44                               |
| 4.2.5 Modelación en SIMGES y SIMRISK .....                                                                                          | 45                               |
| 5. RESULTADOS.....                                                                                                                  | 50                               |
| 5.1 Fase de modelación .....                                                                                                        | 50                               |
| 5.1.1 Calibración y validación de HydroBID .....                                                                                    | 50                               |
| 5.1.2 Análisis de cambio climático .....                                                                                            | 53                               |
| 5.1.3 Modelación bajo escenarios de cambio climático.....                                                                           | 64                               |
| 5.1.4 Generación de serie sintética de caudal.....                                                                                  | 65                               |
| 5.1.5 Modelación en SIMGES y SIMRISK .....                                                                                          | 72                               |
| 5.2 Fase de resultados .....                                                                                                        | 76                               |
| 5.2.1 Formulación y evaluación de las medidas de mitigación para los<br>diferentes grados de riesgo de fallo .....                  | 76                               |
| 7. CONCLUSIONES .....                                                                                                               | 78                               |
| 8. RECOMENDACIONES .....                                                                                                            | 79                               |
| 10. ANEXOS .....                                                                                                                    | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO A. Mapa de estaciones para análisis climático ....                                                                            | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO B. Boxplot para precipitación .....                                                                                           | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO C. Boxplot para temperatura .....                                                                                             | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO D. Mapa clasificación climática Caldas – Lang....                                                                             | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO E. Gráficas de comparación datos históricos VS datos futuros del Cordex<br>MPI-ESM-MR a escala reducida de precipitación..... | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO F. Gráficas de comparación datos históricos VS datos futuros del GCM<br>MPI-ESM-MR a escala reducida de temperatura. ....     | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO G. Tabla de los puntos de demanda presentes en la cuenca.....                                                                 | ¡Error!<br>Marcador no definido. |
| ANEXO H. Demandas proyectadas .....                                                                                                 | ¡Error! Marcador no definido.    |
| ANEXO I. Series base y series sintéticas obtenidas por el modelo GARCH .....                                                        | ¡Error!<br>Marcador no definido. |
| ANEXO J. Déficit de demanda en hm3 bajo cada escenario de cambio climático<br>.....                                                 | ¡Error! Marcador no definido.    |

## TABLA DE GRAFICAS

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Gráfica 1. Comportamiento temporal de la precipitación .....                                         | 18        |
| Gráfica 2. Comportamiento temporal de la temperatura.....                                            | 21        |
| Gráfica 3.Distribución temporal de humedad relativa .....                                            | 24        |
| Gráfica 4.Distribución temporal de brillo solar.....                                                 | 25        |
| Gráfica 5.Curva de duración de caudales de la calibración del modelo .....                           | 51        |
| Gráfica 6. Datos observados de precipitación vs caudales observados y simulados. ....                | 51        |
| Gráfica 7. Curva de duración de caudales de la validación del modelo. Fuente: software HydroBID..... | 53        |
| Gráfica 8. Comportamiento mensual multianual GCM vs datos históricos de precipitación .....          | 54        |
| <i>Gráfica 9. Comportamiento mensual multianual GCM vs datos históricos de .....</i>                 | <i>55</i> |
| Gráfica 10.Precipitación promedio datos históricos VS series de escala reducida. ....                | 57        |
| Gráfica 11.Precipitación promedio datos históricos VS series de escala reducida. ....                | 61        |
| Gráfica 12. Caudales simulados del año 2014 al 2100 bajo escenarios de cambio climático.....         | 64        |
| Gráfica 13.Comportamiento de los residuales bajo cada RCP.....                                       | 66        |
| Gráfica 14.Funciones de autocorrelacion y autocorrelacion parcial.....                               | 68        |
| Gráfica 15. Probabilidad de fallo en el suministro – Asoguamal - RCP 2.6 .....                       | 74        |
| Gráfica 16. Probabilidad de fallo en el suministro - Asoguamal - RCP 4.5 .....                       | 74        |
| Gráfica 17. Probabilidad de fallo en el suministro - Asoguamal - RCP 8.5 .....                       | 75        |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Porcentaje área de los municipios presentes en la cuenca. .... | 15 |
| Tabla 2. Parámetros morfométricos de la cuenca. ....                    | 16 |
| Tabla 3. Clasificación climática Caldas-Lang. Pisos térmicos .....      | 26 |
| Tabla 4.Escenarios de cambio climático planteados por el IPCC. ....     | 29 |
| Tabla 5.Parámetros de calibración de HydroBID.....                      | 35 |
| Tabla 6.Métricas de desempeño para la calibración de HydroBID. ....     | 36 |
| Tabla 7. Criterios para el modelo SIMGES.....                           | 46 |
| Tabla 8. Módulos de consumo .....                                       | 47 |
| Tabla 9.Parámetros para la calibración del modelo. ....                 | 50 |
| Tabla 10.Métricas de desempeño de la calibración del modelo.....        | 51 |
| Tabla 11. Métricas de desempeño para la validación del modelo.....      | 53 |
| Tabla 12. Resultados criterios de comparación MPI-ESM-MR CORDEX.....    | 54 |

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 13. Resultados criterios de comparación MPI-ESM-MR.....                                     | 55 |
| Tabla 14. Variación de la precipitación bajo la reducción de escala.....                          | 57 |
| Tabla 15. Variación de la temperatura bajo la reducción de escala.....                            | 60 |
| Tabla 16. Porcentaje de variación y caudal promedio bajo escenarios de cambio climático.<br>..... | 65 |
| Tabla 17. Resultados obtenidos AIC .....                                                          | 69 |
| Tabla 18. Déficit máximo y mínimo para la cuenca del río Balsillas .....                          | 73 |
| Tabla 19. Porcentaje de suministro con riesgo de fallo .....                                      | 77 |

## **LISTA DE MAPAS**

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Mapa 1. Ubicación de la cuenca del río Balsillas.....                             | 15 |
| Mapa 2. Interpolación de precipitación escenario actual en el río Balsillas. .... | 20 |
| Mapa 3. Interpolación de temperatura escenario actual en el río Balsillas. ....   | 23 |
| Mapa 4. Delimitación de la cuenca en QGIS en la base de datos AHD.....            | 39 |
| Mapa 5. Interpolación de precipitación bajo escenarios de cambio climático. ....  | 59 |
| Mapa 6. Interpolación temperatura bajo escenarios de cambio climático.....        | 62 |

## **LISTA DE DIAGRAMAS**

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Diagrama 1. Esquema generalizado del proceso de simulación en HydroBID. ....                | 34 |
| Diagrama 2. Esquema metodológico .....                                                      | 38 |
| Diagrama 3. Determinación de días húmedos/fríos y días secos/cálidos .....                  | 43 |
| Diagrama 4. Diagrama de demandas de la cuenca del río Balsillas en el SSD AQUATOOL<br>..... | 49 |

## **LISTA DE IMAGENES**

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Imagen 1. Resultado test diferencia de medias RCP 2.6 .....       | 70 |
| Imagen 2. Resultado test diferencia de medias RCP 4.5 .....       | 70 |
| Imagen 3. Resultado test diferencia de medias RCP 8.5 .....       | 70 |
| Imagen 4. Resultados test diferencia de varianzas RCP 2.6 .....   | 71 |
| Imagen 5. Resultados test diferencia de varianzas RCP 4.5 .....   | 71 |
| Imagen 6. Resultados test diferencia de varianzas RCP 8.5 .....   | 71 |
| Imagen 7. Coeficiente de asimetría de las series proyectadas..... | 72 |

## **LISTA DE ECUACIONES**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Ecuación 1. Cálculo de $\mu$ .....                           | 33 |
| Ecuación 2. Método lineal para proyección de población ..... | 47 |

## RESUMEN

Este proyecto se realiza bajo el marco del proyecto *Evaluación del riesgo de fallo en el suministro de agua en cuencas andinas influenciadas por la variabilidad climática y cambio climático* desarrollado en conjunto con la Universidad Politécnica de Valencia y la Universidad de Cuenca de Ecuador; para el caso de estudio en Colombia en la cuenca del río Balsillas se evalúa el riesgo de fallo en el suministro de agua solamente bajo condiciones de cambio climático, mediante la implementación de modelos hidrológicos que sirven de soporte para la toma de decisiones con respecto a la satisfacción de las demandas consuntivas en tiempos de escasez. Esto se desarrolla a través de una metodología que utiliza herramientas de modelación hidrológica como el software HydroBID, y los modelos de gestión del recurso hídrico SIMGES y SIMRISK del sistema soporte de decisiones AQUATOOL. Se obtuvieron las series de caudales para un escenario actual, así como también proyecciones futuras bajo los escenarios de cambio climático para los RCP 2.6, 4.5 y 8.5 obtenidos del modelo climático GCM MPI-ESM-MR y del Experimento Regional Coordinado de Reducción del Clima (CORDEX) del MPI-ESM-MR mediante la reducción de escala por medio de un método estadístico basado en la teoría del caos, posterior a esto se obtuvieron las series sintéticas de caudal para la determinación de la probabilidad de fallo en el sistema de la cuenca por medio del modelo estadístico ARIMA-GARCH corregido por mediana. En el software SSD AQUATOOL se aplicaron los módulos de SIMGES y SIMRISK en donde se ingresaron las series sintéticas, junto con los datos de consumo en la zona, se identificó que bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático la cuenca presenta riesgo de fallo, por lo que se presenta déficit en el suministro del recurso hídrico, de modo que se implementan medidas de mitigación que permitan reducir el riesgo y así poder satisfacer en su totalidad las demanda de agua.

**Palabras clave:** Cambio climático, Hydro-BID, modelación hidrológica, cuenca del río Balsillas, reducción de escala.

## ABSTRACT

This work is developed within the framework of the project. The assessment of the risk of failure in water supply in basins and climatic influences and climate change in conjunction with the Polytechnic University of Valencia and the University of Cuenca of Ecuador, however for the case of the study of the river basin Balsillas in the department of Cundinamarca, Colombia, assesses the risk of failure in water supply only in the conditions of climate change, through the implementation of hydrological models that serve as support for decision making regarding the satisfaction of the demands consumptive in times of scarcity. This means that it is a tool that uses hydrological tools such as the HydroBID software, and the SIMGES and SIMRISK water resource management models of the AQUATOOL decision support system. Flow series were obtained for a current scenario, as well as future projections, climate changes for RCP 2.6, 4.5 and 8.5 for the climate model GCM MPI-ESM-MR and the Regional Coordination Experiment for Climate Reduction (CORDEX) ) of the MPI-ESM-MR by means of the reduction of the scale in the middle of a statistical method based on the chaos theory, posterior and the synthetic flow series will be obtained to determine the probability of failure in the system of the Middle basin of the ARIMA-GARCH statistical model corrected by median. The SIMGES and SIMRISK modules were applied in the AQUATOOL SSD software and where the synthetic series were entered, together with the consumption data in the area, the risk of failure function was identified in the conditions of climate change. It presents a deficit in the supply of water resources, the way that mitigation measures are implemented that reduces the risk and the power to satisfy their water demand.

**Key words:** Climate change, Hydro-BID, hydrological modeling, Balsillas river basin, downscaling.

## INTRODUCCIÓN

Las condiciones hidroclimáticas de escasez de agua tienden a afectar a los servicios hidrológicos que ofrecen las cuencas andinas causando severos impactos a los diferentes sectores hidrodependientes, estas condiciones se han convertido en un verdadero desafío para los tomadores de decisiones con respecto a la gestión de sistemas de recursos hídricos en épocas de sequías; la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH) es un concepto que pretende impulsar una adecuada planificación y manejo del recurso para garantizar la sostenibilidad y la conservación del mismo [1], de modo que se puedan establecer soluciones frente a los problemas relacionados con el recurso hídrico, así como también herramientas que faciliten la toma de decisiones haciendo que se reduzcan los riesgos frente a la disponibilidad de agua actual y futura. El abastecimiento de agua es esencial no solo para el consumo humano, sino también para el desarrollo de actividades económicas en todo el mundo, por lo que se hace esencial suplir las diferentes demandas a partir de la gestión integral del recurso hídrico (GIRH). Es importante resaltar que con el paso de los años el consumo de agua ha venido en aumento, al igual que el riesgo por desabastecimiento de agua, aproximadamente el 55% de la población mundial se enfrentaría a una crisis del recurso hídrico hacia el año 2050 [2].

Dicha crisis está relacionada con aspectos como los altos niveles de industrialización, el crecimiento demográfico y el cambio climático, por ello es importante que se tomen acciones frente a la conservación del recurso, ya que se vería afectado el desarrollo a nivel social, económico e industrial de las poblaciones [1]. Para Colombia la gestión del recurso hídrico es un tema prioritario, ya que en cierta porción de la población se presenta un índice de escasez alto, por lo que se deben tomar acciones para satisfacer las demandas y suplir las necesidades de la población [3]. Este proyecto pretende evaluar el riesgo de fallo en el suministro de agua mediante el uso de herramientas de modelación hidrológica, con el fin de dar soporte para la toma de decisiones frente a la satisfacción de demandas consuntivas en tiempos de escasez, teniendo en cuenta la influencia de la variabilidad climática y los escenarios de cambio climático.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el riesgo de fallo en el suministro de agua que incorpore predicción de sequías futuras, como soporte en la toma de decisiones con respecto a la gestión de sistemas de recursos hídricos en tiempos de escasez

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Estimar el régimen hidrológico futuro en las cuencas piloto, a partir la influencia de la variabilidad climática y de los escenarios de cambio climático de escala reducida.
- Desarrollar un modelo de asignación de agua para determinar la satisfacción de las demandas a corto, mediano y largo plazo, teniendo en cuenta el régimen hidrológico futuro.
- Evaluar el riesgo de fallo en el suministro de agua mediante modelos de escenarios probabilísticos, acuerdo a las asignaciones de agua.
- Plantear medidas de mitigación para diferentes grados de riesgo de fallo en el suministro.

## **2. MARCO CONTEXTUAL**

### **2.1 Planteamiento del problema**

Los eventos de sequía se producen en casi todas las zonas climáticas y se [4]caracterizan por una reducción de la precipitación durante un periodo de tiempo prolongado. Como ha sido mencionado por varios autores, es probable que los efectos del cambio climático, puedan aumentar la frecuencia de los episodios de sequía y el nivel de gravedad de sus impactos[5]. Este ha sido un tema de gran controversia a nivel mundial, sin embargo la comunidad científica lo ha establecido como una realidad a nivel global que conlleva a grandes efectos, por ejemplo en Colombia se ha evidenciado el ascenso del nivel del mar, reducción del rendimiento de cultivos, proliferación de nuevos vectores de enfermedades y acentuación en la incidencia de otros ya presentes, además una afectación directa sobre la oferta hídrica para los diferentes usos como doméstico, agrícola e hidroeléctrico, lo que genera grandes pérdidas económicas[6].

Por otro lado existen pruebas que los fenómenos macro climáticos traen consigo una fuerte variación del comportamiento "normal" del sistema en América del sur, el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur ENOS o ENSO por sus siglas en inglés, cuenta con dos fases que están asociadas a las anomalías hidrológicas, en general la fase cálida es producida por el fenómeno El Niño en donde se presentan periodos secos más fuertes y prolongados, por el contrario el fenómeno La Niña se caracteriza por la amplificación en precipitaciones y la presencia de caudales máximos, sin embargo, es importante resaltar que debido a la ubicación de ciertos puntos sobre el ecuador, el comportamiento de las fases puede diferir, lo que hace que no siempre El Niño represente periodos secos y La Niña periodos húmedos; en el trópico suramericano donde se ubica Colombia las anomalías hidrológicas corresponden al comportamiento de las dos fases del ENSO [7].

Según el estudio realizado por profesionales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, debido a los cambios en el clima, los diferentes sectores hidrodependientes como hidroeléctricas, sistemas de abastecimiento y los sectores agrícolas pueden sufrir un déficit en el suministro de agua, ya que se podría presentar una posible reducción de la oferta debido a que las cuencas andinas son bastante vulnerables y susceptibles a dichos cambios, además el crecimiento de la población generaría una mayor demanda al igual que el incremento en las actividades económicas, causando severos impactos a la población que se beneficia de estos sistemas hídricos [4].

Por lo anteriormente expuesto, estas condiciones se han convertido en un verdadero desafío para los tomadores de decisiones en cuencas andinas con respecto a la gestión de sistemas de recursos hídricos en épocas de sequías.

### **2.2 Justificación**

A pesar de que el agua es el recurso más abundante en la naturaleza, el agua dulce solo representa aproximadamente el 3% del agua en el planeta, pero solo el 1% se encuentra disponible para las actividades humanas. En las últimas décadas, el uso del agua ha aumentado debido al incremento en la población y mayor desarrollo de actividades

económicas, estas fuertes presiones sobre los recursos hídricos aunado a la disminución de la disponibilidad de dicho recursos, provocada por el cambio en los patrones del clima en el planeta, han generado la aparición de escasez de agua en muchas zonas[8].

Durante la explotación de los sistemas de recursos hídricos, pueden darse inevitablemente situaciones en las que no sea posible suministrar de forma satisfactoria los usos establecidos, es decir, que ocurra un fallo del sistema, esta situación puede minimizarse mediante una anticipación de la sequía, a partir de modelos que pueden ser desarrollados para el diseño, planificación y explotación de un sistema hídrico, minimizando los impactos negativos en las épocas de sequía convirtiéndose en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en cuanto al uso del recurso [9].

Los impactos del cambio climático generados sobre el recurso hídrico muestran una alta probabilidad de importantes reducciones sobre la oferta hídrica en el futuro, siendo estas reducciones muy variables según la ubicación geográfica, dada la alta heterogeneidad del territorio, como en el caso de la región andina; es importante mencionar que según el estudio diagnóstico realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) la cuenca del río Balsillas presenta un índice de escasez Alto en periodos secos y un índice de escasez Medio Alto para periodos húmedos, por lo cual en la cuenca se presenta déficit de agua[10].

Por ello es esencial analizar los posibles efectos sobre los sistemas de recursos hídricos debido a los cambios en el régimen climático y la incidencia de estos sobre la satisfacción de las demandas de los diferentes usuarios en la cuenca, por lo que se requiere estimar el riesgo de fallo en el suministro de agua para explorar alternativas de gestión del recurso hídrico en condiciones futuras mediante modelos hidrológicos y herramientas de simulación múltiple de escenarios estocásticos de gestión. Es importante aclarar en que en este contexto el riesgo se entiende como la probabilidad de estar en una situación de fallo, es decir no garantizar la demanda de agua necesaria para cada uno de los sectores hidrodependientes [11].

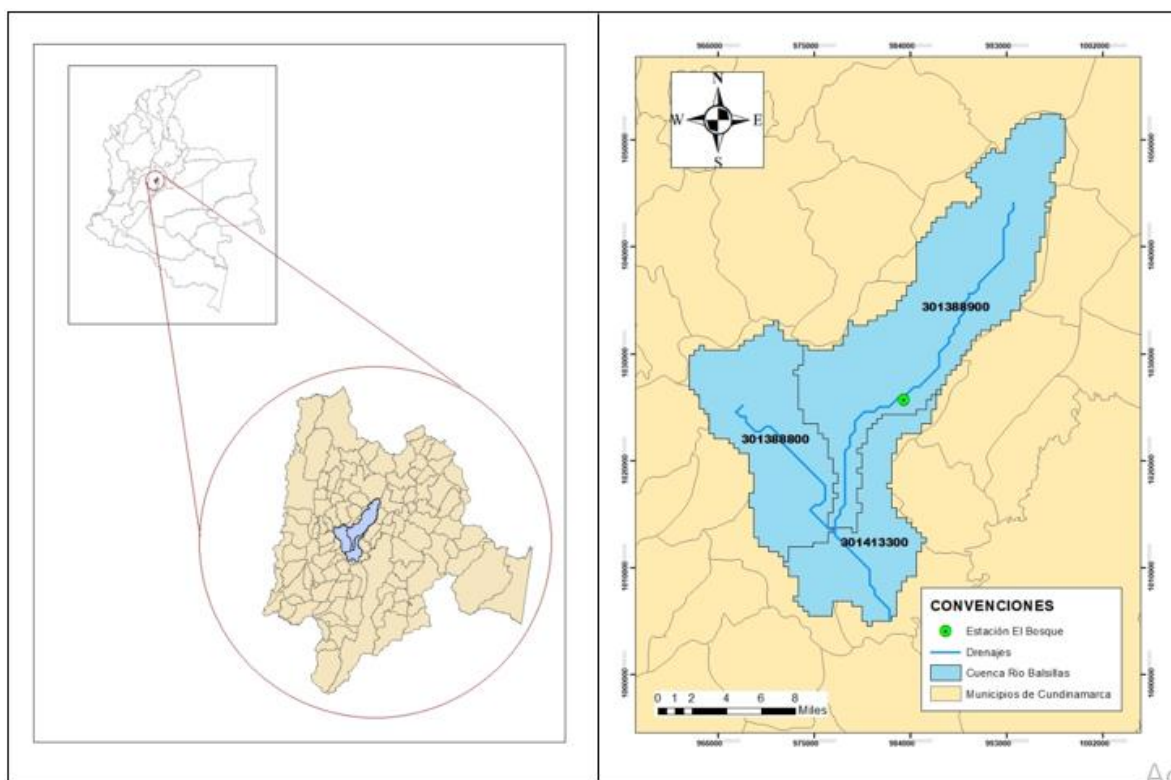
Por lo tanto los resultados obtenidos de este proyecto servirán de base para que las autoridades encargadas del manejo y administración del recurso hídrico, así como los usuarios cuenten con las herramientas técnico-científicas para afrontar los impactos que se puedan presentar en un futuro, con el fin de minimizar los déficits de suministros en las demandas de agua.

## **2.3 Caso de estudio**

### **2.3.1 Descripción general de la cuenca**

La cuenca del río Balsillas está localizada en el departamento de Cundinamarca al este de la sabana de Bogotá haciendo parte de la cuenca del río Bogotá hacia la parte central occidental (mapa 1); varios municipios hacen parte de la cuenca, en la tabla 1 se expone el porcentaje de área que cubre dentro de la cuenca, cabe resaltar que los municipios con mayor área influyente son Subachoque seguido de Facatativá. El río Balsillas está conformado principalmente por las corrientes de los ríos Bojacá y Subachoque que son sus tributarios principales[10].

Mapa 1. Ubicación de la cuenca del río Balsillas



Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Porcentaje área de los municipios presentes en la cuenca.

| MUNICIPIO  | Área presente en la cuenca (%) |
|------------|--------------------------------|
| Albán      | 0.24                           |
| Anolaima   | 0.01                           |
| Bojaca     | 8.72                           |
| El Rosal   | 13.6                           |
| Facatativá | 24.15                          |
| Funza      | 1.01                           |
| La Vega    | 0.03                           |
| Madrid     | 18.14                          |
| Mosquera   | 5.27                           |

| MUNICIPIO     | Área presente en la cuenca (%) |
|---------------|--------------------------------|
| Pacho         | 0.1                            |
| San Francisco | 0.24                           |
| Sasaima       | 0.12                           |
| Soacha        | 0.19                           |
| Subachoque    | 27.1                           |
| Tabio         | 0.21                           |
| Tenjo         | 0.05                           |
| Zipacón       | 0.71                           |
| Zipaquirá     | 0.1                            |

*Fuente: elaboración propia*

En la tabla 2 se presentan los parámetros morfométricos de la cuenca, mediante los cuales se identifica las principales características de la misma; la cuenca cuenta con un área total de 624 km<sup>2</sup> y el cauce principal posee una longitud de 68,1 Km; su cabecera se encuentra sobre la cota mayor a 3.700 m.s.n.m. y su cota más baja sobre los 2.500 m.s.n.m., siendo la altura media de 2730 m.s.n.m.

*Tabla 2. Parámetros morfométricos de la cuenca.*

| Parámetros morfométricos                 |        |
|------------------------------------------|--------|
| Área (km <sup>2</sup> )                  | 624    |
| Perímetro (km)                           | 173    |
| Longitud de cauce principal (km)         | 68     |
| Altura media (msnm)                      | 2730   |
| Pendiente media (m/Km)                   | 3,22   |
| Longitud de drenajes (Km)                | 1.29   |
| Velocidad (m/s)                          | 1,16   |
| Ancho de la cuenca (m)                   | 14.302 |
| Densidad de drenaje (m/Km <sup>2</sup> ) | 0.5    |

*Fuente: elaboración propia.*

En cuanto a la topografía del área se presentan relieves montañoso en la parte norte y oriental que cubren un 42,5 % del área total, en donde predominan los relieves ondulados fuertemente a fuertemente quebrados y escarpados; mientras que en las zonas del centro y sur se ubica la planicie aluvial que cubre el 43,2% del área total, el 14,2% restante del área son zonas con relieve ondulado a inclinado[10].

El paisaje en esta zona es plano con una condición climática fría y en su mayor parte seca; las principales coberturas vegetales presentes en el área son bosque primario- - alto andino,

rastrajo - matorral y vegetación de paramo; en cuanto a suelos predominan aquellos con texturas finas y que son susceptibles a la erosión hídrica cuando no hay vegetación, además se presenta sedimentación y relleno de humedales lo que genera riesgo de inundación por desborde y encharcamiento cuando los niveles de agua aumentan de manera significativa[10]. Los suelos son ricos en nutrientes, por tanto se presentan actividades agroindustriales en las que se trabaja principalmente con cultivos de arveja, uchuvas, fresas, tomate y pastos, dichas actividades son esenciales para la generación de empleo, ingresos y un crecimiento económico para los habitantes en la zona[12].

El uso primordial de agua en la cuenca es por actividades económicas relacionadas con la agricultura generando una demanda agropecuaria de  $3.3 \text{ (m}^3/\text{s)}$  aproximadamente, lo cual ha causado una disminución en la cantidad del recurso hídrico, otras demandas importantes son la ecológica con requerimiento de  $0.15 \text{ (m}^3/\text{s)}$ , la doméstica  $0.062 \text{ (m}^3/\text{s)}$  y por último la demanda más baja que corresponde a la industrial que requiere  $0.024 \text{ (m}^3/\text{s)}$  de caudal del río Balsillas[10].

### **2.3.2 Climatología**

Para llevar a cabo el estudio climatológico de la cuenca del río Balsillas, fue necesario evaluar 193 estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ubicadas dentro y fuera de la zona de estudio, entre las cuales se identificaron estaciones de tipo pluviométricas, pluviográficas y climatológicas ordinarias, con el fin de analizar el comportamiento de las variables de precipitación y temperatura; en el mapa del Anexo A, se identifica la ubicación de las mismas. Dicha evaluación se realizó debido a que las estaciones que se encontraban dentro de la cuenca no contaban con registros suficientes para realizar un análisis climatológico confiable.

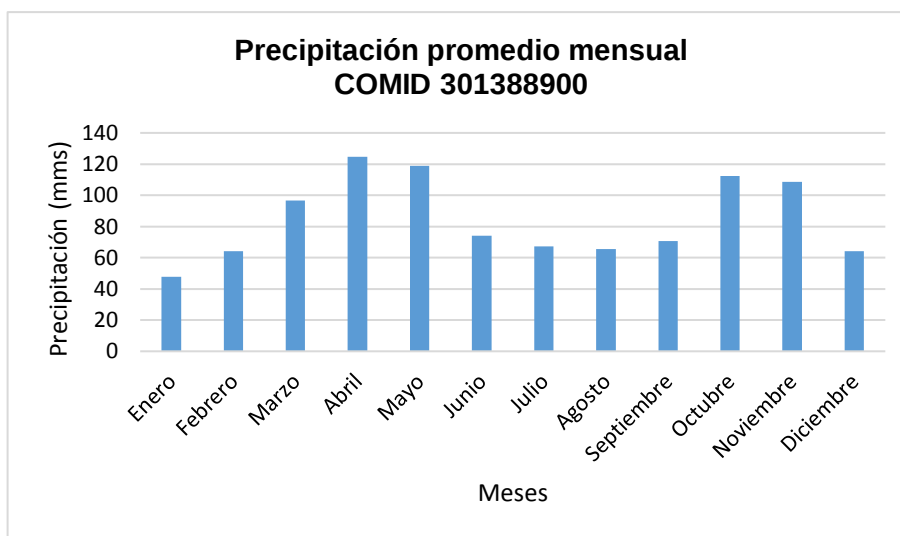
Una vez obtenida la información correspondiente a cada estación, se estructuró un código en el software Python para realizar una interpolación de Distancia Inversa Ponderada (IDW), en la cual se tiene en cuenta la autocorrelación espacial, de manera que los valores de las estaciones más cercanas tienen un mayor efecto y los valores de las estaciones lejanas tienen menos efecto, con el fin de generar las series que recopilen la información histórica con datos completos y la temporalidad mínima requerida para estudiar el comportamiento climático en la cuenca. Como resultado se obtuvieron tres series de precipitación y tres series de temperatura, cada una correspondiente a las subcuencas identificadas dentro del río Balsillas, nombradas con los COMID 301388900, 301388800 y 301413300, es importante mencionar que la información de estas series se asumirá como los datos históricos registrados de las estaciones de la cuenca a lo largo del desarrollo del proyecto.

Como se evidencia en las gráficas 1.a – 1.c la precipitación en la cuenca presenta un comportamiento bimodal, donde se evidencian picos principalmente entre los meses de marzo a mayo para el primer semestre del año y picos en los meses de octubre y noviembre para el segundo semestre. Los COMID 301388900 y 301388800 presentan los valores máximos de precipitación para el primer semestre del año con valores superiores a 4 mms y de aproximadamente 3,5 mms para el segundo semestre, respecto a la subcuenca con COMID 301413300 los valores para el primer semestre son superiores a los 3 mms y de 2,7 mms aproximadamente para el segundo semestre. Los valores mínimos de

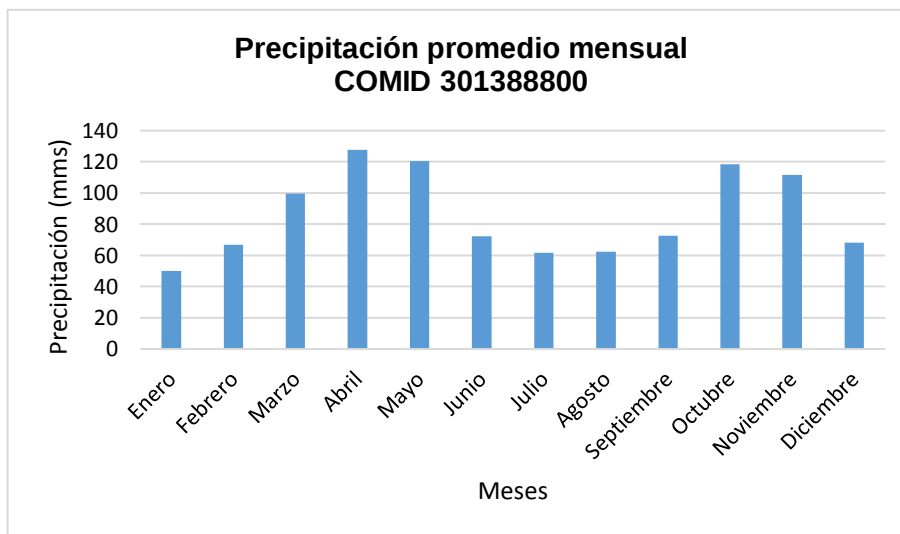
precipitación se presentan al inicio en los meses de enero y febrero, y a mitad del año entre los meses de junio a septiembre.

*Gráfica 1. Comportamiento temporal de la precipitación*

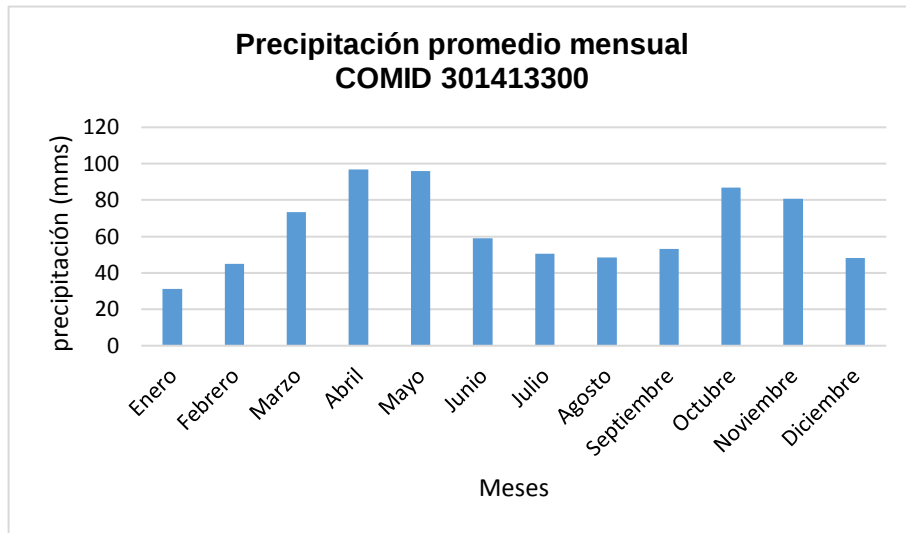
(a)



(b)

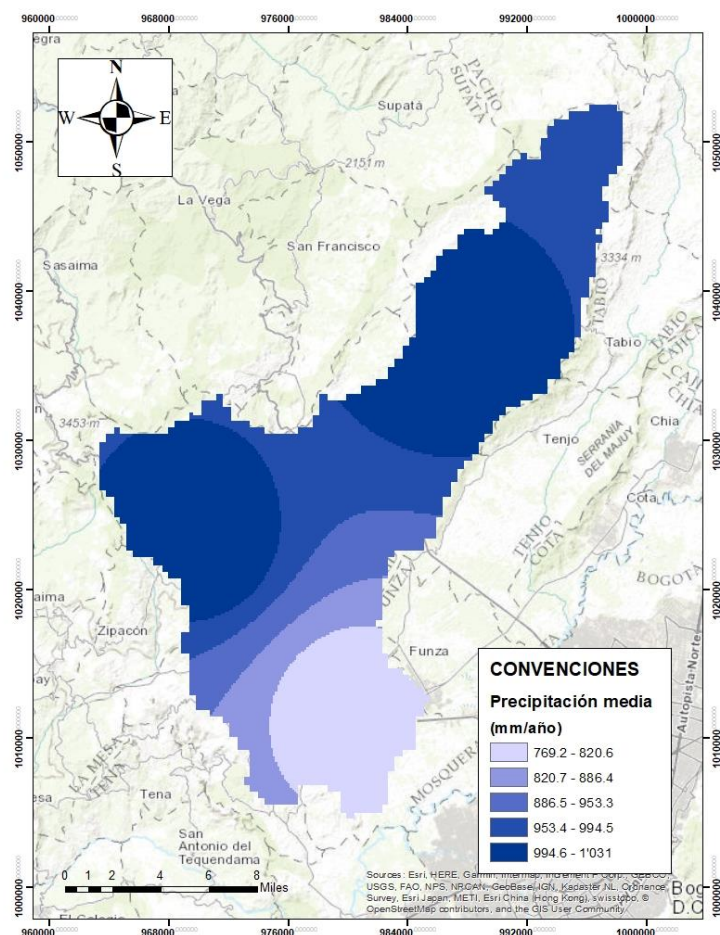


(c)



En cuanto a valores anuales como se observa en el mapa en la parte noroccidental de la cuenca se presentan los valores máximos que oscilan entre los 953,4 mm/año y los 1031 mm/año de manera paulatina los valores de precipitación van disminuyendo hacia la parte media y baja de la cuenca, donde se presentan valores entre los 769,2 mm/año y los 886,4 mm/año. Cabe mencionar que el comportamiento bimodal de esta variable se debe al paso de la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT) en la zona andina, que presenta un movimiento de sur a norte para generar el primer periodo húmedo del año y posteriormente realiza un desplazamiento descendente, de norte a sur, para originar el segundo periodo lluvioso en el año.

Mapa 2. Interpolación de precipitación escenario actual en el río Balsillas.

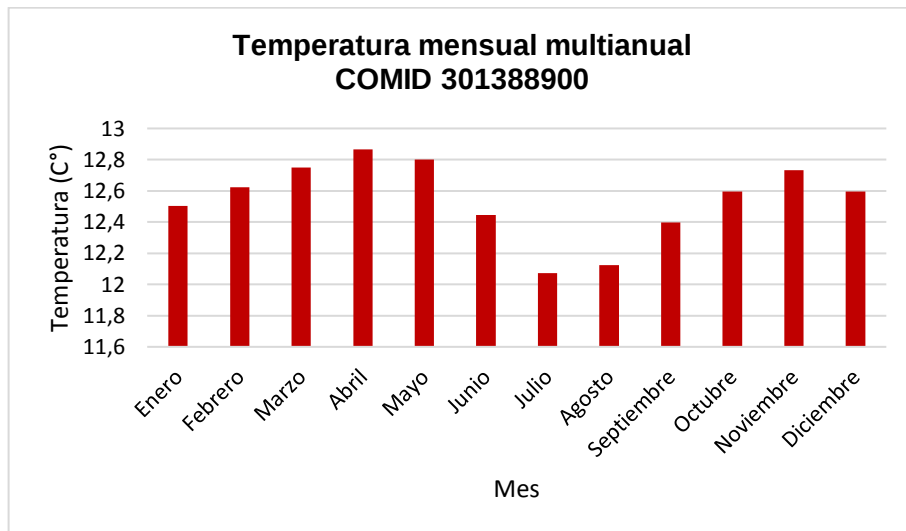


Fuente: elaboración propia

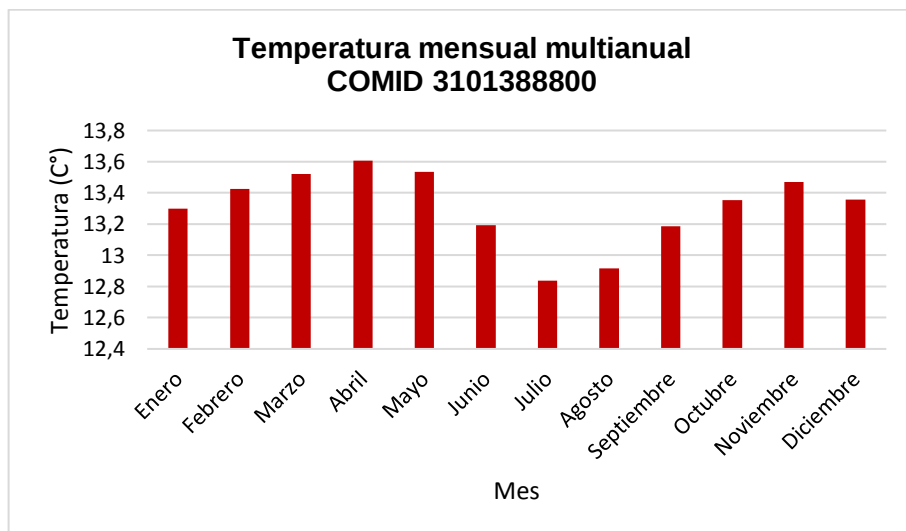
Al igual que la variable anterior, la temperatura en la cuenca presenta dos periodos en los que se presentan picos que alcanzan los 14°C, además la temperatura tiende a descender en el periodo comprendido entre los meses de junio a septiembre; en el primer semestre del año, los valores más altos se presentan en los meses de enero a junio, presentando un máximo en el mes de abril superior a los 12,8°C, en el segundo semestre hacia el mes de septiembre la temperatura tiende a elevarse nuevamente alcanzo un pico en el mes de noviembre superior a los 12,6°C, en la subcuenca con COMID 301388900; hacia la parte media donde se ubica la subcuenca con COMID 301388800 los picos nuevamente se presentan en los meses de abril para el primer semestre y en noviembre para el segundo, con temperaturas de 13,6°C y superior a 13,4°C respectivamente. Por ultimo hacia la parte baja de la cuenca, la temperatura presenta el valor máximo de temperatura con 14°C para el mes de abril, y el siguiente pico superior a los 13,8°C en el mes de noviembre en la subcuenca con COMID 301313300 (gráficas 2.a – 2.c).

Gráfica 2. Comportamiento temporal de la temperatura.

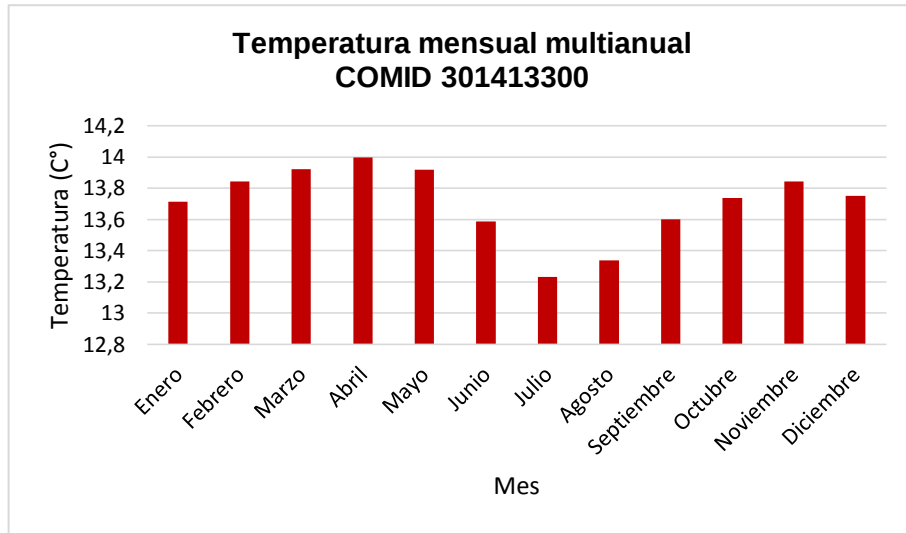
(a)



(b)

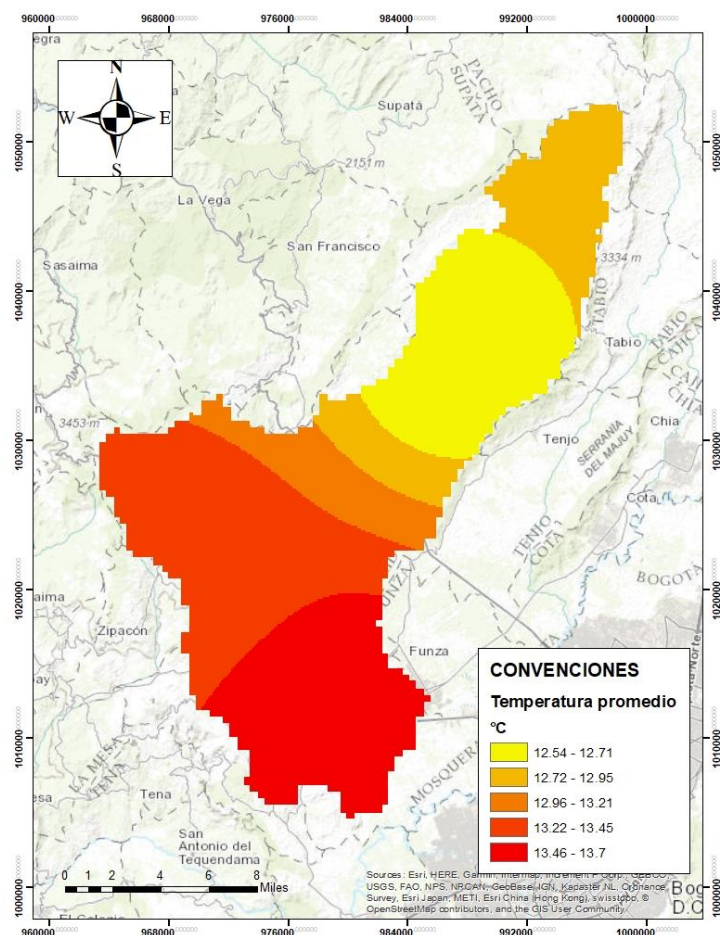


(c)



Cabe resaltar que el valor promedio es de 13°C, como se observa en el mapa 3 los valores máximos se presentan en el sur de la cuenca donde los registros presentan valores próximos a los 14°C, de manera gradual, la temperatura va disminuyendo hacia el costado noroccidental de la cuenca, es decir, la parte media y alta de la misma, donde se presentan valores que oscilan entre 12.96°C a 13.45°C y 12.54°C a 12.95°C respectivamente.

Mapa 3. Interpolación de temperatura escenario actual en el río Balsillas.

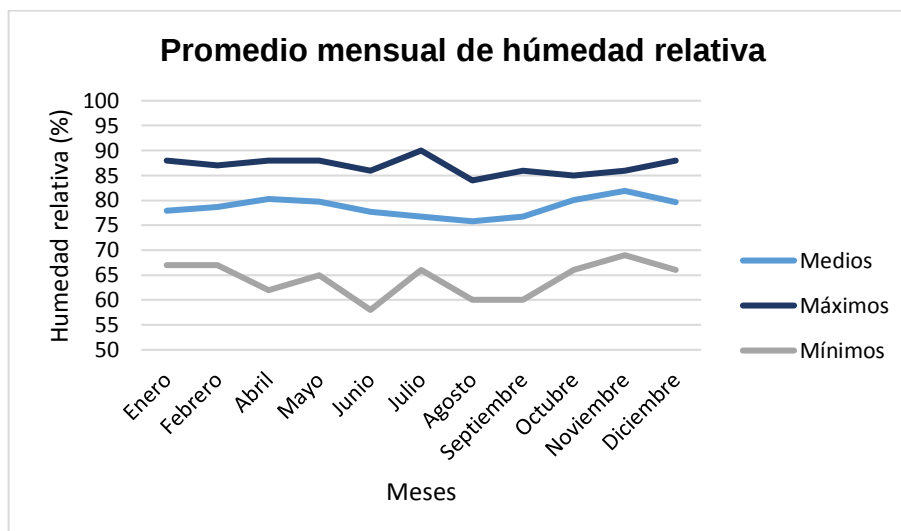


Fuente: elaboración propia

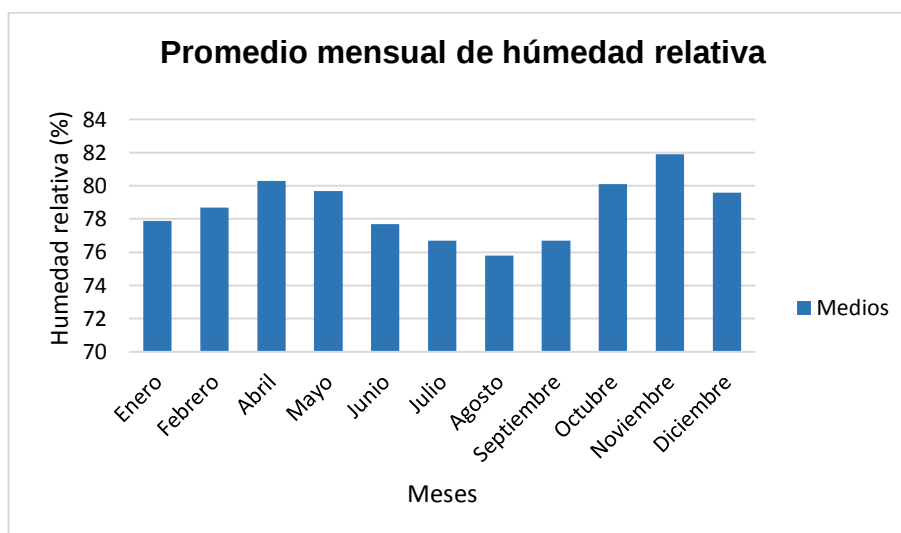
Respecto a la humedad relativa, esta presenta un comportamiento inverso al de la temperatura y es directamente proporcional a la precipitación, en la gráfica 3.a se pueden observar los promedios mensuales de valores máximos, medios y mínimos que se presentan en la zona de estudio, los porcentajes de humedad oscilan entre el 60% siendo el valor mínimo y el 90% el dato de humedad máximo. La humedad relativa media mensual presenta un comportamiento de tipo bimodal, esto se puede evidenciar en la gráfica 3.b en donde se puede identificar que para los meses de abril y noviembre se presenta la mayor humedad con porcentajes de 80% y 82% respectivamente, los valores más bajos se presentan en los meses de julio, agosto y septiembre, en donde el mes de agosto presenta el mínimo correspondiente a un 76%, por último el porcentaje promedio anual de humedad es de 78.7%.

Gráfica 3. Distribución temporal de humedad relativa

(a)



(b)



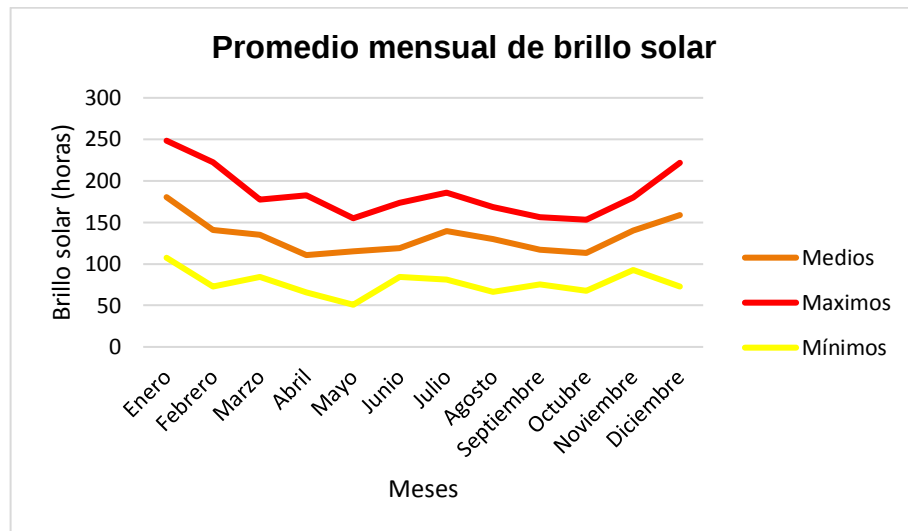
Fuente: elaboración propia

En relación al brillo solar, se presenta un máximo de 250 horas y un mínimo aproximado de 50 horas (gráfica 4.a), esta variable presenta un comportamiento de régimen bimodal (gráfica 4.b), en donde los meses con mayor brillo son enero y diciembre con 180 y 160 horas de brillo solar respectivamente; la variable de brillo solar es inversamente proporcional a las variables de nubosidad y la precipitación, ya que si se presenta un aumento en estas dos últimas, las horas de brillo disminuirán. Los valores menores se presentan en los meses de abril y mayo para el primer semestre, y en septiembre y octubre para el segundo semestre del año, los mínimos están ubicados en el mes de abril y octubre

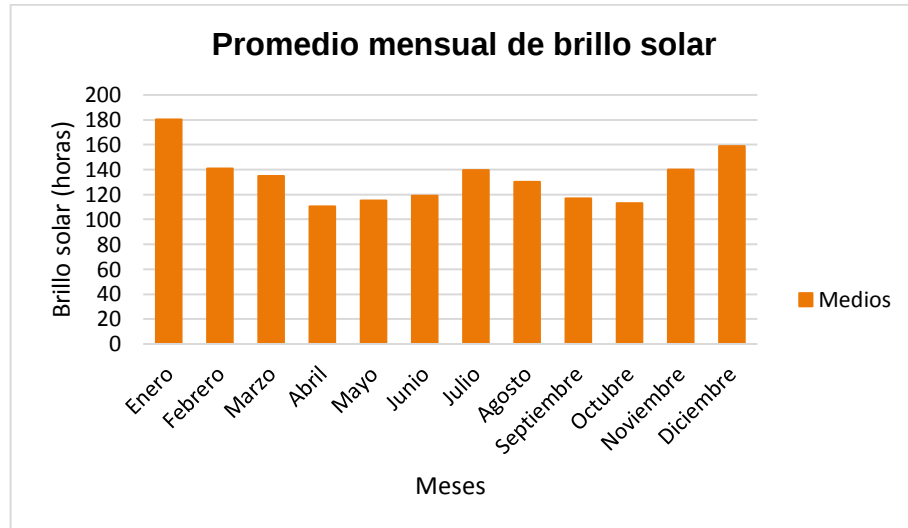
con un registro de 110 horas de brillo aproximadamente; el valor total anual de brillo oscila entre las 1600 horas, con un máximo de 1986 horas y un mínimo de 1204 horas.

*Gráfica 4. Distribución temporal de brillo solar*

(a)



(b)



*Fuente: elaboración propia.*

La fluctuación de las variables no solo obedece al paso de la ZCIT en la zona de estudio, sino también a eventos de variabilidad climática que influyen directamente sobre el comportamiento de la precipitación y la temperatura. Estos eventos se ligan con el fenómeno conocido como El Niño-Oscilacion del Sur (ENOS o ENSO por sus siglas en inglés) en donde la temperatura superficial del océano aumenta en ciertos periodos de tiempo e incide en la distribución de la precipitación en diferentes territorios. Para el caso

de la cuenca del río Balsillas, se implementó el software SPSS en donde se ingresaron los registros históricos de precipitación y temperatura con el fin de diseñar diagramas de cajas y bigotes o boxplot que permitan identificar datos atípicos o muy atípicos, que permitan identificar la influencia del fenómeno ENOS en el comportamiento climatológico de la cuenca.

En el Anexo B se presentan los boxplot de precipitación, en los cuales se identificaron datos atípicos principalmente para los años 2010 y 2011 en cada subcuenca; teniendo como base la información publicada por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica o NOAA por sus siglas en inglés, entre 2010 y 2011, se presentó un fenómeno ENOS que correspondía a La Niña, lo que dio origen a los datos atípicos en la serie, por un aumento considerable en los registros de precipitaciones en la zona. Por otro lado, los boxplot de temperatura arrojaron datos atípicos en los años de 1989, 1995, 1996, 1998, 2005, 2010 y 2013; según datos de la NOAA, para todos estos años se presentó un evento ENSO; para 1989 y 2010, las condiciones climáticas indicaban un fenómeno La Niña; 1995, 1998 y 2010 se presentaron fenómenos El Niño, donde la temperatura tiende a elevarse; en los años restantes, hubo un periodo de estabilización, es decir, previo a un evento o posterior a este. Teniendo en cuenta lo anterior, se puede deducir que el fenómeno ENOS incide sobre el comportamiento de las variables climatológicas evaluadas en la zona de estudio, por lo que se pueden registrar valores extremos en algún periodo del año.

Para finalizar el análisis climatológico de la cuenca del río Balsillas se realizó una clasificación climatológica con base en el sistema Caldas Lang estipulado por el IDEAM (ver tabla 3), por medio de la cual se identificó que la cuenca se encuentra entre los 2001 a 3000 m de altura, no obstante como se mencionó anteriormente la temperatura promedio se encuentra sobre los 13°C por lo que se determinó que la zona de estudio en su mayoría corresponde a un clima frío, sin embargo hacia el costado noroccidental de la cuenca, la elevación es mayor, donde se alcanzan alturas de hasta 3700 msnm lo que corresponde a páramo bajo según la clasificación. En el anexo D se puede observar el mapa correspondiente a la clasificación climática bajo las condiciones identificadas.

*Tabla 3. Clasificación climática Caldas-Lang. Pisos térmicos*

| <b>Pisos termicos</b> | <b>Rango de altura</b> | <b>Temperatura (°C)</b> |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| Calido                | 0-1000                 | $T > 24$                |
| Templado              | 1001-2000              | $24 > T > 17.5$         |
| Frio                  | 2001-3000              | $17.5 > T > 12$         |
| Páramo Bajo           | 3001-3700              | $12 > T > 7$            |
| Páramo Alto           | 3701-4200              | $T < 7$                 |

*Fuente: [12]*

### **3. MARCO TEÓRICO**

### 3.1 Cambio climático

Según la Convención de Naciones Unidas el cambio climático se define como “un cambio en el clima, atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante periodos de tiempo comparables”. Dentro del Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo para 2016 la situación de escasez a nivel global se debe al cambio climático, ya que este intensifica los fenómenos meteorológicos extremos de manera que sean más severos y con más frecuencia [4]. Los científicos coinciden en que el cambio climático alterara las condiciones y características de los recursos hídricos, como deterioro en la calidad del agua, cambio en las precipitaciones, disponibilidad de agua, etc.

El cambio climático es un tema de gran importancia en Latinoamérica. Desde aproximadamente 1950 se han observado cambios en muchos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos. Algunos de estos cambios han sido asociados con influencias humanas, como por ejemplo la disminución de las temperaturas frías extremas, el aumento de las temperaturas cálidas extremas, la elevación de los niveles máximos del mar y el mayor número de precipitaciones o sequías, estos cambios generan gran impacto en los sistemas físicos como inundaciones o sequías en ríos o lagos, disminución o aumento del nivel del mar y en los sistemas biológicos en los que se presentan ecosistemas terrestres incendios forestales, disminución de la fauna y flora y en los ecosistemas marinos erosión costera y disminución de vida marina. Estos cambios han generado riesgos potenciales en la región de América del sur como, menor disponibilidad de agua y mayor número de inundaciones y deslizamientos de tierra, Menor producción y calidad de los alimentos, Menor producción y calidad de los alimentos[13].

La gravedad de los impactos derivados del cambio climático generan un riesgo que depende no solo de los peligros relacionados con el clima, sino también de la exposición, según el estudio realizado en el informe de síntesis del cambio climático 2014, en las zonas urbanas, las proyecciones indican que el cambio climático hará que aumenten los riesgos para las personas, los recursos, las economías y los ecosistemas, incluidos los riesgos derivados del estrés térmico, las tormentas y precipitaciones extremas, las inundaciones continentales y costeras, los deslizamientos de tierra, la contaminación del aire, las sequías, la escasez de agua, la elevación del nivel del mar y las mareas meteorológicas, en cuanto a las zonas rurales se enfrenten a grandes impactos en cuanto a la disponibilidad y abastecimiento de agua, la seguridad alimentaria, la infraestructura y los ingresos agrícolas, incluidos desplazamientos de las zonas de cultivos alimentarios y no alimentarios en todo el mundo[13].

En el caso de Colombia El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, IDEAM, evidencia histórica muestra un aumento significativo en las sequías y en las precipitaciones extremas en los últimos treinta años contribuidas a los efectos del cambio climático según la tercera comunicación nacional de cambio climático, el 100 por ciento de los municipios de Colombia tiene algún grado de riesgo por cambio climático y en 2040 el 25 por ciento estará en riesgo alto y muy alto de sufrir fuertes impactos ya que los

20 departamentos con mayor riesgo por cambio climático albergan el 57% de la población del país[14].

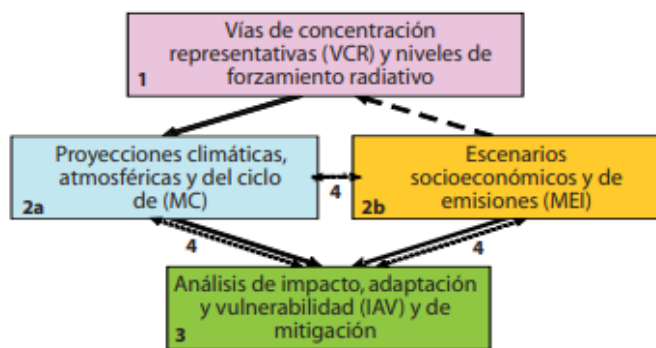
Es importante implementar acciones de mitigación que estén encaminadas a disminuir las atribuciones e impactos del cambio climático en todos los sectores productivos y de esta forma lograr la protección, conservación y restauración de los ecosistemas y la biodiversidad. Cabe resaltar que los recursos hídricos son difíciles de evaluar ya que se encuentran en constante cambio debido a la disponibilidad y uso del mismo, es por ello que a partir de modelos climáticos, presupuestos hídrico y experimentos numéricos se ha tratado de evidenciar la condición actual de los sistemas, en los cuales se demuestra que gran parte de la proporción mundial sufre de estrés hídrico y el aumento en las demandas se ve superado [4].

### 3.1.1 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático fueron establecidos por el IPCC como una herramienta que permite identificar las posibles condiciones futuras relacionadas con las variables en el clima, así como también reducir la incertidumbre respecto a la influencia de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en combinación con otras fuerzas, de modo que se puedan utilizar para la formulación de modelos que evalúan medidas de adaptación y mitigación y posibles impactos[15].

En el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental Sobre Cambio Climático (AR5) se estructuró una nueva metodología para el desarrollo de modelos basada en un sistema en paralelo (figura 1), por lo cual los nuevos escenarios están fundamentados en las Trayectorias de Concentración Representativas o RCP por sus siglas en inglés[16].

*Figura 1. Metodología de construcción de escenarios en paralelo.*



*Fuente:[16]*

Los RCP representan el forzamiento radiativo, es decir, la medida acumulativa expresada en vatios por metro cuadrado de emisiones antropogénicas de GEI generados de todas las fuentes, estos están basados en una combinación de modelos de evaluación integrados, modelos climáticos simples, modelos de química de la atmósfera y modelos del ciclo del carbono y fueron diseñados bajo ciertas condiciones que representan un cambio demográfico, social, económico, tecnológico y medioambiental que puede resultar siendo positivo o negativo (tabla 4) [17].

Tabla 4. Escenarios de cambio climático planteados por el IPCC.

| Escenario | Forzamiento radiativo (W/m <sup>2</sup> ) | CO <sub>2eq</sub> atmosférico (ppm) | Anomalía de temperatura | Trayectoria                         |
|-----------|-------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| RCP 8.5   | 8.5                                       | >1370                               | 4.9                     | 2100 en aumento                     |
| RCP 6.0   | 6.0                                       | 850                                 | 3                       | Estabilización después del 2100     |
| RCP 4.5   | 4.5                                       | 650                                 | 2.4                     | Estabilización después del 2100     |
| RCP 2.6   | 2.6                                       | 490                                 | 1.5                     | Picos antes de 2100 y luego declina |

Fuente: [17]

- RCP 8.5: este RCP se caracteriza por el aumento considerable en las emisiones de GEI y altos niveles de concentración, fue diseñado por el grupo de modelado MESSAGE y el Marco de Evaluación Integrado IIASA en el Instituto Internacional para el Análisis de Sistemas Aplicados (IIASA), Austria [18].
- RCP 6.0: este escenario propone una estabilización del forzamiento radiativo después del año 2100 por medio de la implementación de tecnologías y estrategias para reducir los GEI. Este RCP fue estructurado por el equipo de modelado AIM en el Instituto Nacional de Estudios Ambientales (NIES), Japón[19].
- RCP 4.5: este escenario propone una estabilización del forzamiento radiativo antes del año 2100 mediante la implementación de tecnologías y estrategias para la reducción de emisiones de GEI, fue diseñado por el equipo de modelado MiniCAM en el Instituto de Investigación Global de Cambio del Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste (JGCRI)[18].
- RCP 2.6: este RCP presenta los niveles más bajos de concentración de GEI, donde el nivel de forzamiento radiativo en un primer momento es aproximadamente de 3.1 W/m<sup>2</sup> a mediados de siglo, reduciéndose para el 2100 a 2.6 W/m<sup>2</sup>, lo que indica que la emisiones de GEI disminuyen considerablemente con el paso del tiempo. Este escenario fue planteado por el equipo de la Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos[20].

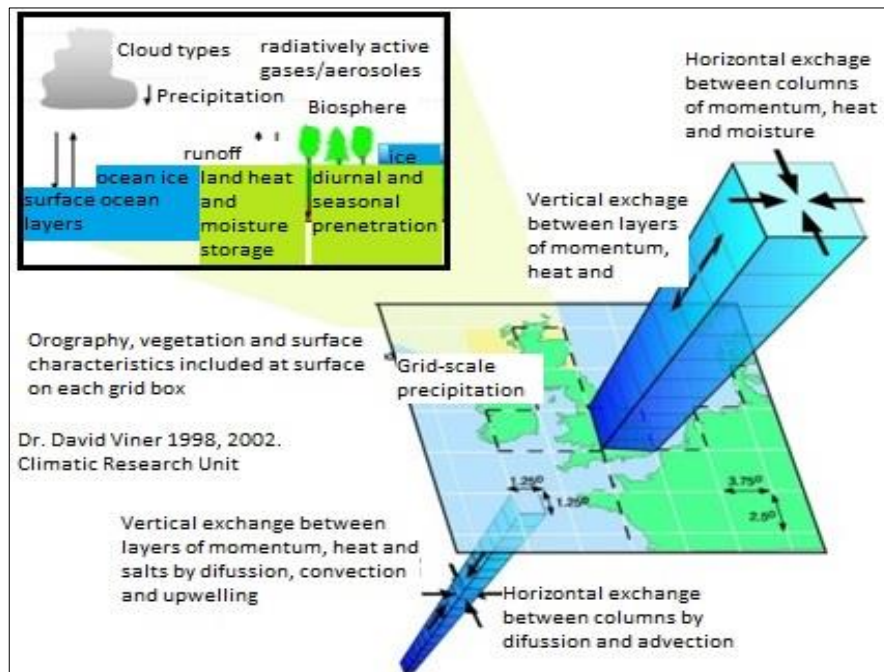
### 3.1.2 Modelo de circulación general (GCM)

Según el IPCC los modelos de circulación general son la herramienta más avanzada a nivel mundial para simular la respuesta del sistema climático global frente al aumento de los GEI[15]. Los GCM son modelos que representan procesos físicos de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie de la tierra, relacionando procesos químicos y biológicos por medio de modelos acoplados numéricamente, estos se basan en la dinámica del sistema del clima, el transporte de energía y el momentum, la física del sistema

climatológico y la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, factores como la evaporación, interacción océano y atmósfera, topografía y aspectos relacionados con la dinámica de la vegetación[13].

Para representar el clima global los GCM estructuran una cuadrícula tridimensional alrededor del mundo, la cual se caracteriza por tener una resolución horizontal que va entre los 250 km y 600 km, y entre 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y hasta 30 capas en océanos (figura 2). La resolución de los GCM suele ser bastante grande en relación a la escala necesaria para las evaluaciones de impacto, por lo cual se genera una fuente de incertidumbre en las simulaciones de escenarios futuros[17], sin embargo es preciso señalar que ciertos modelos se acoplan mejor en determinadas zonas, lo que hace esencial que en la aplicación de un GCM para la valoración de impactos se deba evaluar el modelo en una situación actual del clima local.

*Figura 2. Modelo conceptual de un Modelo Climático General (GCM).*



*Fuente: [15]*

### 3.1.3 Experimento Regional Coordinado de Reducción del Clima (CORDEX)

El cambio climático es una realidad a nivel global que trae graves consecuencias ambientales sociales y económicas por ende, es necesario tener información a escala regional y local para determinar la influencia que tiene este sobre las variables climatológicas y de esta forma lograr evaluar los impactos que se generan de modo que se logre una buena formulación de medidas de mitigación, adaptación y políticas a nivel nacional.

Hasta el momento la gran mayoría de información que existe se ha basado en el uso de modelos de circulación general océano- atmósfera (AOGCMs) que resulta ser una

herramienta muy valiosa para comprender los procesos que determinan la respuesta del clima frente a los procesos fuerza antropogénica tales como los aumentos de gases efecto invernadero (GEI), concentraciones atmosféricas y los cambios en el uso del suelo[15], [20], [21].

Aunque en la última década se han visto avances significativos y mejoras en los modelos debido a que hay una mejor representación del comportamiento de la atmósfera y de los procesos de la superficie de la tierra además de un avance tecnológico; el modelo AOGCMs aun presenta un desfase de cientos de kilómetros en la precisión de los resultados ya que tiene resoluciones más gruesas que impide capturar los efectos que ocurren a nivel local, esto dificulta que en estos modelos se logre una descripción precisa de acontecimientos extremos que son fundamentales para entender la variabilidad y el cambio climático a nivel regional y local por lo que existe una gran brecha entre el comportamiento del clima y la información proporcionada por este modelo[20].

Para evitar este problema de "regionalización" o "reducción de escala" se han desarrollado técnicas para refinar los resultados obtenidos en los modelos GCM en especial en el AOGCMs para reducir o eliminar la brecha que existe entre la información del clima y escala espacial. Una de estas técnicas es el downscaling dinámico (DD) que hace uso de modelos basados en variables físicas como alta resolución y variables resolución. En el downscaling estadístico (SD), las relaciones estadísticas son las que se desarrollan y predicen a gran escala, a escala regional y local. por medio de estas herramientas se diseñó el Experimento Regional Coordinado de Reducción del Clima (CORDEX), el cual tiene como objetivo proporcionar información accesible de reducción de escala y del clima para ser aplicada por la ciencia ya que hace uso máximo de sus dominios que cubren toda África, Australia, Sur América, Norte América y Europa, por lo tanto abarcar la mayor parte de las zonas del mundo; de esta forma logra solucionar los problemas de regionalización que se presentan con otros modelos brindando información más precisa a nivel local y regional para entender mejor el comportamiento del cambio climático y lograr formular mejores medidas[21], [22].

#### **3.1.4 Método de reducción de escala**

El método de reducción de escala o downscaling es una técnica que consiste en establecer una relación entre las variables simuladas por el GCM y los datos históricos registrados en estaciones meteorológicas en superficie[16]. Este método permite obtener información climática de alta resolución desde modelos climáticos globales, que tienen resolución de 150 a 300 km por 150 a 300 km, por lo cual es necesario implementar un método que permite obtener información a menor escala ya que muchos modelos de impacto requieren datos a escala de 50 km o menos[23].

Los métodos de reducción de escala se clasifican en dinámicos y estadísticos; los primeros se basan en un modelo climático regional (RCM), que toma información atmosférica de un GCM e incorpora topografía más compleja, contraste océano-superficie, heterogeneidades de superficie y descripción detallada de los procesos físicos para generar información climática a resolución espacial alrededor de 20 a 50 km. [22]. Los métodos de reducción de escala estadísticos establecen relaciones empíricas entre las variables a gran escala y las variables atmosféricas locales futuras generando proyecciones climáticas específicas más detalladas en comparación con el RCM.

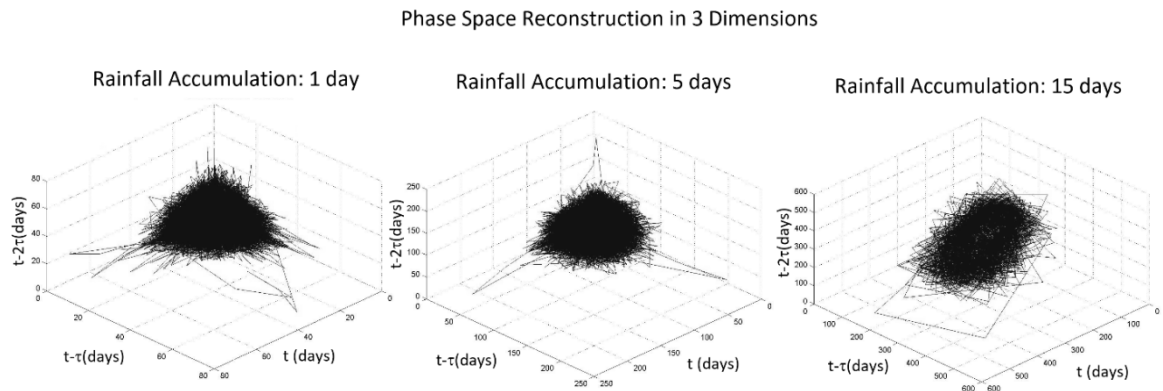
### 3.1.4.1 Método de reducción de escala basada en la teoría del Caos

Se entiende que un sistema caótico es aquel que posee una predictibilidad en un corto plazo, debido a que son extremadamente sensibles a las variaciones que se puedan generar en las condiciones iniciales; el método de reducción de escala basado en la teoría del caos tiene como objetivo evaluar la presencia de caos determinístico para diferentes periodos de acumulación.

Un sistema predictivo caótico se estructura con base en los resultados del tiempo de retardo, la dimensión de embebimiento y los exponentes de Lyapunov encontrados para los sistemas en el intervalo de acumulación de precipitación óptimo de cada sistema dinámico. El modelo predictivo se basa en la sincronización entre las estaciones climáticas y el modelo climático global, dadas por el parámetro  $\mu$  del método de los vecinos falsos mutuos más próximos. En primer lugar se lleva a cabo evaluación de la presencia del caos determinístico para obtener el menor periodo de acumulación en el cual se presenta caos; es necesario reconstruir el espacio de fase por medio del método del Time Delay para calcular los valores del tiempo de retardo ( $\tau$ ) y la dimensión de embebimiento ( $m$ ) necesarios para obtener los exponentes de Lyapunov [21], [24], [25].

*El espacio de fase es esencialmente un gráfico, cuyas coordenadas representan las variables necesarias para describir completamente el estado del sistema en cualquier momento, la trayectoria del diagrama de espacio de fase describe la evolución del sistema para un estado inicial. La "región de atracción" de estas trayectorias en el espacio de fase proporciona información cualitativa importante para determinar el grado de complejidad del sistema", como se muestra en la figura 8 donde el espacio de fase se observa en tres dimensiones para diferentes intervalos de acumulación de precipitación. El conjunto limitante que reúne trayectorias asintóticas cercanas al equilibrio se conoce como "atractor". Los atractores de sistemas caóticos deterministas pueden exhibir un tipo inusual de auto-similitud y estructuras presentes en todas sus escalas y, por lo tanto, es necesario encontrar una dimensión apropiada del plano de fase, de modo que la estructura del atractor permanezca invariante[25], [26].*

Gráfica 3. Comparación del espacio de fase de la serie de tiempo de precipitación



Fuente:[25]

Posteriormente se realiza la sincronización de los sistemas por medio del método del vecino falso más cercano que es una técnica estadística basada en el cálculo del parámetro  $\mu$ , que evalúa los vecindarios locales entre dos series de tiempo, de modo que  $\mu$  toma valores del orden de 1 si existe una sincronización general completa, de lo contrario  $\mu$  tiene que ser un número cuya magnitud sea comparable con el producto del tamaño del atractor dividido por el producto de la distancia entre los vecinos más cercanos en la serie de tiempo, la ecuación de  $\mu$  se muestra a continuación [25].

*Ecuación 1. Cálculo de  $\mu$*

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\|y_n - y_{n_{NND}}\| \|x_n - x_{n_{NNR}}\|}{\|x_{n_{NND}}\| \|y_n - y_{n_{NNR}}\|}$$

*Fuente:[25].*

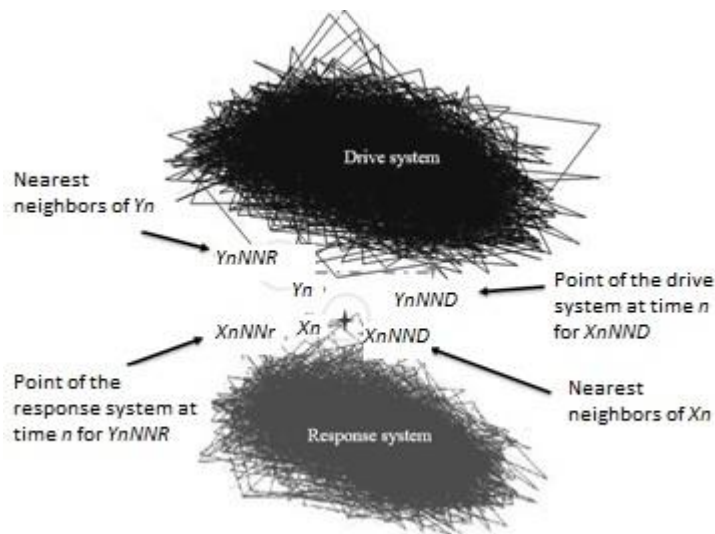
Donde

$x_n$  y  $y_n$ , son puntos de la unidad y el sistema de respuesta en un instante  $n$

$x_{n_{NND}}$  y  $y_{n_{NNR}}$  son los vecinos más cercanos de  $x_n$  y  $y_n$  en sus respectivos sistemas

$x_{n_{NNR}}$  y  $y_{n_{NND}}$  son puntos del sistema opuesto en el tiempo  $n$  para  $y_{n_{NNR}}$  y  $x_{n_{NND}}$

*Gráfica 4. Relación entre los puntos de los atractores*



Fuente:[25].

### 3.2 Modelación hidrológica

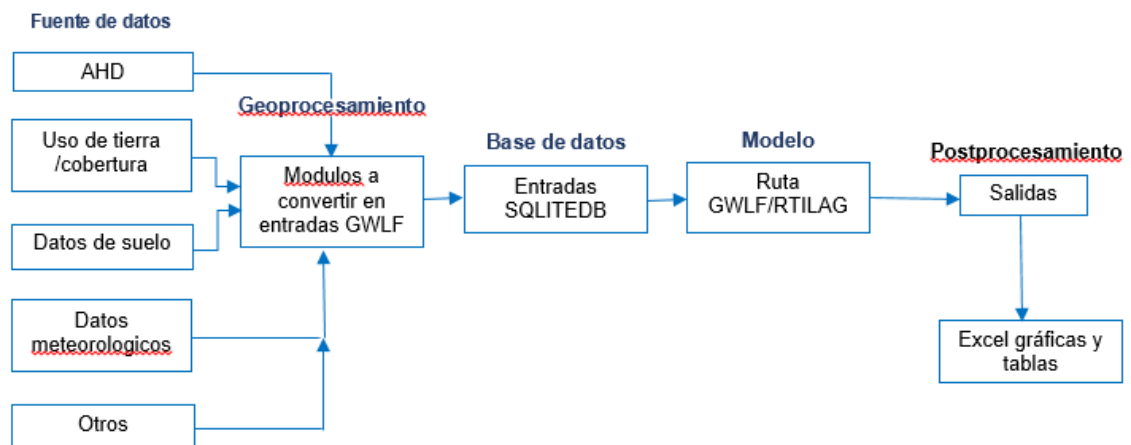
Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática, siendo esta última una expresión analítica que representa el sistema real. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente se representa es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico; partiendo de ello se deben tener conocimiento acerca de las entradas y salidas que se generen en el sistema para verificar si el modelo es representativo del prototipo[27].

#### 3.2.1 Hydro-BID

HydroBID es una herramienta de simulación que comprende un sistema integrado y cuantitativo que simula la gestión de los recursos hídricos en la región de Latinoamérica y el Caribe (LAC), bajo escenarios de cambio ya sea de clima, uso de suelo o demografía, permitiendo valorar la cantidad y la calidad del agua, las necesidades en cuanto a infraestructura, diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a los cambios generados[28].

Este sistema contiene una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) el cual incluye más de 230.000 cuencas delimitadas y cauces fluviales a lo largo de LAC, además cuenta con un sistema de navegación GIS para examinar los mismos, una interfaz de datos climáticos para la obtención de datos de precipitación y temperatura para la zona y el período de interés y un modelo de lluvia-escorrentía basado en la formulación de factor de carga de cauces generalizados (GWLF) (diagrama 1). El modelo GWLF permite generar un volumen de escorrentía para cada cuenca así como también simular a escalas pequeñas como a nivel de subcuencas[28].

Diagrama 1. Esquema generalizado del proceso de simulación en HydroBID.



Fuente: [28]

La AHD utiliza una base de datos vectorial en la que los atributos son representados mediante puntos, líneas y polígonos en vez de un raster; la base de datos permite atribuciones más realistas de los caudales, de las relaciones entre caudales y la estructura hidrográfica en comparación con los enfoques hidrográficos de un raster o celda. Además de ello el modelo implementa datos como el uso del suelo y cobertura vegetal que se obtienen a partir de la ADH, así como también los drenajes, hidrografía, delimitación de la zona y datos morfométricos de la cuenca[28].

### **3.2.1.1 Calibración de HydroBID**

En el software HydroBID la calibración se realiza de manera manual cambiando los valores de los parámetros expuestos en la tabla 5, de tal forma que los caudales simulados se ajusten a los caudales observados y el porcentaje de error del modelo disminuya; para lograr el mejor ajuste se tienen en cuenta la similitud a nivel grafico en las curvas de duración de caudales, así como también la obtención de los valores de las métricas dentro de los rangos aceptables (tabla 6).

*Tabla 5. Parámetros de calibración de HydroBID*

| <b>PARÁMETRO</b>                               | <b>DESCRIPCIÓN</b>                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NÚMERO DE CURVA (NC)                           | Este parámetro caracteriza el tipo de suelo presente en la cuenca y su hidrología, los valores oscilan entre 0 y 1, en donde 0 indica una infiltración completa y 1 indica que toda la precipitación se convierte en escorrentía |
| CONTENIDO DISPONIBLE DE AGUA EN EL SUELO (AWC) | Indica el monto de agua que puede ser almacenado por las plantas, teniendo repercusión directa en la infiltración hacia el agua subterránea. (Valor sugerido 10cm)                                                               |
| COEFICIENTE DE RECESIÓN (R)                    | Representa el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie y contribuye con los caudales superficiales después de una precipitación. (Valor sugerido 0.01)                                                           |
| COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (SEEPAGE)         | Indica las pérdidas por infiltración que se dan a partir del intercambio entre las aguas subterráneas cercanas a la superficie y los cuerpos de agua más profundos. (Valor sugerido 0.005)                                       |
| FACTOR ET DE LA ESTACION DE CULTIVO            | Representa el factor de evapotranspiración de las plantas en el periodo de cultivo. (Valor sugerido 1)                                                                                                                           |

| PARÁMETRO                              | DESCRIPCIÓN                                                                                                                             |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FACTOR ET PARA LA ESTACION DE LATENCIA | Representa el factor de evapotranspiración de las plantas en el periodo en el que no se encuentra cultivada la zona. (Valor sugerido 1) |
| PORCENTAJE DE LA COBERTURA IMPERMEABLE | Corresponde al porcentaje estimado de la porción de la cuenca que es impermeable. (Valor sugerido 2%)                                   |

*Fuente: [29]*

*Tabla 6. Métricas de desempeño para la calibración de HydroBID.*

|                                                 |                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Overall volume error, ove(%)</b>             | Más cercano a 0                                                                                                         |
| <b>Correlation, r(-)</b>                        | Cercano a 1                                                                                                             |
| <b>Modified Correlation, Rmod</b>               | Cercano a 1                                                                                                             |
| <b>Nash-Sutcliffe Efficiency, R<sup>2</sup></b> | <0.2 es insuficiente<br>0.2 - 0.4 es satisfactorio<br>0.4 – 0.6 es Bueno<br>0.6 – 0.8 es Muy bueno<br>>0.8 es Excelente |

*Fuente [28]*

### 3.2.2 Modelos SIMGES y SIMRISK

El sistema de soporte de decisiones AQUATOOL integra varios modelos para la simulación del recurso hídrico, entre estas herramientas el modelo SIMGES y SIMRISK; el primer

modelo es implementado para la simulación general de la gestión del sistema de recurso hídrico mediante la estipulación de elementos de regulación o almacenamiento tanto a nivel superficial o subterráneo, así como también elementos de captación, transporte, consumo y dispositivos de recarga artificial. El modelo SIMGES incluye la evolución de todas las variables a nivel mensual y anual, valores medios de simulación y garantías, que permiten determinar el desarrollo de las demandas, reglas de explotación, determinación de capacidades de embalse, conducciones y prioridades de usos del agua [30].

Por otro lado, el modelo SIMRISK ha sido desarrollado en base al modelo anterior, sin embargo este ha sido diseñado para la estimación del riesgo en la gestión a corto plazo, este permite al usuario establecer alternativas de anticipación frente a situaciones de escasez de agua, donde se determine la probabilidad de fallo en las demandas en periodos futuros en distintos niveles, el caudal mínimo y el efecto de la implementación de diferentes restricciones frente al fallo futuro en las demandas[31].

### **3.3 Modelo GARCH**

Dentro de la modelación hidrológica se implementan modelos de análisis de series de tiempo, estas suelen aplicarse para la obtención de predicciones de variables hidroclimatológicas. Generalmente para los estudios relacionados con hidrología, los modelos aplicados de series de tiempo (TSA) son de tipo lineal, en donde se asume que la varianza de los residuales, es decir, la diferencia entre dato y dato, es constante, sin embargo en este tipo de estudios una de las variables con mayor importancia es el caudal que por el contrario presenta un comportamiento no lineal y una dinámica compleja a nivel espacial y temporal. En aras de obtener mejores resultados en cuanto a la generación de datos por medio de la modelación de series de tiempo, se han venido implementando modelos de tipo no lineal para una mayor precisión en las predicciones[32].

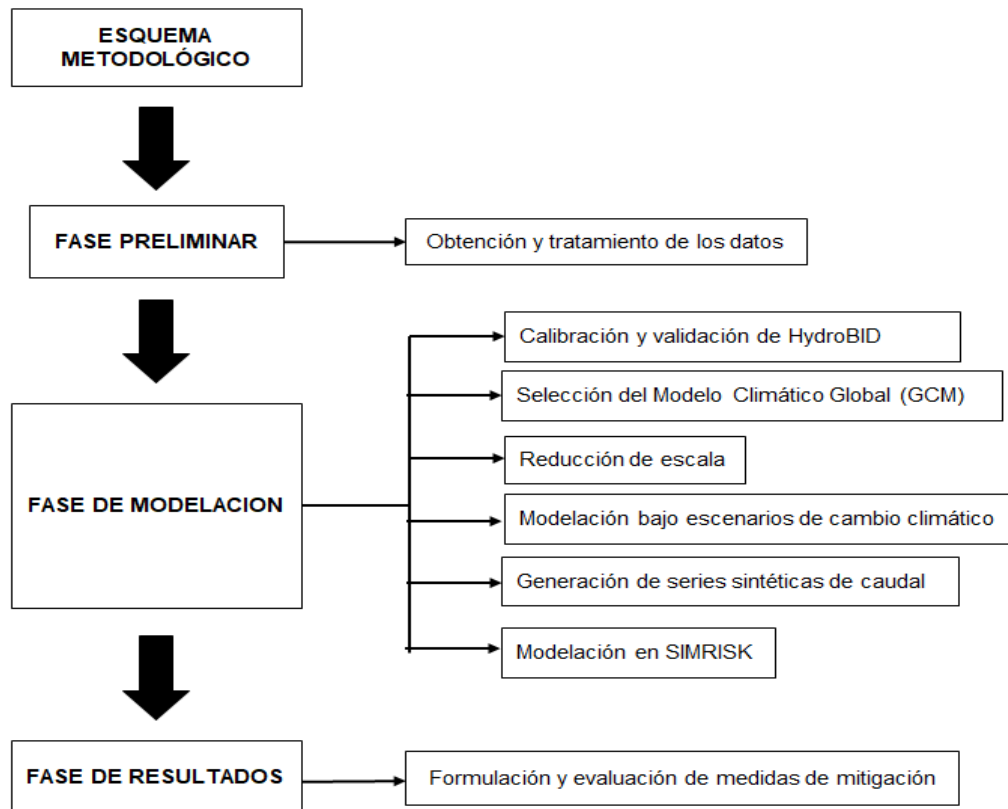
El modelo Generalizado Autorregresivo con Heterocedasticidad Condicionada (GARCH) proviene de avances realizados en los años ochenta sobre la modelación de la volatilidad; este proceso se introduce en el grupo de análisis que trata el exceso de curtosis y el agrupamiento de la volatilidad, principalmente implementado en las series temporales financieras y económicas[33]. Este modelo se desarrolló con base en el modelo ARCH, en el que se establece que dentro de una serie de datos la heterocedasticidad es finita, no obstante el modelo GARCH sigue las mismas condiciones a excepción de que éste plantea la heteroscedasticidad de los datos como infinita [34].

Actualmente ha crecido el interés por implementar dichos modelos para la generación primordialmente de series de tiempo de caudal, debido a que se tiene en cuenta la heterocedasticidad de los residuales de los datos. Dentro de los estudios realizados bajo las condiciones del modelo GARCH, se han obtenido mejores resultados en comparación con modelos que no lo implementan, ya que mejora la eficiencia y la calidad de los datos obtenidos manteniendo la media y la varianza de los mismos en relación con los datos observados[32], [33].

#### **4. METODOLOGÍA**

El proyecto se divide en tres fases principales: fase preliminar en la cual se obtienen los datos base para las siguientes etapas, la fase de modelación en la cual se realiza la modelación en el software HydroBID y el software SSD AQUATOOL, por último una fase de resultados en la cual se formulan las medidas de mitigación frente a las probabilidades de riesgo de fallo obtenidas a través de los modelos realizados anteriormente, en el diagrama 2 se evidencia la estructura de la metodología aplicada en el proyecto.

*Diagrama 2. Esquema metodológico*



*Fuente: elaboración propia.*

## 4.1 Fase preliminar

### 4.1.1 Obtención y tratamiento de los datos

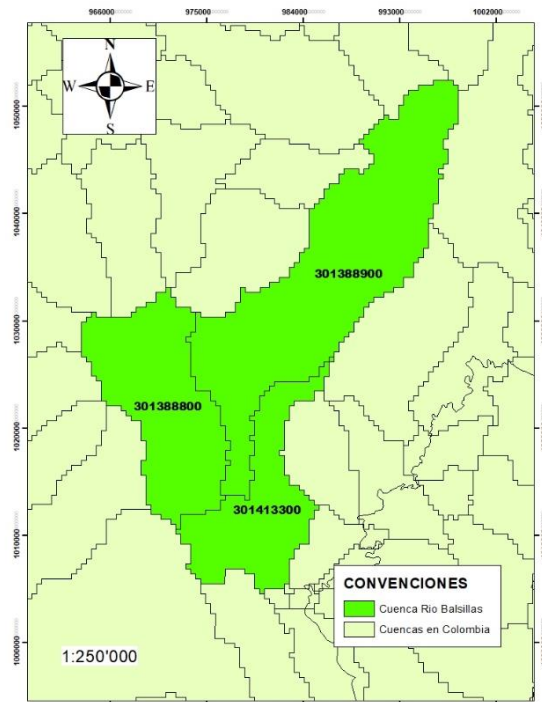
Para iniciar con la fase preliminar se realizó la delimitación de zona de estudio por medio del software QGIS, en el cual se implementaron las capas de la base de datos AHD (Base de Datos de Hidrología Analítica) y “catchment” (mapa 4.a) para la ubicación, así como también las subcuencas que la conforman con su respectivo COMID (Número identificador) como se puede observar en el mapa 4.b.

*Mapa 4. Delimitación de la cuenca en QGIS en la base de datos AHD.*

(a)



(b)



*Fuente: elaboración propia.*

Los datos necesarios para el desarrollo del proyecto principalmente son las series históricas de precipitación y temperatura a nivel diario junto con los datos de caudal diarios registrados en la cuenca; para ello es necesario en primera instancia realizar una interpolación IDW de los datos de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas ordinarias dentro y fuera de la cuenca; debido a que las estaciones ubicadas al interior no contaban con los datos de registro requeridos para cumplir con los 30 años necesarios para representar de manera acertada la climatología de la zona, además de que en su mayoría se encontraban inactivas.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, a partir del diseño de un código de interpolación en Python, se generaron tres series de precipitación y tres de temperatura para cada COMID, ya que eran necesarias para obtener información de calidad del comportamiento de las variables climatológicas en la zona de estudio, cabe resaltar que dichas series cuentan con registros desde el 01/01/1989 hasta el 31/12/2015 sin datos faltantes. En relación a los datos de caudal se tuvo en cuenta los registros proporcionados por la estación limnimétrica El Bosque con una temporalidad desde 01/01/1992 hasta 31/12/2014 para representar el caudal en la cuenca y poder realizar la respectiva calibración y validación del modelo.

## **4.2 Fase de modelación**

### **4.2.1 Calibración y validación de Hydro-BID**

En el software HydroBID la calibración se realiza de manera manual cambiando los valores de los parámetros de número de curva (NC), contenido de agua disponible en el suelo (AWC), coeficiente de recesión (R), coeficiente de permeabilidad (seepage), factor ET de la estación de cultivo, factor ET para la estación de latencia y porcentaje de la cobertura permeable, de tal forma que los caudales simulados se ajusten a los caudales observados; para lograr el mejor ajuste se tienen en cuenta la similitud a nivel gráfico en las curvas de duración de caudales, así como también la obtención de los valores de las métricas de error de volumen general, correlacion, correlacion modificada y eficiencia de Nash-Sutcliffe dentro de los rangos aceptables. Para obtener la mejor calibración se hacen varias realizaciones, es decir, se corre varias veces el modelo con diferentes valores de parámetros hasta obtener los mejores resultados.

La calibración en HydroBID se realiza a partir de la variación de los parámetros anteriormente mencionados, hasta obtener un resultado aceptable a nivel gráfico y estadístico; en el software se debe realizar la interpolación de las series de precipitación y temperatura generadas en el código Python para cada subcuenca en la zona de estudio e ingresar los datos de caudal de la estación limnimétrica El Bosque; la calibración se realiza para el periodo comprendido entre el 01/01/1992 al 31/12/2004. Respecto a la validación, una vez obtenida la calibración, se corre el modelo nuevamente, esta vez dentro de un periodo posterior entre el 01/01/2005 hasta 31/12/2009.

### **4.2.2 Análisis de cambio climático**

#### **4.2.2.1 Selección del Modelo de Circulación Global (GCM)**

Para el desarrollo del proyecto se deben establecer escenarios que permitan evaluar la incidencia del cambio climático sobre el cambio en la oferta de la cuenca a futuro, para ello se selecciona un modelo de circulación global (GCM) que se ajuste a los datos climáticos registrados en la zona para posteriormente aplicar los diferentes escenarios. La selección de dicho modelo se hace a partir de la estructuración de un código en el software Spyder, que permite comparar diferentes criterios, de manera que se logre establecer la similitud de los datos globales con las series de precipitación y temperatura.

Dentro del código de Spyder se tienen en cuenta las series de datos de precipitación y temperatura registrados en la cuenca, las coordenadas de los centroides de las subcuencas, además datos históricos del modelo climático global a evaluar de precipitación y temperatura que se obtuvieron en la página del Centro de Análisis de Datos Ambientales o por sus siglas en ingles CEDA; en primera instancia el código lee los datos ingresados, seguido de esto identifica la celda donde se ubica la cuenca, es decir, las coordenadas a nivel global donde se ubica la zona de estudio, luego se establecen los criterios a evaluar que en este caso son:

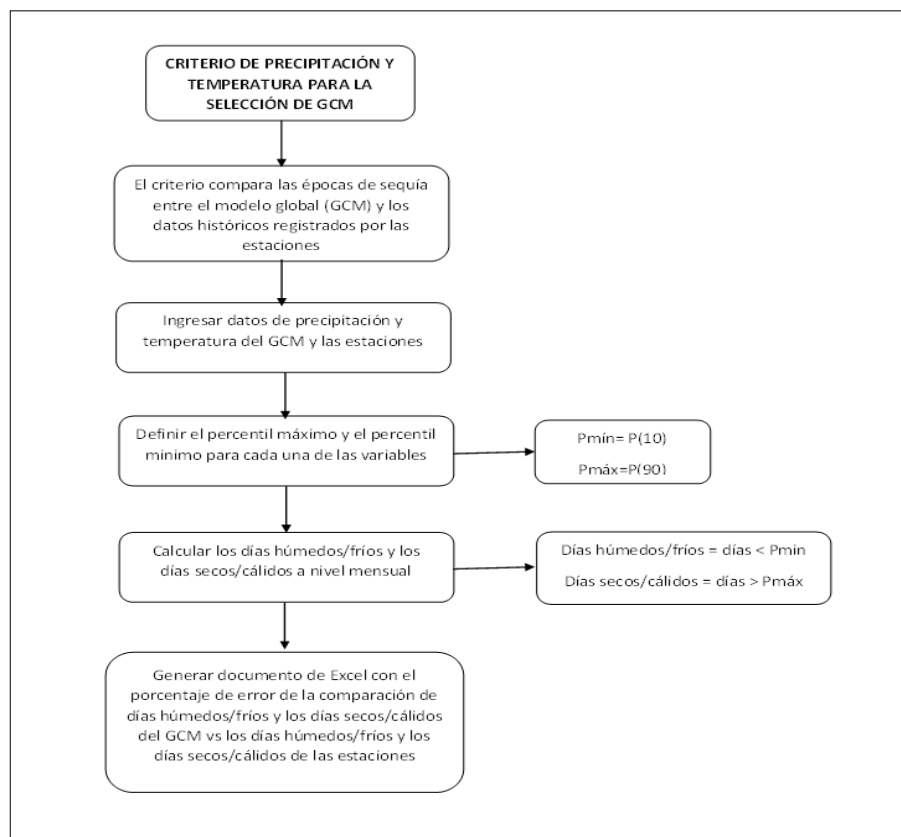
- ✓ Media

- ✓ Dato máximo
- ✓ Dato mínimo
- ✓ Desviación estándar
- ✓ Coeficiente de correlación

Para evaluar cada criterio se calcula el porcentaje de error que se obtiene al comparar los datos globales de los modelos y los CORDEX con los datos de las series de precipitación y temperatura históricos a partir de una función estructurada en el software Spyder. Además de aplicar criterios estadísticos para dicha comparación, se estipularon dos criterios físicos que determinan los días secos/cálidos y los días húmedos/fríos debido a la relevancia que estos tienen frente al comportamiento del caudal en la cuenca; para estructurar dichos parámetros se realizó un algoritmo que permite entender el proceso realizado y los resultados que se van a obtener (diagrama 3).

Para la selección del GCM se tienen en cuenta cuatro modelos globales y dos experimentos CORDEX, estos últimos caracterizados por ser de una menor escala, los modelos a evaluar fueron: CanESM2, CNMR-MR5, MPI-ESM, CCSM4, CORDEX CanESM2 y el CORDEX MPI-ESM; se genera un archivo Excel para realizar la comparación de los porcentajes de error de las variables de media, dato máximo, dato mínimo, desviación estándar, coeficiente de correlación, días húmedos/fríos y días cálidos/secos para cada modelo y experimento CORDEX. Una vez realizada la comparación de estos parámetros se selecciona el modelo que mejor se ajusta, además de esto, se evalúan las gráficas anuales y mensuales multianuales que comparan los datos del modelo vs los datos de las series de temperatura y precipitación históricas.

*Diagrama 3. Determinación de días húmedos/fríos y días secos/cálidos*



*Fuente: elaboración propia.*

#### **4.2.2.2 Reducción de escala basada en la teoría del Caos**

Para establecer los escenarios de cambio climático en la zona de estudio, se estructura un código con base al modelo estadístico de la teoría del Caos que tiene en cuenta la climatología global contenida en el GCM elegido y concatena los datos globales con los registros que se tienen en las series de la cuenca, es decir, compara y asemeja los datos globales con los registros de la zona, teniendo en cuenta las condiciones establecidas en cada una de las Trayectorias de Concentración Representativas por sus siglas en inglés RCP. A partir de ello se generan datos climatológicos futuros tanto de precipitación como de temperatura para evaluar el comportamiento del caudal bajo diferentes escenarios de cambio climático que repercuten en la oferta de la cuenca hasta el año 2100. Es importante realizar la reducción de escala, ya que por medio de esta se extrae información a escala local o regional de variables climáticas a partir de modelos de alta resolución que contienen variables atmosféricas de gran escala, lo que permite disminuir la limitación que existe en la calidad de la información a escalas reducidas y su precisión.

#### **4.2.3 Modelación bajo escenarios de cambio climático**

Para la modelación bajo los escenarios de cambio climático, se ingresan al software HydroBID las series climatológicas de precipitación y temperatura obtenidas por medio de la reducción de escala y se realiza nuevamente una interpolación de los datos climatológicos para cada escenario de cambio climático, en este caso para los RCP que estipula el GCM seleccionado, además de los datos de caudal de la cuenca. Una vez corrido el software se obtienen las series de caudales futuras para los periodos de 2014 a 2040, 2040 a 2070 y finalmente 2070 a 2100, los cuales corresponden a temporalidades establecidas en el Quinto Informe de Evaluación presentado por el Panel Intergubernamental de Expertos de Cambio Climático (IPCC) que obedecen a su vez al tiempo requerido para un análisis climatológico, al realizar esta modelación los datos simulados obtenidos incorporan las diferentes variaciones que se presentan en cada escenario, puesto que en cada uno se generan condiciones de incremento o disminución en cierto porcentaje para los valores futuros tanto de precipitación como de temperatura.

#### **4.2.4 Generación de series sintéticas de caudales**

Con base en los caudales modelados obtenidos en el software HydroBID, se genera una serie sintética de caudales proyectada al año 2100, con el fin de implementarla en los modelos SIMGES y SIMRISK del SSD AQUATOOL, esta serie representara la aportación principal de la cuenca, para lograr identificar los posibles déficits que se puedan presentar en el periodo comprendido entre 2014 a 2100. Para generar estos valores se analiza la volatilidad de los datos, de manera que se seleccionen modelos que permitan mantener los primeros cuatro momentos estadísticos: media, varianza, desviación estándar y coeficiente de asimetría de los registros obtenidos en HydroBID en la serie proyectada.

Se aplican dos modelos estadísticos que tienen en cuenta la alta volatilidad de los datos, debido a que la variable de caudal presenta un comportamiento no lineal y una dinámica compleja a nivel espacial y temporal. El primer modelo aplicado es el modelo ARIMA-GARCH (Modelo ARCH Generalizado) en el cual se condiciona la volatilidad de los datos, es decir, la varianza. El segundo modelo que se aplicó es el ARIMA-GARCH corregido por mediana, este se deriva del anterior, sin embargo, predice la serie sintética por el ajuste de medianas de los datos, teniendo en cuenta la varianza; además a manera de diagnóstico se realiza una validación de supuestos estadísticos con el fin de definir si dichos modelos son aceptables para obtener una buena predicción.

Dentro de los supuestos estadísticos evaluados están: la prueba de raíz unitaria, autocorrelación en los errores, heterocedasticidad y normalidad, donde se determina si los datos son o no estacionarios, que los errores en un tiempo  $i$  estén relacionados con los tiempos  $i-k$  es decir que el error actual esté relacionado con el error proyectado, existencia de una varianza no constante y que los errores del modelo sigan una distribución normal mediante el estudio de la asimetría y curtosis, respectivamente.

Teniendo en cuenta lo anterior en el Software R studio se estructura el código para aplicar dichos modelos sobre los datos de caudal; los datos ingresados son los valores correspondientes a los caudales diarios generados bajo las condiciones climáticas de los RCP en el software HydroBID desde el año 2015 a 2034, de manera que la serie que se generará se proyecte desde el año 2035 a 2100 y mantenga los cuatro primeros momentos estadísticos de la serie de caudales base utilizados para la predicción. Después de

generadas las series es importante evaluar cuál de los modelos se ajusta de mejor manera al comportamiento del caudal en la cuenca; para ello en primera instancia se implementan funciones de autocorrelación (ACF) y de autocorrelación parcial (PACF), estas son medidas que permiten asociar los valores actuales con la serie de datos pasada e indican los valores útiles para predecir los valores futuros y determinar el orden de los procesos, identificando así el comportamiento de las series de caudales proyectados.

Por otro lado se implementa el criterio de información de Akaike (AIC), que corresponde a una medida de la bondad de ajuste de un modelo estadístico, el cual proporciona una comparación entre ambos modelos establecidos, dado que describe la relación entre la exactitud y la complejidad de los mismos. Los modelos pueden ser clasificados de acuerdo a su AIC, donde el modelo que presenta el mínimo AIC es el mejor.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas anteriores, se procede a la selección del modelo y la serie generada por este, seguido de esto se establece la diferencia de medidas estadísticas, en donde se realiza una comparación de medias, varianzas y coeficientes de asimetría, entre la serie de datos de caudal base y la serie proyectada, para luego ingresarla en el SSD AQUATOOL bajo los modelos SIMGES y SIMRISK, con el objetivo de determinar el posible riesgo de fallo en el suministro de agua en la cuenca.

#### **4.2.5 Modelación en SIMGES y SIMRISK**

El sistema de soporte de decisiones AQUATOOL (SSD Aquatool) está integrado por varios modelos, entre ellos SIMGES y SIMRISK; el primero es implementado para la simulación de la gestión del sistema de recursos hídricos, y el segundo valora las probabilidades de fallo en el sistema. Para el caso de estudio de la cuenca del río Balsillas, se diseñó la estructura de la topología en cuanto a puntos de demanda, conducciones, aportaciones y tomas, como se puede observar en el diagrama 4; se realizó la simulación de la gestión de la cuenca por medio de SIMGES, se ingresaron los datos de aportaciones que corresponden a las series sintéticas de caudales generadas por medio del modelo estadístico ARIMA- GARCH corregido por mediana y datos de consumo. El modelo se corrió para los tres escenarios de cambio climático RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, del año 2035 a 2060 basándose en el periodo de planificación del recurso hídrico que es de 30 años, con el fin de estimar los déficits y número estimado de fallos en el sistema.

Teniendo en cuenta la estructura mencionada anteriormente se procede a ingresar los datos para la modelación en SIMGES; el sistema inicia con una aportación que corresponde a la series sintéticas de caudales obtenidas bajo el modelo estadístico, a partir de ésta se desprenden los nodos en los cuales se presentan puntos de captación y/o demanda a lo largo de la cuenca. Para determinar el caudal captado, se realizó la solicitud de concesiones presentes en el río Balsillas ante la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), los datos obtenidos se presentan en el anexo C, donde se exponen los 35 puntos de demanda identificados para uso doméstico, agrícola, pecuario e industrial, las cuales se proyectaron hasta el año 2100.

Dentro de los criterios para correr el modelo se establecieron las condiciones estipuladas en la tabla 7.

Tabla 7. Criterios para el modelo SIMGES.

|                  |                                    |                            |     |
|------------------|------------------------------------|----------------------------|-----|
| <b>GARANTIAS</b> | Garantía mensual                   | Fallo mensual (%DM)        | 1   |
|                  | Garantía anual                     | Fallo mensual (%DM)        | 15  |
|                  |                                    | Fallo anual (%DA)          | 30  |
| <b>CRITERIOS</b> | Criterio tipo UTAH DWR             | Fallo anual (%DA)          | 50  |
|                  |                                    | Fallo 10 años(%DA)         | 100 |
|                  |                                    | Fallo 2 años (%DA)         | 75  |
|                  | Criterio IPH.2008 demandas urbanas | Maximo fallo mensual (%)   | 10  |
|                  |                                    | Maximo fallo a 10 años (%) | 8   |

*Fuente: elaboración propia*

Para el caso de las tomas, los criterios tenidos en cuenta fueron el nivel de prioridad el cual se asumió como 1, coeficiente de consumo de 1 y la dotación anual, el caudal ingresado en las tomas corresponde al caudal de demanda para cada punto.

Bajo estas condiciones, los parámetros ingresados al modelo fueron el año de inicio de la simulación y el número de años de simulación, como se había mencionado anteriormente se fundamentó la modelación en el periodo de planificación del recurso hídrico que corresponde a 30 años, por lo que el número de años de simulación es de 30 iniciando en el año 2035 para cada RCP, posteriormente se identifica si hay existencia de fallo en la cuenca bajo las condiciones establecidas.

Para realizar la proyección de las demandas agrícola, pecuaria e industrial se tiene en cuenta el porcentaje promedio de los últimos cinco años del Producto Interno Bruto (PIB) correspondiente a cada uno de estos sectores; por otro lado la proyección de la demanda doméstica de la cuenca río Balsillas se proyecta teniendo en cuenta el censo de población para los municipios que cuentan con mayor área dentro de la zona de estudio teniendo en cuenta la ubicación de los puntos de demanda, a partir de ello, se realiza la proyección de la población por medio del método lineal (ecuación 2).

*Ecuación 2. Método lineal para proyección de población*

$$Pf = Puc + Ka * (Tf - Tuc)$$

$$Ka = \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci}$$

*Fuente: [35]*

Donde:

Pf: población final

Puc: población último censo

Pci: población censo inicial

Tuc: tiempo último censo

Tci: tiempo censo inicial

Tf: tiempo final

Luego de proyectada la población para los periodos 2015-2040, 2041-2070 y 2070-2100, se aplican los módulos de consumo establecidos por la CAR (tabla 8), que se seleccionan partiendo del piso térmico, el tamaño y tipo de la población. Para el caso de la cuenca del río Balsillas, como se identificó a partir de la clasificación climática Caldas Lang, la zona de estudio corresponde a un clima frío, y se tiene en cuenta el consumo de tipo urbano.

*Tabla 8. Módulos de consumo*

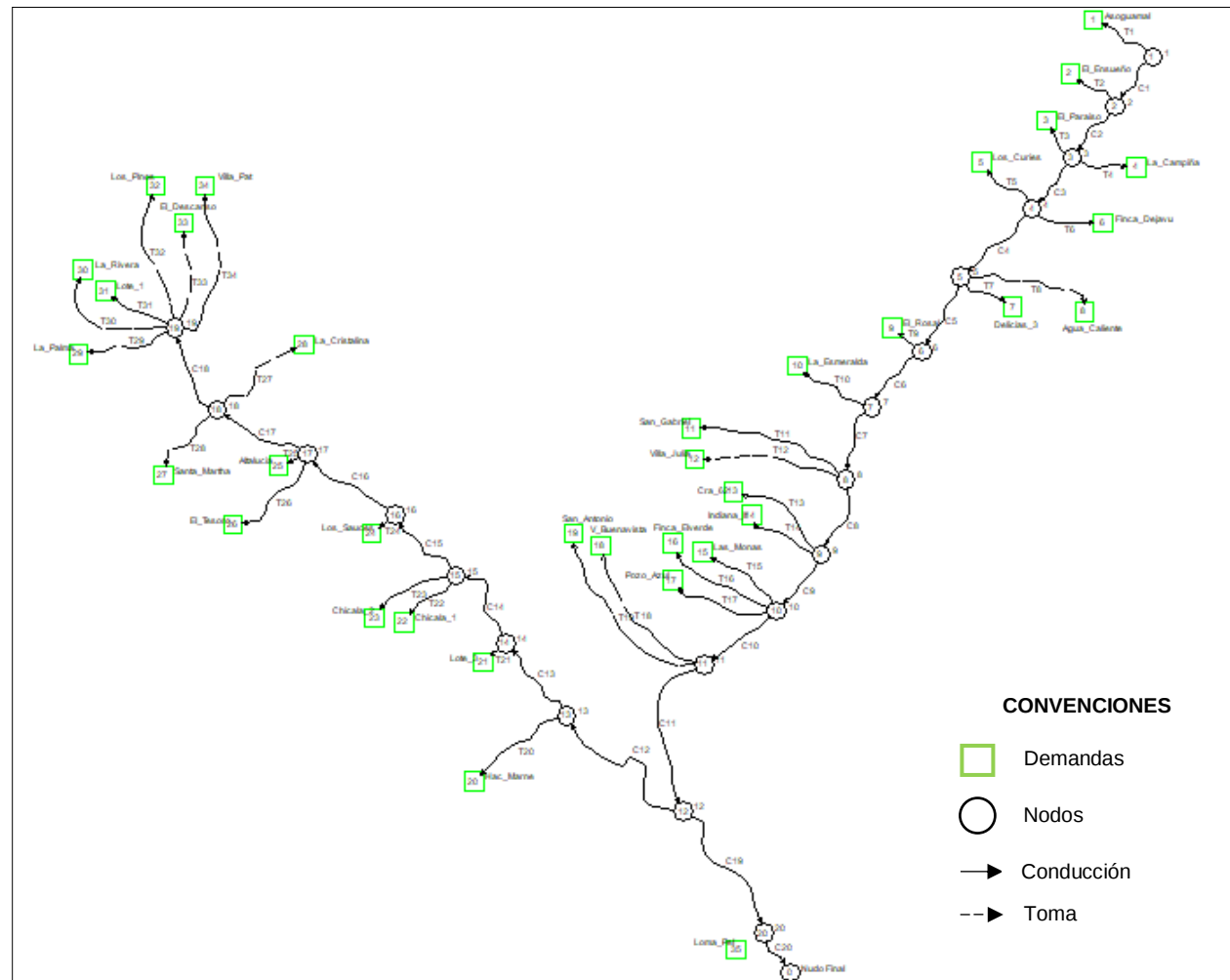
| Piso Térmico | Tamaño Población | Consumo l/hab/día |       |
|--------------|------------------|-------------------|-------|
|              |                  | Urbano            | Rural |
| Frío         | ≤ 5,000          | 150               | 125   |
|              | 5,001 a 10,000   | 165               | 125   |
|              | 10,001 a 20,000  | 180               | 125   |
|              | > 20,001         | 195               | 125   |
| Templado     | ≤ 5,000          | 165               | 135   |
|              | 5,001 a 10,000   | 180               | 135   |
|              | 10,001 a 20,000  | 190               | 135   |
|              | > 20,001         | 200               | 135   |
| Calido       | ≤ 5,000          | 190               | 140   |
|              | 5,001 a 10,000   | 200               | 140   |
|              | 10,001 a 20,000  | 210               | 140   |
|              | > 20,001         | 220               | 140   |

*Fuente: [10]*

Se estimó una pérdida del 7% y se calcula la dotación bruta para cada municipio, luego se obtiene el caudal medio diario (Qmd), caudal máximo diario (QMD) y el caudal máximo horario (QMH) en L/s. Luego se realiza la conversión de unidades a hm<sup>3</sup>/mes para el ingreso al software SSD AQUATOOL (anexo H).

Después de realizada la modelación en SIMGES se procede a modelar en SIMRISK la probabilidad de riesgo de fallo en el suministro, para ello el modelo utiliza como base las aportaciones que se ingresaron en el modelo SIMGES, las cuales corresponden a las series sintéticas de caudales obtenidas mediante el modelo estadístico. Para cada demanda se estipula un nivel de riesgo en porcentaje, donde se establece las condiciones en las que se pretende evaluar el riesgo, es decir, el grado para los cuales se quiere determinar el fallo del sistema, para este caso del 30%, 60% y 90% para nivel de riesgo; para obtener la probabilidad del riesgo de fallo también se establecen unos criterios en porcentaje de 30%, 60% y 90%, que corresponden al porcentaje de demanda sobre el cual se va a calcular la probabilidad de fallo; es preciso señalar que dichos porcentajes se establecen subjetivamente, con el fin de evaluar el posible riesgo en los grados que se prefieran. Seguido de esto se ingresan los parámetros del modelo, el año inicial de simulación, mes de inicio de la simulación y el número de meses de simulación, en el caso de estudio se inicia en el 2035, mes 10, para 60 meses, ya que se establece con base en el periodo de planificación de los recursos hídricos de 30 años, en el programa se obtienen la series basadas en datos históricos, lo que genera el número de simulaciones a realizar, para este caso, el modelo arroja un numero de 29 simulaciones, posteriormente se ejecuta.

Diagrama 4. Diagrama de demandas de la cuenca del río Balsillas en el SSD AQUATOOL



Fuente: Elaboración propia.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Fase de modelación

#### 5.1.1 Calibración y validación de HydroBID

La calibración en HydroBID se realiza a partir de la variación de los parámetros de número de curva (NC), contenido de agua disponible en el suelo (AWC), coeficiente de recesión (R), coeficiente de permeabilidad (seepage), factor ET de la estación de cultivo, factor ET para la estación de latencia y porcentaje de la cobertura permeable, hasta obtener un resultado aceptable a nivel gráfico y estadístico; en el software se debe realizar la interpolación de las series de precipitación y temperatura generadas en el código Python para cada subcuenca en la zona de estudio e ingresar los datos de caudal de la estación limnimétrica El Bosque; la calibración se realiza para el periodo comprendido entre el 01/01/1992 al 31/12/2004.

A partir de los parámetros estipulados (tabla 9) los resultados obtenidos a nivel gráfico (gráfica 5) muestran que la curva de duración de caudales simulados sobreestima la curva de caudales observados en el intervalo de 30% a 90% debido a que el software puede que considere eventos de mayor magnitud con base a los registros históricos, sin embargo a pesar de dicha diferencia las métricas de desempeño (tabla 10), resultaron ser las más aceptables. Los valores a nivel mensual resultaron ser los mejores para determinar que el modelo es funcional, ya que estos se encuentran dentro de los rangos establecidos por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

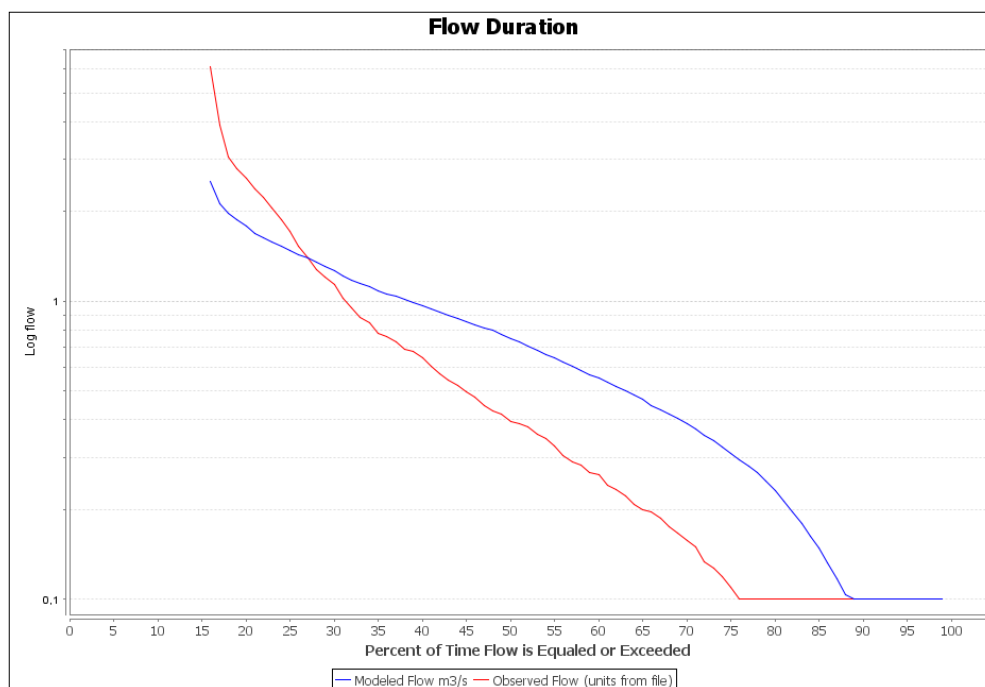
Es importante mencionar que el cambio en los parámetros de calibración repercuten significativamente en los caudales simulados, así pues al disminuir el número de curva, los caudales disminuyen, debido a que la infiltración aumenta, por tanto hay menor escorrentía, por otro lado tanto el contenido de agua en el suelo (AWC) y el seepage influyen sobre la escorrentía, debido a que si aumentan hay mayor impacto sobre los caudales bajos por lo que aumenta la infiltración. Respecto al coeficiente de recesión (R) al modificarlo, aumenta la pendiente de la curva de caudales, de manera que se aumenta la escorrentía y por ende los caudales presenten valores más altos.

*Tabla 9. Parámetros para la calibración del modelo.*

| Parámetro                | Valor de calibración |
|--------------------------|----------------------|
| Curve Number             | 0.8                  |
| AWC                      | 0.9                  |
| R coefficient            | 0.008                |
| Seepage                  | 0.038                |
| Grow season ET factor    | 1                    |
| Dormant season ET factor | 1                    |
| Impervious cover percent | 1                    |

*Fuente: elaboración propia*

Gráfica 5. Curva de duración de caudales de la calibración del modelo



*. Fuente: software HydroBID*

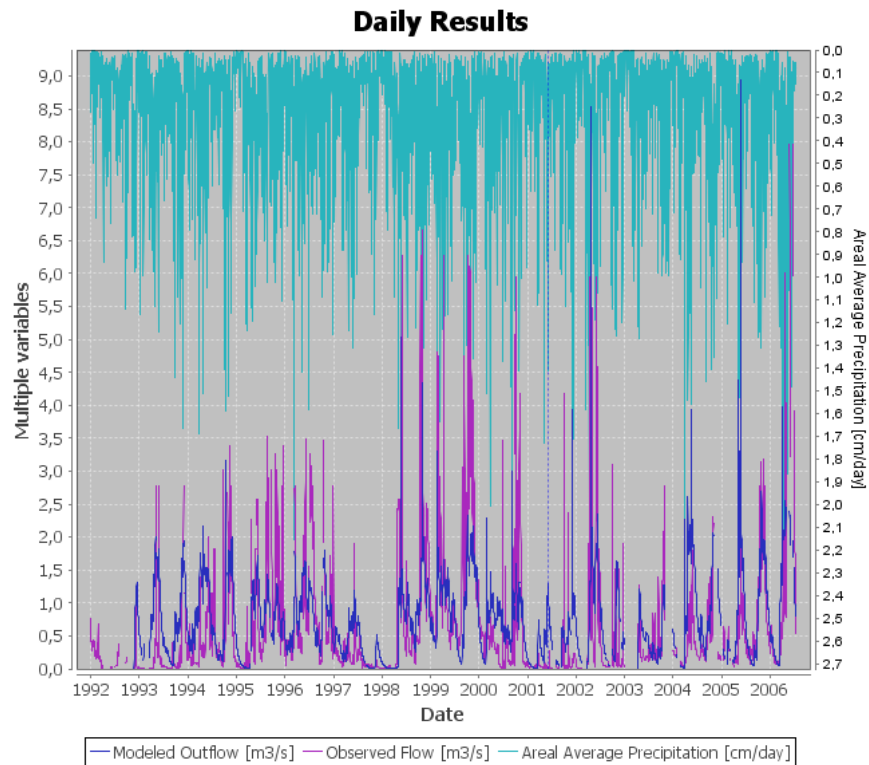
Tabla 10. Métricas de desempeño de la calibración del modelo.

|                                       | Daily value | Monthly value |
|---------------------------------------|-------------|---------------|
| <b>Overall volume error, ove(%)</b>   | 11,85       | 4,66          |
| <b>Correlation, r(-)</b>              | 0,56        | 0,69          |
| <b>Modified Correlation, Rmod</b>     | 0,35        | 0,42          |
| <b>Nash-Sutcliffe Efficiency, R^2</b> | 0,31        | 0,47          |

*Fuente: elaboración propia, software HydroBID.*

En la gráfica 6 se presentan los datos a nivel diario de precipitación (línea azul clara) vs los datos de caudal histórico (línea morada) y caudales simulados (línea azul oscura), donde se puede observar que la relación entre la variable climática y el caudal en la cuenca es proporcional, es decir, si el valor en los eventos de precipitación aumenta, así mismo lo hará el valor del caudal, presentándose los caudales máximos. Es importante mencionar que se tiene más precisión en la simulación de caudales bajos y medios, ya que como se observa, algunos caudales simulados sobrepasan los caudales registrados o por el contrario los simulados no alcanzan los picos de los caudales máximos observados.

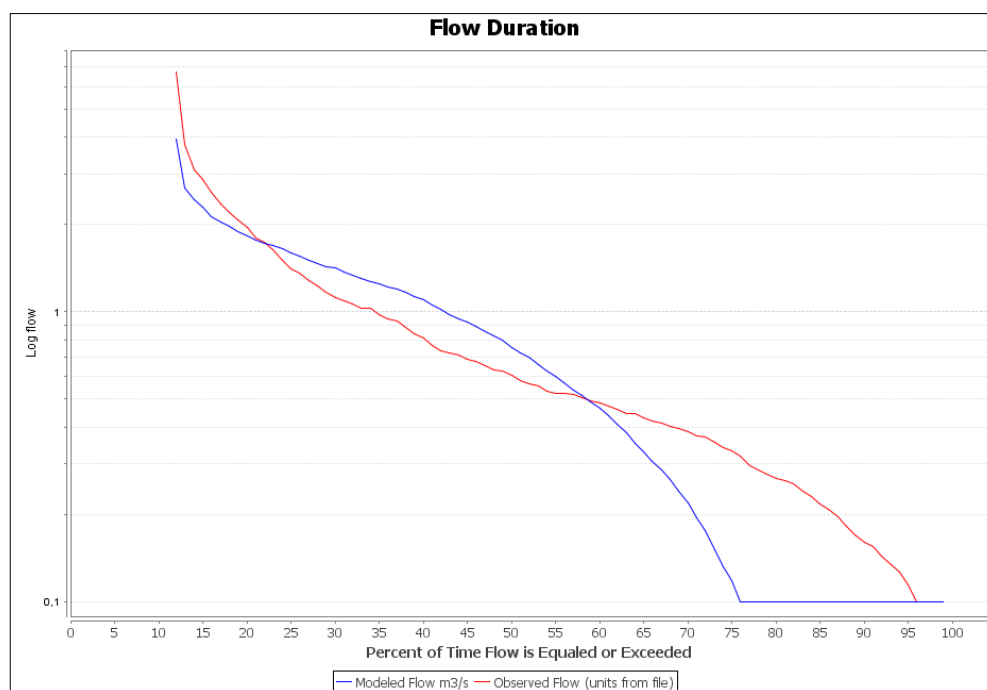
Gráfica 6. Datos observados de precipitación vs caudales observados y simulados.



*Fuente: elaboración propia, software HydroBID*

Respecto a la validación, una vez obtenida la calibración, se corre el modelo nuevamente, esta vez dentro de un periodo posterior entre el 01/01/2005 hasta 31/12/2009, donde los resultados obtenidos muestran a nivel grafico (grafica 7) una similitud del comportamiento de la curva entre datos simulados y observados, sin embargo al igual que en la calibración se sobrestima en una porción los caudales modelados.

Gráfica 7. Curva de duración de caudales de la validación del modelo. Fuente: software HydroBID.



Fuente: software HydroBID

En relación a las métricas de desempeño (tabla 11) los valores a nivel mensual son más precisos que los datos diarios y se encuentran dentro de los rangos estipulados por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), lo que indica que el modelo llega a ser funcional.

Tabla 11. Métricas de desempeño para la validación del modelo.

|                                | Daily value | Monthly value |
|--------------------------------|-------------|---------------|
| Overall volume error, ove(%)   | -6,84       | -17,55        |
| Correlation, r(-)              | 0,54        | 0,64          |
| Modified Correlation, Rmod     | 0,46        | 0,41          |
| Nash-Sutcliffe Efficiency, R^2 | 0,2         | 0,38          |

Fuente: elaboración propia, software HydroBID.

## 5.1.2 Análisis de cambio climático

### 5.1.2.1 Selección del Modelo de Circulación Global (GCM)

Para la selección del GCM se tuvieron en cuenta cuatro modelos y dos cordex, estos últimos caracterizados por ser de una menor escala y tener más precisión de los datos, los modelos

a evaluar fueron: CanESM2, CNMR-MR5, MPI-ESM, CCSM4, CORDEX CanESM2 y el CORDEX MPI-ESM; se genera un archivo Excel para realizar la comparación de los porcentajes de error de las variables de media, dato máximo, dato mínimo, desviación estándar, coeficiente de correlación, días húmedos/fríos y días cálidos/secos para cada modelo y experimento CORDEX. Una vez realizada la comparación de estos parámetros se selecciona el modelo que mejor se ajusta, además de esto, se evalúan las gráficas anuales y mensuales multianuales que comparan los datos del modelo vs los datos de las series de temperatura y precipitación históricas.

Teniendo en cuenta lo anterior para la variable de precipitación el modelo climático que más se ajustó fue el MPI-ESM-MR CORDEX, en la tabla 12 se pueden observar los valores resultantes del código de comparación.

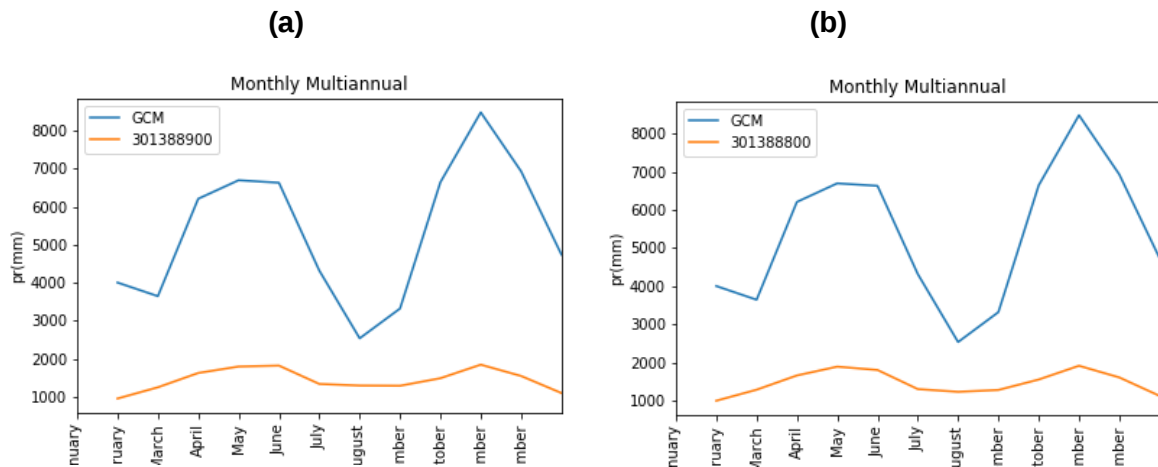
*Tabla 12. Resultados criterios de comparación MPI-ESM-MR CORDEX*

| Modelo          | Estación  | Media  | Max    | Min | Desv   | Corr | Días Húmedos/Fríos | Días Secos/Cálidos |
|-----------------|-----------|--------|--------|-----|--------|------|--------------------|--------------------|
| MPI<br>(Cordex) | 301413300 | 392.15 | 404.13 | inf | 423.76 | 0.04 | 0                  | 3.42               |
|                 | 301388900 | 271.05 | 275.89 | inf | 363.5  | 0.03 | 0.48               | 0.32               |
|                 | 301388800 | 263.99 | 258.65 | inf | 349.31 | 0.03 | 0.16               | 0.96               |

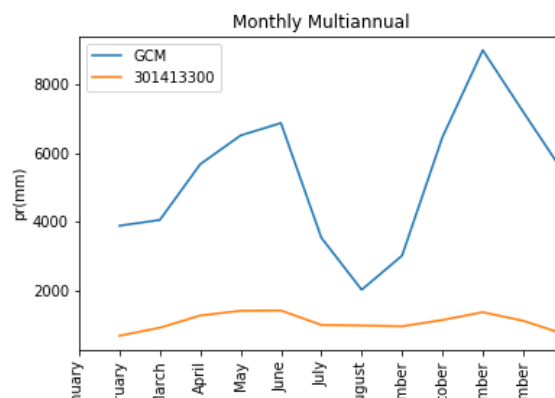
*Fuente: elaboración propia.*

Este modelo se eligió, debido a que en las gráficas 8.a a 8.c se evidencia un comportamiento similar de la curva de datos observados vs los datos del modelo para los doce meses del año, iniciando en enero, además los valores que presenta el GCM son más cercanos a los datos de la precipitación registrados, por otro lado presenta la mejor correlación de todos los modelos evaluados; en relación a los criterios de días secos y húmedos el porcentaje de error es mínimo lo que indica que hay similitud entre los datos.

*Gráfica 8. Comportamiento mensual multianual GCM vs datos históricos de precipitación*



(c)



Fuente: software Spyder

Por otro lado para la variable de temperatura el modelo que se ajusto fue el GCM MPI-ESM-MR, en la tabla 13 se presentan los valores resultantes de la comparación de cada criterio mediante el código estructurado en el software Spyder a nivel estadístico, a nivel grafico en la gráfica 9.a a 9.c se evidencia un ajuste de los datos del modelo con los datos de las series registradas en la cuenca.

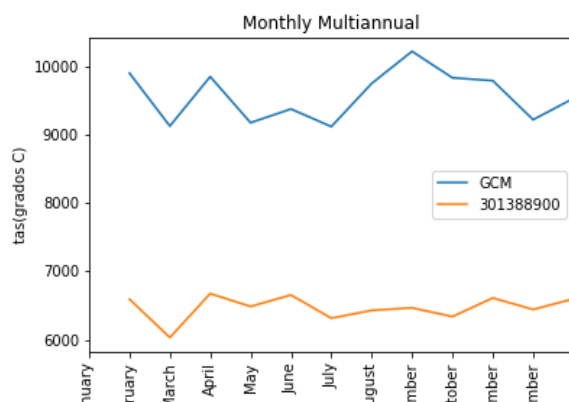
Tabla 13. Resultados criterios de comparación MPI-ESM-MR

| Modelo | Estación  | Media | Max   | Min   | Desv   | Corr | Días Húmedos/Fríos | Días Secos/Cálidos |
|--------|-----------|-------|-------|-------|--------|------|--------------------|--------------------|
| MPI    | 301413300 | 35.43 | 40.22 | 38.71 | 101.86 | 0.03 | 7.17               | 0                  |
|        | 301388900 | 48    | 49.67 | 55.13 | 101.52 | 0.05 | 3.72               | 0.16               |
|        | 301388800 | 39.49 | 42.93 | 42.92 | 105.19 | 0.04 | 1.74               | 0.64               |

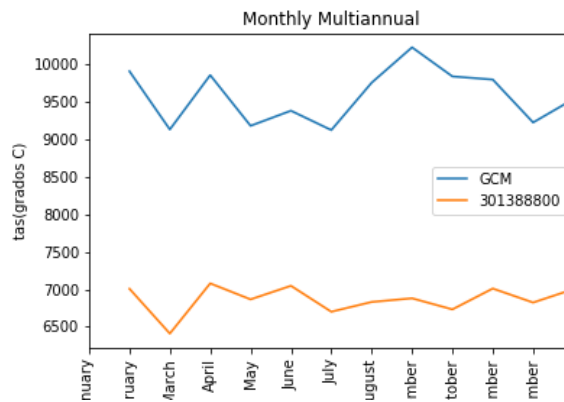
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 9. Comportamiento mensual multianual GCM vs datos históricos de temperatura.

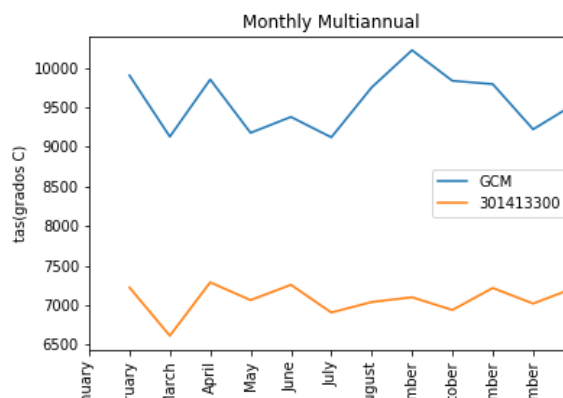
(a)



(b)



(c)



Fuente: software Spyder

A partir de la selección del GCM se procede a establecer los escenarios de cambio climático con los cuales se analiza el comportamiento del caudal en la zona de estudio a futuro, dichos escenarios han sido estipulados en el quinto informe emitido por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), los cuales se encuentran basados en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El IPCC nombra los escenarios como Trayectorias de Concentración Representativas o RCP por sus siglas en inglés y cada una está diseñada bajo ciertas condiciones de concentración dependiendo del Forzamiento Radiativo (FR) y la concentración de CO<sub>2</sub> para el año 2100. En el caso del GCM MPI-ESM-MR y el CORDEX se cuentan con tres escenarios: RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, debido a la disponibilidad de los datos; de los cuales se obtuvo información a través del portal del CEDA, los datos recolectados corresponden a registros históricos de precipitación y temperatura para cada uno de los RCP.

### 5.1.2.2 Reducción de escala basada en la teoría del Caos

En las gráficas del anexo A se puede observar el ajuste de los datos de precipitación del CORDEX MPI\_ESM-MR respecto a los datos históricos registrados para cada COMID, así mismo se presentan los datos del modelo original. A partir de ello se obtuvieron las series de datos correspondientes a precipitación y temperatura para cada subcuenca, condicionada por las características de cada RCP, de modo que se establezcan tres diferentes escenarios de cambio climático, ya que estos presentan variaciones en diferentes grados debido al cambio en la concentración de GEI.

Como se observa en la tabla 14 para cada escenario y cada COMID se presenta un incremento o disminución de las variables de precipitación y temperatura tanto a mediados de siglo (MOC) como a finales de siglo (EOC). En el caso de la variable de precipitación para cada escenario se presenta un incremento de los eventos tanto a mediados de siglo como para finales, en el caso del RCP 2.6 se presenta un incremento promedio del 1.83% para el MOC y 4% para el EOC, para el RCP 4.5 6.53% para MOC y 6.9% para EOC, por ultimo para el escenario RCP 8.5 hay incrementos del 7.43% para MOC y 7.97% para EOC.

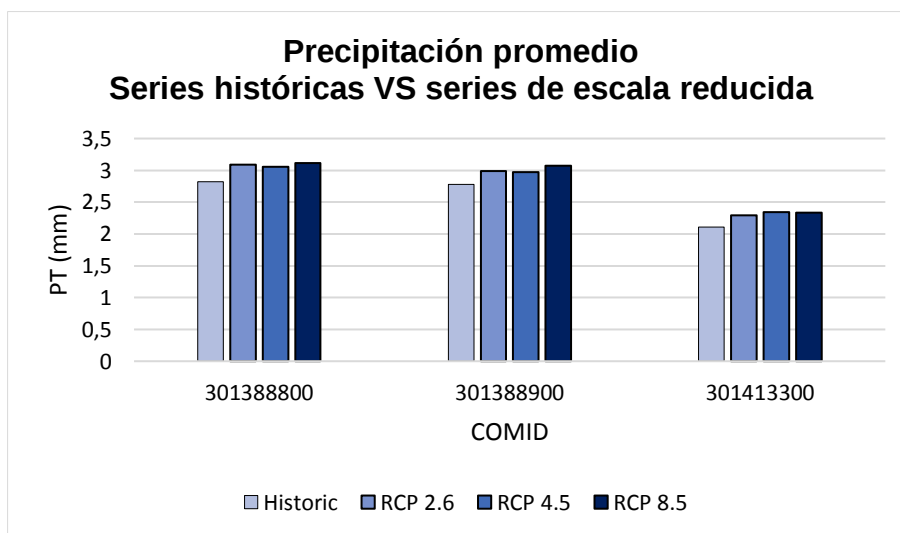
Tabla 14. Variación de la precipitación bajo la reducción de escala.

| ESCENARIO | COMID     | PRECIPITACION   |                 |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
|           |           | INC/DEC MOC (%) | INC/DEC EOC (%) |
| RCP 2.6   | 301388900 | -1.00           | 0.50            |
|           | 301388800 | -1.50           | 0.70            |
|           | 301413300 | 8.00            | 10.80           |
| PROMEDIO  |           | 1.83            | 4.00            |
| RCP 4.5   | 301388900 | 2.00            | 6.00            |
|           | 301388800 | 7.20            | 3.90            |
|           | 301413300 | 10.40           | 10.80           |
| PROMEDIO  |           | 6.53            | 6.90            |
| RCP 8.5   | 301388900 | 10.40           | 7.60            |
|           | 301388800 | 0.10            | 2.70            |
|           | 301413300 | 11.80           | 13.60           |
| PROMEDIO  |           | 7.43            | 7.97            |

Fuente: elaboración propia

En la gráfica 10 se puede observar la variación de los datos históricos promedio de precipitación en comparación con el promedio de las series de datos obtenidas a través de la reducción de escala para cada COMID, teniendo en cuenta ello, se evidencia que en periodos futuros el promedio de los datos aumenta, lo que indica un incremento en la precipitación dentro de la zona de estudio.

Gráfica 10. Precipitación promedio datos históricos VS series de escala reducida.



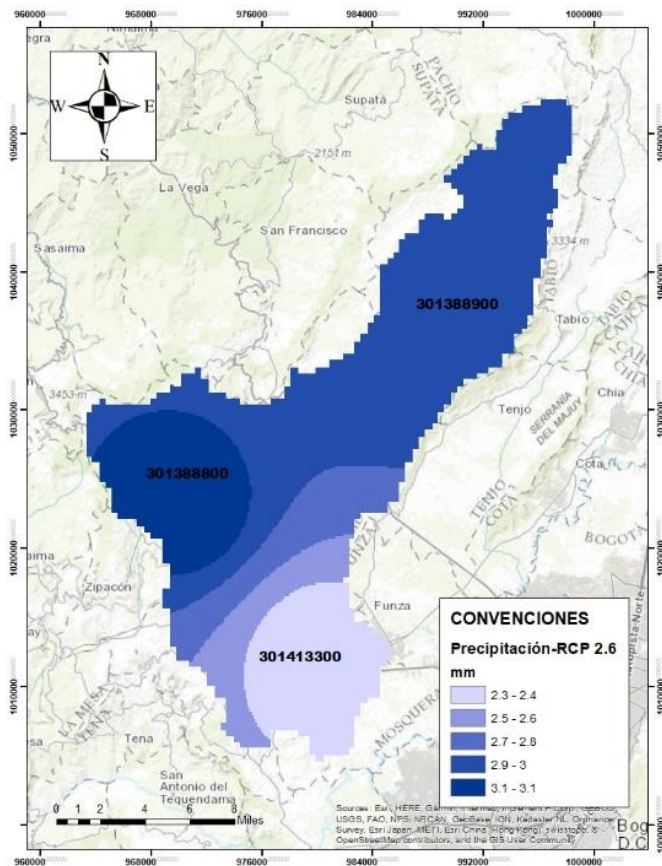
Fuente: elaboración propia

En el mapa 5 se puede observar el comportamiento de la precipitación en cada escenario hasta el año 2100, para el RCP 2.6 (mapa 5.a) los valores máximos de precipitación se concentran en la subcuenca con COMID 301388800, es decir que en esa porción de la cuenca se han de presentar eventos de mayor magnitud en periodos futuros que corresponden entre los 3 a 3.1 mms en comparación con el escenario actual; en la subcuenca con COMID 301388900 la precipitación oscila entre los 2.9 a 3 mms y por último para la subcuenca con COMID 301413300 se presentan los valores menores de precipitación donde los eventos registran eventos de 2.3 a 2.4 mms.

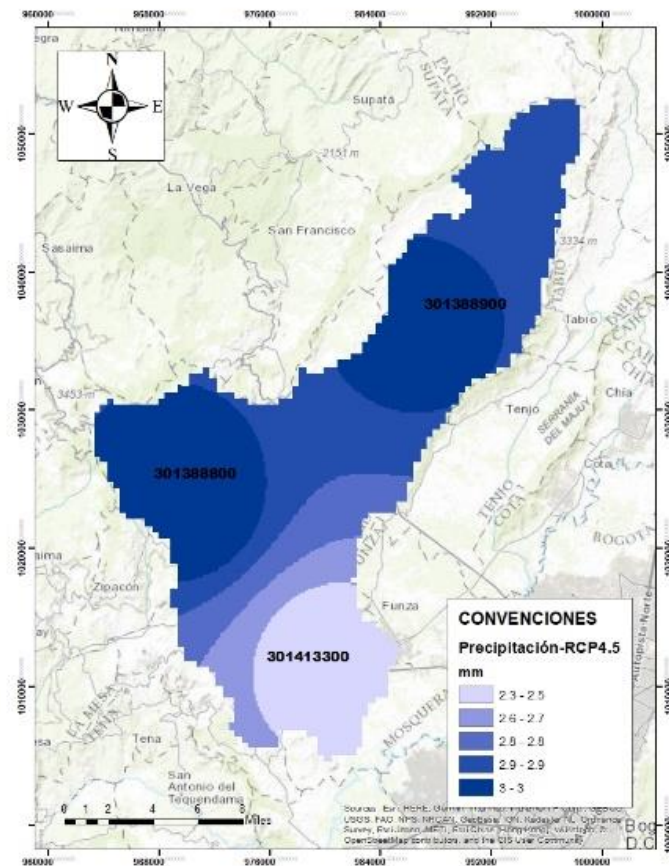
Por otro lado para el escenario de estabilización que corresponde al RCP 4.5 la precipitación se concentra en la parte alta de la cuenca en los COMID 301388900 y 301388800 como se observa en el mapa 5.b, donde los valores de precipitación oscilan entre los 2.9 y 3 mms, para el COMID 301413300 se presentan valores de precipitación entre los 2.3 a 2.5 mms. En el RCP 8.5 (mapa 5.c) el comportamiento de la precipitación es similar al escenario RCP 4.5, ya que los valores se aproximan a los 3.1 mms en los COMID de la parte media y alta de la cuenca, sin embargo, el área que se abarca es mayor en comparación con éste, en la subcuenca con COMID 301413300 se presentan las precipitaciones con menor valor oscilando entre los 2.3 a 2.5 mms. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos tras la reducción de escala y contrastarlos con los datos históricos, se evidencia un aumento de la precipitación bajo cada RCP evaluado, puesto que las condiciones establecidas en cada trayectoria de concentración inciden sobre el comportamiento de las variables climatológicas en la cuenca.

Mapa 5. Interpolación de precipitación bajo escenarios de cambio climático.

(a) RCP 2.6

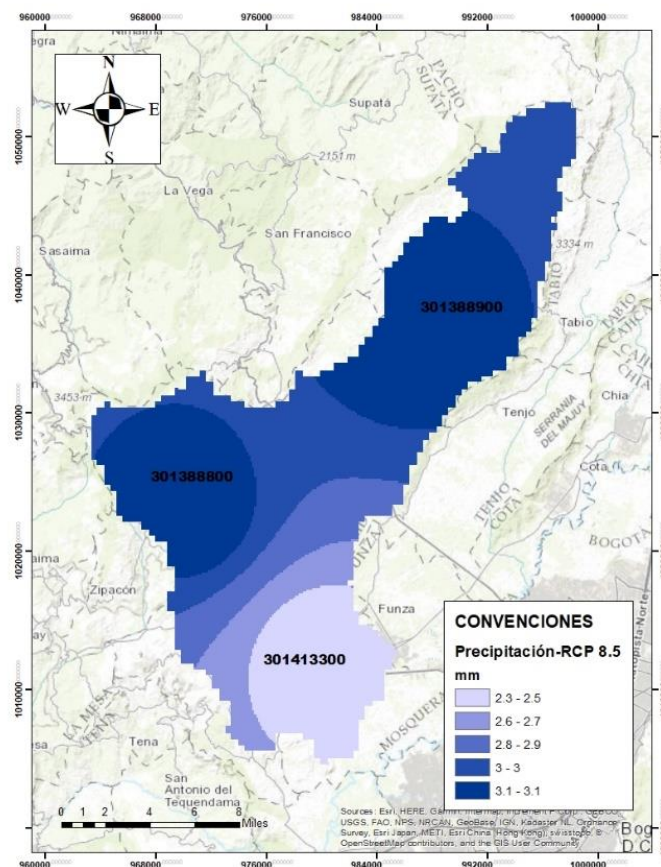


(b) RCP 4.5



Fuente:  
elaboración propia.

(c) RCP 8.5



Fuente: elaboración propia.

En relación a la temperatura para los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5 se presentan incrementos tanto para mediados de siglo como para finales; en promedio 0.17% y 0.23% respectivamente para el RCP 2.6 y, 0.57% y 0.47% para el RCP 4.5, respecto al RCP 8.5 la temperatura presenta una disminución de -0.43% para el MOC y -0.60% para el EOC (tabla 15).

Tabla 15. Variación de la temperatura bajo la reducción de escala.

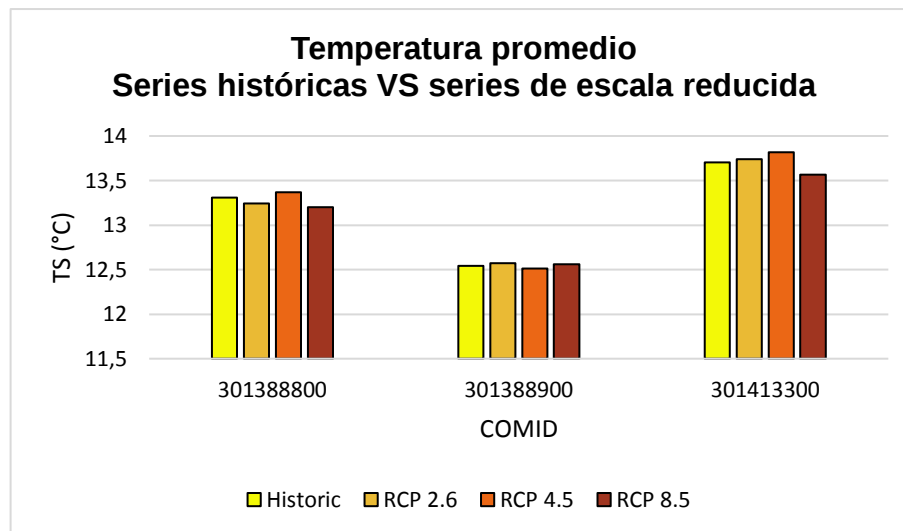
| ESCENARIO | COMID     | TEMPERATURA     |                 |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
|           |           | INC/DEC MOC (%) | INC/DEC EOC (%) |
| RCP 2.6   | 301388900 | 0.4             | 0.4             |
|           | 301388800 | -0.3            | -0.2            |
|           | 301413300 | 0.4             | 0.5             |
| PROMEDIO  |           | 0.17            | 0.23            |

| ESCENARIO | COMID     | TEMPERATURA     |                 |
|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
|           |           | INC/DEC MOC (%) | INC/DEC EOC (%) |
| RCP 4.5   | 301388900 | -0.1            | -0.2            |
|           | 301388800 | 0.7             | 0.6             |
|           | 301413300 | 1.1             | 1               |
| PROMEDIO  |           | 0.57            | 0.47            |
| RCP 8.5   | 301388900 | 0.5             | 0.2             |
|           | 301388800 | -0.7            | -0.9            |
|           | 301413300 | -1.1            | -1.1            |
| PROMEDIO  |           | -0.43           | -0.60           |

*Fuente: elaboración propia.*

En la gráfica 11 se observa la variación de temperatura promedio histórica en comparación con la temperatura promedio que se presentan en los escenarios futuros, estos datos oscilan entre los 12.5°C y los 13.7°C; como se puede evidenciar para los tres COMID la temperatura tiende a elevarse, sin embargo para el escenario RCP 8.5 los valores disminuyen y se presentan promedios menores a los valores históricos.

*Gráfica 11. Precipitación promedio datos históricos VS series de escala reducida.*



*Fuente: elaboración propia*

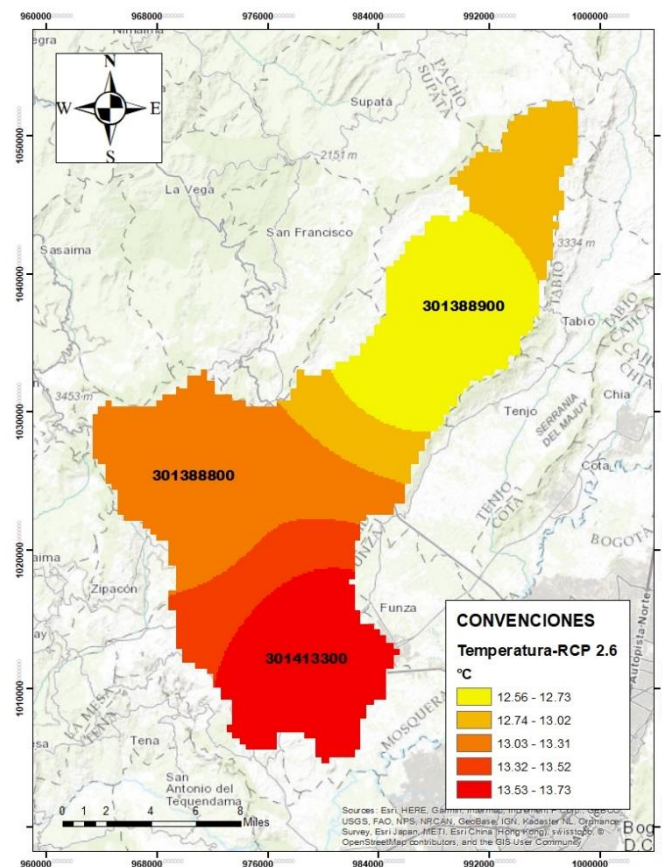
El comportamiento de temperatura para el RCP 2.6 en el COMID 301388900 se presentan los datos con menor valor, estos oscilan entre 12.56°C a 12.73°C principalmente, por otro lado para el COMID 301388800 los datos se aproximan a los 13°C, en el último COMID 301413300 los valores de temperatura se acercan a los 13.73°C (mapa 6.a). En el escenario de estabilización correspondiente al RCP 4.5 la temperatura presenta un incremento significativo en comparación con el escenario anterior, en el mapa 6.b se evidencia que para el COMID 301388900 los valores aumentan y éstos fluctúan entre los

13.26°C a los 13.53°C, para el COMID 301388800 la temperatura oscila entre los 12.98°C y los 13.25°C, por último la subcuenca con COMID 301413300 presenta temperaturas de 13.54°C a 13.81°C.

En el último escenario establecido como el RCP 8.5 los valores de temperaturas se reducen, presentando un comportamiento similar al del RCP 4.5, para el COMID 301388900 de la parte alta de la cuenca, la temperatura oscila entre los 12.56°C y los 12.7°C, el COMID 301388800 presenta temperaturas de 13°C y el COMID 301413300 valores de hasta 13.56°C (mapa 6.c).

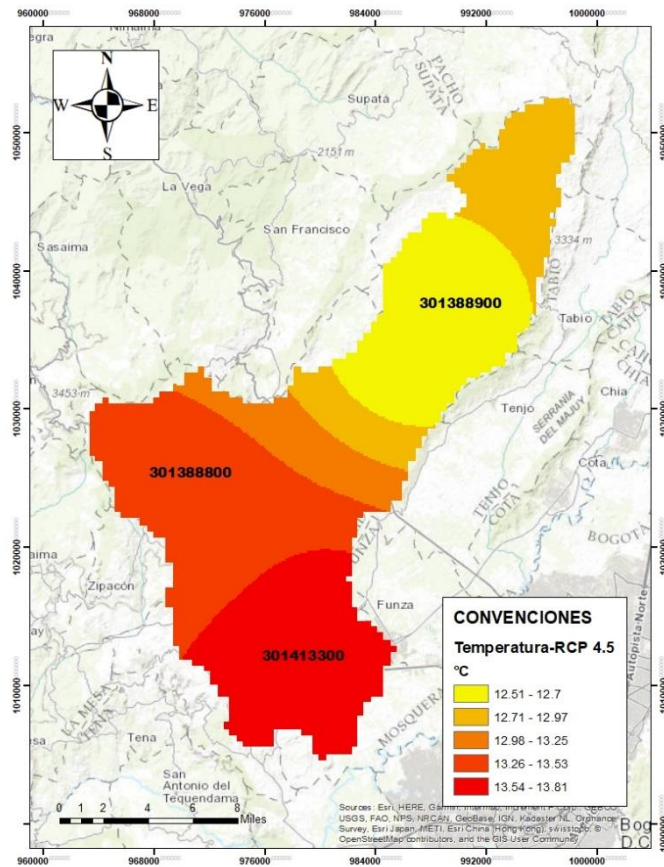
*Mapa 6. Interpolación temperatura bajo escenarios de cambio climático.*

**(a) RCP 2.6**

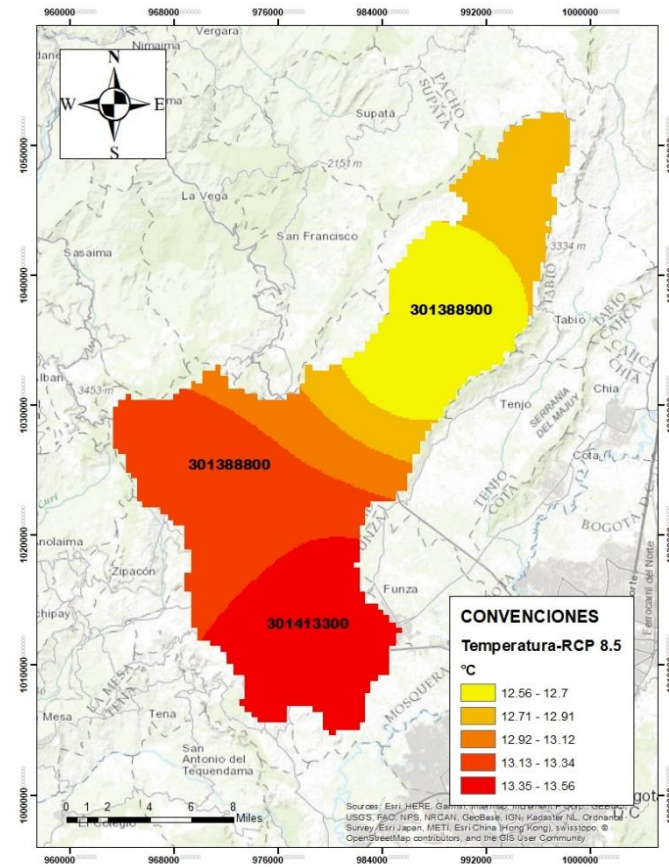


*Fuente: elaboración propia.*

(b) RCP 4.5



(c) RCP 8.5

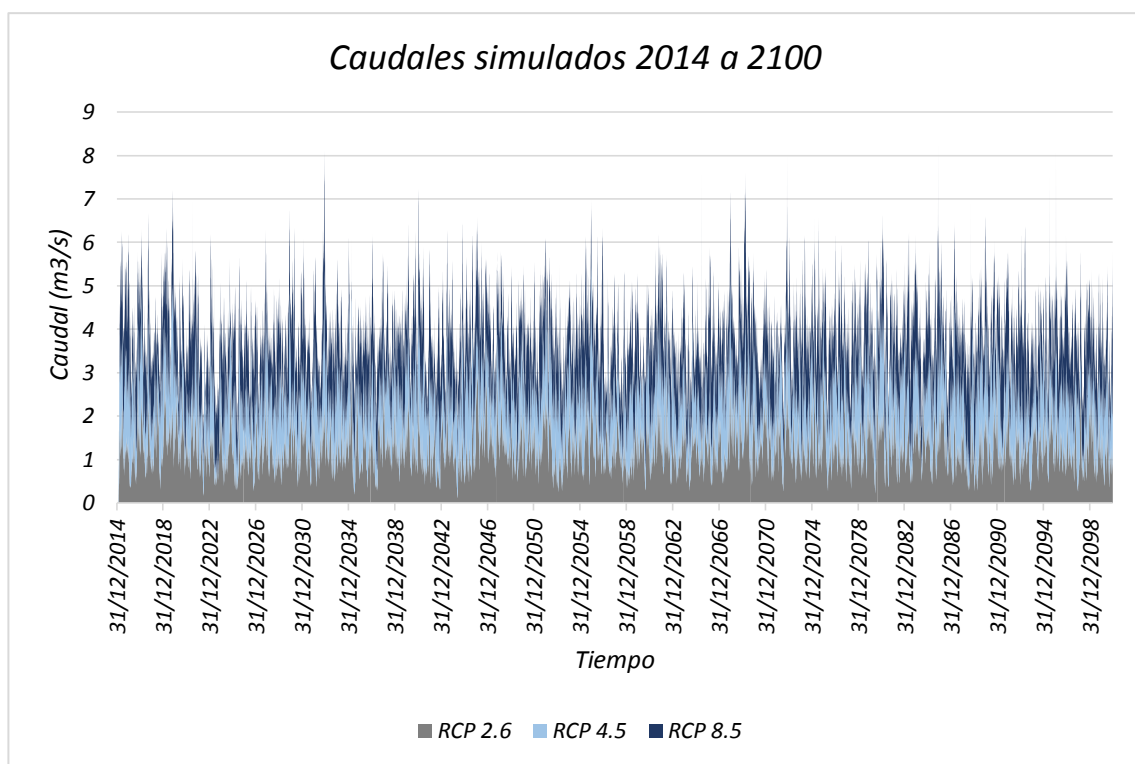


Fuente: elaboración propia.

### 5.1.3 Modelación bajo escenarios de cambio climático

Al aplicar las series de datos climatológicos obtenidos mediante el método de reducción de escala y luego integrarlas en el modelo de HydroBID, se obtuvieron las series de caudales para los periodos comprendidos de 2014 a 2040, 2040 a 2070 y finalmente de 2070 a 2100. Al realizar esta modelación se obtienen diferentes variaciones que repercuten directamente en el régimen hidrológico de la cuenca, como se observa en la gráfica 12 los caudales aumentan gradualmente para cada RCP a lo largo del periodo comprendido entre 2014 a 2100; en el caso del RCP 8.5 se puede evidenciar que se presentan los caudales de mayor magnitud, puesto que los picos registrados alcanzan aproximadamente los  $7\text{ m}^3/\text{s}$ , por lo que se infiere que los procesos de escorrentía son mayores. Por otro lado, los caudales para el RCP 4.5 fluctúan entre  $1\text{ m}^3/\text{s}$  a los  $3\text{ m}^3/\text{s}$  y se presentan ciertos picos cercanos a los  $5\text{ m}^3/\text{s}$  hacia el periodo de 2030 a 2034; para el RCP 2.6, los niveles de caudal en la cuenca presentan los valores más pequeños donde se presentan los caudales mínimos más significativos, los datos alcanzan aproximadamente los  $2\text{ m}^3/\text{s}$ .

*Gráfica 12. Caudales simulados del año 2014 al 2100 bajo escenarios de cambio climático.*



*Fuente: elaboración propia.*

Como se presenta en la tabla 16 para el RCP 2.6 la media de los datos de caudal se aproxima a  $1.28\text{ m}^3/\text{s}$  lo que corresponde a un incremento del 5.2%, por otro lado en referencia al RCP 4.5 la media de los caudales simulados corresponde a  $1.24\text{ m}^3/\text{s}$  que representa un incremento del 2.1% y por último el escenario correspondiente al RCP 8.5,

los datos de caudal presentan una media de 1.29 m<sup>3</sup>/s que indica un incremento de aproximadamente el 6%, en comparación con los datos de caudal históricos de la cuenca.

*Tabla 16. Porcentaje de variación y caudal promedio bajo escenarios de cambio climático.*

| ESCENARIO | PROMEDIO<br>(m <sup>3</sup> /día) | PORCENTAJE<br>DE VARIACIÓN |
|-----------|-----------------------------------|----------------------------|
| Actual    | 1.22                              | -                          |
| RCP 2.6   | 1.28                              | 5.28%                      |
| RCP 4.5   | 1.24                              | 2.12%                      |
| RCP 8.5   | 1.29                              | 6.02%                      |

*Fuente: elaboración propia.*

A partir de los resultados obtenidos de la modelación se determinó que la oferta hídrica de la cuenca aumentará bajo cualquiera de los escenarios de cambio climático evaluados, por lo que se infiere que para periodos futuros comprendidos entre el 2014 a 2100 la cuenca del río Balsillas tendrá mayor disponibilidad de agua, lo que puede repercutir de manera positiva en el desarrollo de las actividades socioeconómicas de la población, sin embargo es importante mencionar que se deben tener en cuenta otros aspectos adicionales como el crecimiento poblacional, económico e industrial a la hora de asegurar la oferta hídrica disponible para la satisfacción de las demandas, puesto que los aspectos anteriormente mencionados inciden en el aumento de consumo para los mismos periodos de tiempo.

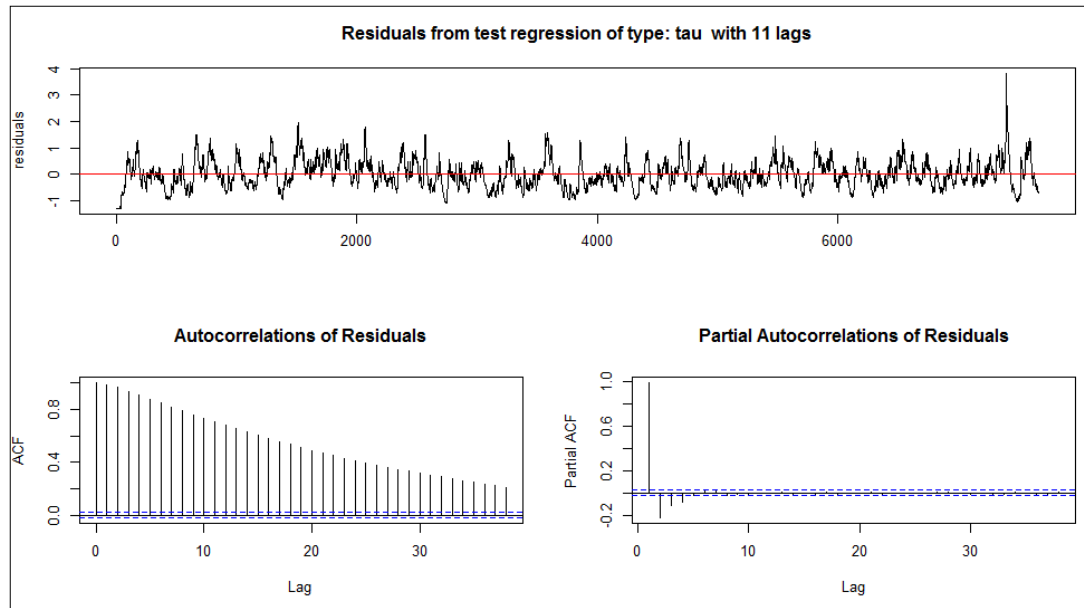
#### **5.1.4 Generación de serie sintética de caudal**

Se realizó la ejecución del modelo estadístico ARIMA-GARCH para la generación de la serie sintética de caudal hasta el año 2100, partiendo de los datos obtenidos de la modelación hidrológica del software HydroBID; como resultados se obtuvieron seis series de datos, tres resultantes del modelo ARIMA-GARCH y tres del modelo ARIMA-GARCH corregido por mediana, correspondientes a cada escenario de cambio climático RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. Con el fin de obtener una serie que cumpla con los parámetros expuestos en la metodología, se realizaron diferentes procesos estadísticos para la selección del modelo que mejor representase la predicción del comportamiento del caudal de la cuenca en periodos futuros y por consiguiente la serie sintética generada a través de éste.

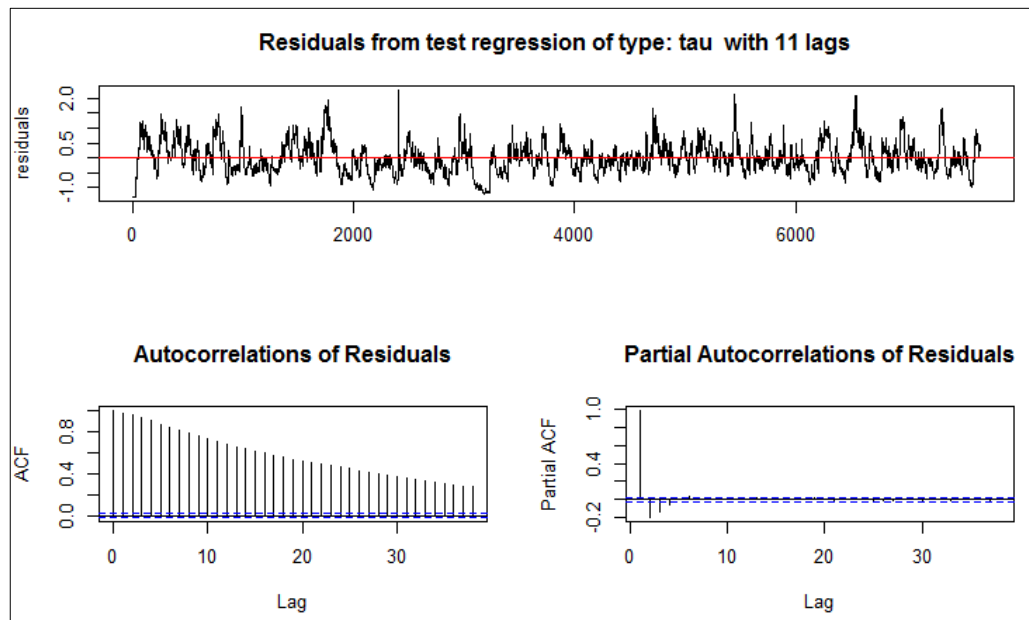
En primera instancia se realizó una exploración de los residuales junto con las gráficas de autocorrelacion (ACF) y autocorrelacion parcial (PACF) de los datos de cada RCP que indican hasta que intervalo de tiempo existe una dependencia de los datos generados con los datos históricos, en la gráfica 13 se observa el resultado del comportamiento de los residuales de los RCP 2.6 (grafica 13.a), RCP 4.5 (grafica 13.b) y el RCP 8.5 (gráfica 13.c)

Gráfica 13.Comportamiento de los residuales bajo cada RCP.

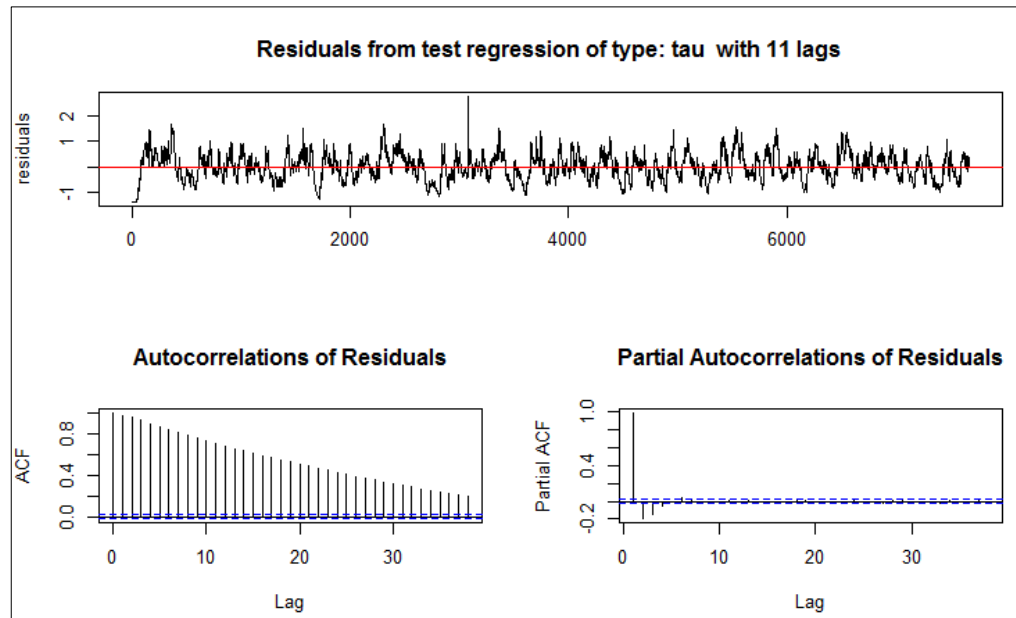
(a) RCP 2.6



(b) RCP 4.5



(c) RCP 8.5



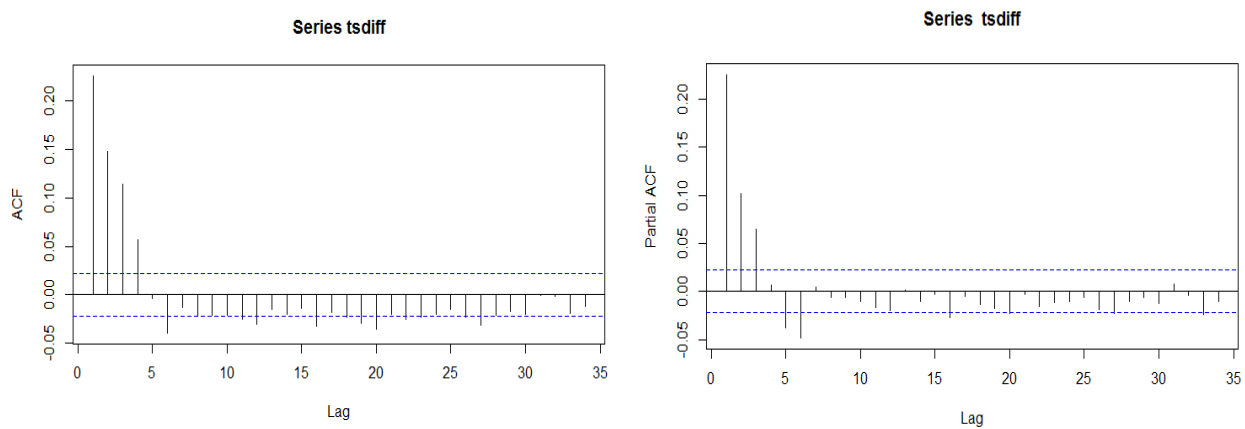
*Fuente: software R studio*

A partir de las gráficas anteriores se determina el comportamiento de los residuales para las series de los tres RCP, identificando que la autocorrelacion en los tres casos decae lentamente a cero, en cuanto a la autocorrelacion parcial para el RCP 2.6 se corta al cuarto rezago, a diferencia del RCP 4.5 y 8.5 en donde se corta al tercer rezago.

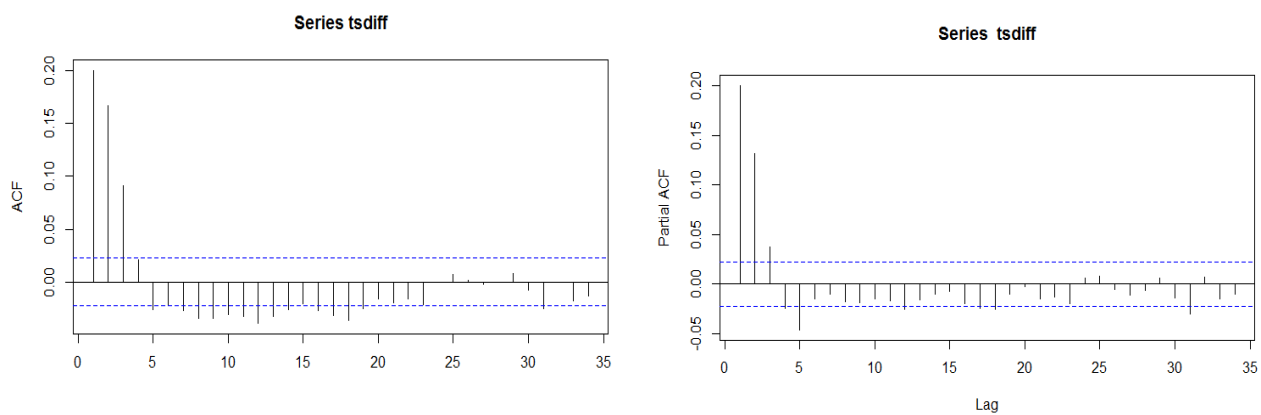
Seguido se aplica la función de autocorrelacion y autocorrelacion parcial por medio de la cuales se obtiene el valor de las variables  $p$  y  $q$  que se utilizaron para proyectar las series en ambos modelos. En las grafica 14 se presenta el comportamiento correspondiente a cada serie; la gráfica 14.a muestra que para el RCP 2.6 el ACF se corta al cuarto rezago y el PACF en el tercer rezago, es decir que, el valor de  $p$  corresponde a 4 y el valor de  $q$  corresponde a 3, por otro lado para el RCP 4.5 (gráfica 14.b) el ACF se corta al tercer rezago, de igual forma el PACF se corta en el tercer rezago lo que indica que tanto para  $p$  y  $q$  el valor es de 3. Por ultimo para el RCP 8.5 (gráfica 14.c) la función ACF se corta en el cuarto rezago y PACF en el tercer rezago por lo que  $p$  corresponde a 4 y  $q$  a 3.

Gráfica 14. Funciones de autocorrelacion y autocorrelacion parcial

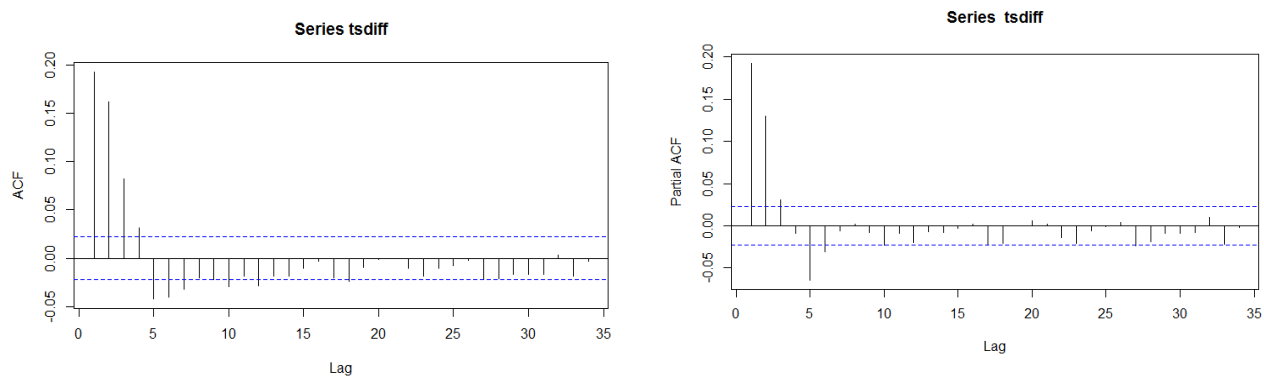
(a) RCP 2.6



(b) RCP 4.5



(c) RCP 8.5



Después de obtenidas las series, se estima el criterio de Akaike (AIC), que midió la calidad relativa para cada modelo, de esta forma seleccionar el que minimiza la pérdida de información, es decir, el que mejor hace la predicción dentro de los datos que lo generan. Cabe resaltar que el modelo que presente menor valor de AIC es aquel que representa mejor el proceso de generación de datos. En la tabla 17 se observa una comparación del AIC entre los modelos ARIMA-GARCH y ARIMA-GARCH corregido por mediana para cada RCP.

*Tabla 17. Resultados obtenidos AIC*

| <b>RCP/Modelo</b> | <b>GARCH Corregido por mediana</b> | <b>GARCH</b> |
|-------------------|------------------------------------|--------------|
| 2.6               | -17465,15                          | -16041,69    |
| 4.5               | -17455,17                          | -15355,13    |
| 8.5               | -17152,3                           | -15343,08    |

*Fuente: elaboración propia*

Según Kenneth Burnham y David Anderson:

*“Por lo general, el AIC es positivo; sin embargo, puede ser desplazado por cualquier constante aditiva, y algunos cambios pueden resultar en valores negativos de AIC...No es el tamaño absoluto del valor AIC, sino los valores relativos sobre el conjunto de modelos considerados, y en particular las diferencias entre los valores AIC, lo que es importante” [36].*

Como se evidencia en la tabla los resultados del criterio de Akaike son negativos, sin embargo con base en lo mencionado anteriormente, el signo no es relevante a la hora de analizar y determinar el modelo que mejor se ajusta; no obstante el hecho de que los resultados sean negativos puede atribuirse al Logloss, donde la pérdida de información en los errores es menor a cero. Teniendo en cuenta este criterio, el modelo GARCH ajustado por medias, demostró ser el de mejor estimación dado que la medida de bondad y ajuste AIC fue menor que la medida del modelo GARCH, por lo que se determina que hace una mejor proyección de los datos hasta el año 2100, en el anexo E se observan la serie base y la serie generadas por el modelo GARCH corregido por mediana, donde se identifica una similitud del comportamiento entre las dos series.

Para obtener una mayor confiabilidad de los datos obtenidos se realizaron pruebas de diferencia de medias, varianza y coeficiente de asimetría, cabe resaltar que generalmente para este tipo de pruebas se aplica un t-test en donde se estipulan hipótesis nulas e hipótesis alternativas, en este caso con el fin de definir la disimilitud entre las series.

A continuación se exponen las hipótesis establecidas con sus respectivos resultados:

- Diferencia de medias

Se establecieron las siguientes hipótesis:

Ho: No hay diferencia entre las medias ( $\mu d=0$ )

Ha: sí hay diferencia entre las variables ( $\mu d \neq 0$ )

En las imágenes 1 a 3 se observa el test aplicado en el código para obtener la diferencia de medias.

*Imagen 1. Resultado test diferencia de medias RCP 2.6*

```
Paired t-test

data: diff(RP1_real) and diff(RP1_pred_AGM)
t = -0.0057887, df = 7668, p-value = 0.9954
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.002000276  0.001988497
sample estimates:
mean of the differences
 -0.000005889399
```

*Fuente: software R studio*

*Imagen 2. Resultado test diferencia de medias RCP 4.5*

```
Paired t-test

data: diff(RP2_real) and diff(RP2_pred_AGM)
t = 0.19958, df = 7668, p-value = 0.8418
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.001870046  0.002294006
sample estimates:
mean of the differences
 0.0002119797
```

*Fuente: software R studio*

*Imagen 3. Resultado test diferencia de medias RCP 8.5*

```
Paired t-test

data: diff(RP3_real) and diff(RP3_pred_AGM)
t = 0.14497, df = 7668, p-value = 0.8847
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.002155091  0.002499310
sample estimates:
mean of the differences
 0.0001721095
```

*Fuente: software R studio*

Con base en lo anterior se determinó que para todas las series de cada RCP no se obtuvo la suficiente significancia para rechazar la hipótesis nula, por lo que se determina que las medias entre serie y serie no son diferentes.

- Diferencia de varianzas

Para la diferencia de varianzas se establecieron las siguientes hipótesis:

Ho: No hay diferencia entre las varianzas ( $\sigma^2_1 - \sigma^2_2 = 0$ )

Ha: sí hay diferencia entre las varianzas ( $\sigma^2_1 - \sigma^2_2 \neq 0$ )

Se realizó el test de diferencia de varianzas aplicando las hipótesis como se observa en las imágenes 4 a 6.

*Imagen 4. Resultados test diferencia de varianzas RCP 2.6*

```
F test to compare two variances
data: diff(RP1_real) and diff(RP1_pred_AGM)
F = 31.046, num df = 7668, denom df = 7668, p-value = 1
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 29.68712 32.46782
sample estimates:
ratio of variances
 31.04635
```

*Fuente: software R studio*

*Imagen 5. Resultados test diferencia de varianzas RCP 4.5*

```
F test to compare two variances
data: RP2_real and RP2_pred_AGM
F = 572.4, num df = 7669, denom df = 7669, p-value = 0.955
alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 547.3447 598.6094
sample estimates:
ratio of variances
 572.4034
```

*Fuente: software R studio*

*Imagen 6. Resultados test diferencia de varianzas RCP 8.5*

```

F test to compare two variances

data:  RP3_real and RP3_pred_AGM
F = 104.83, num df = 7669, denom df = 7669, p-value = 0.8999

alternative hypothesis: true ratio of variances is not equal to 1
95 percent confidence interval:
 100.2400 109.6286
sample estimates:
ratio of variances
   104.8293

```

*Fuente: software R studio*

Como resultado se obtuvo que no hay suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, puesto que los p-values son mayores al nivel de significancia en los tres RCP, por lo que se determina que no hay diferencia en la varianza de cada una de las series.

- Coeficiente de asimetría

Este coeficiente se calculó con el fin de mostrar que la asimetría de la predicción no difiere de la asimetría de los datos reales; se determinó que la serie proyectada tiene la misma distribución que la series base, por lo que se entiende que los datos tienen la misma centralidad y por tanto la misma asimetría.

*Imagen 7. Coeficiente de asimetría de las series proyectadas*

| RCP     | Coeficiente de Asimetría |
|---------|--------------------------|
| RCP 2.6 | 0.23464                  |
| RCP 4.5 | 10.65631                 |
| RCP 8.5 | 2.44106                  |

*Fuente: elaboración propia.*

### 5.1.5 Modelación en SIMGES y SIMRISK

Los resultados para la modelación en SIMGES se presentan a nivel gráfico y por medio de tablas, en los cuales se puede evidenciar el déficit alcanzado por cada punto de demanda, de esta manera se obtuvieron 35 resultados, donde se identificó que bajo los supuestos establecidos de caudal y demanda para el estudio, se presentaron déficit en todos los puntos de consumo, en la tabla 18 se presentan los valores máximos y mínimos de déficit en hm<sup>3</sup> para cada RCP.

Tabla 18. Déficit máximo y mínimo para la cuenca del río Balsillas

| Escenario | Deficit hm3 |               |
|-----------|-------------|---------------|
|           | Max         | Min           |
| RCP 2.6   | 0.8         | 0.0006-0.0008 |
| RCP 4.5   | 0.6         | 0.0006        |
| RCP 8.5   | 0.6 - 0.65  | 0.0006        |

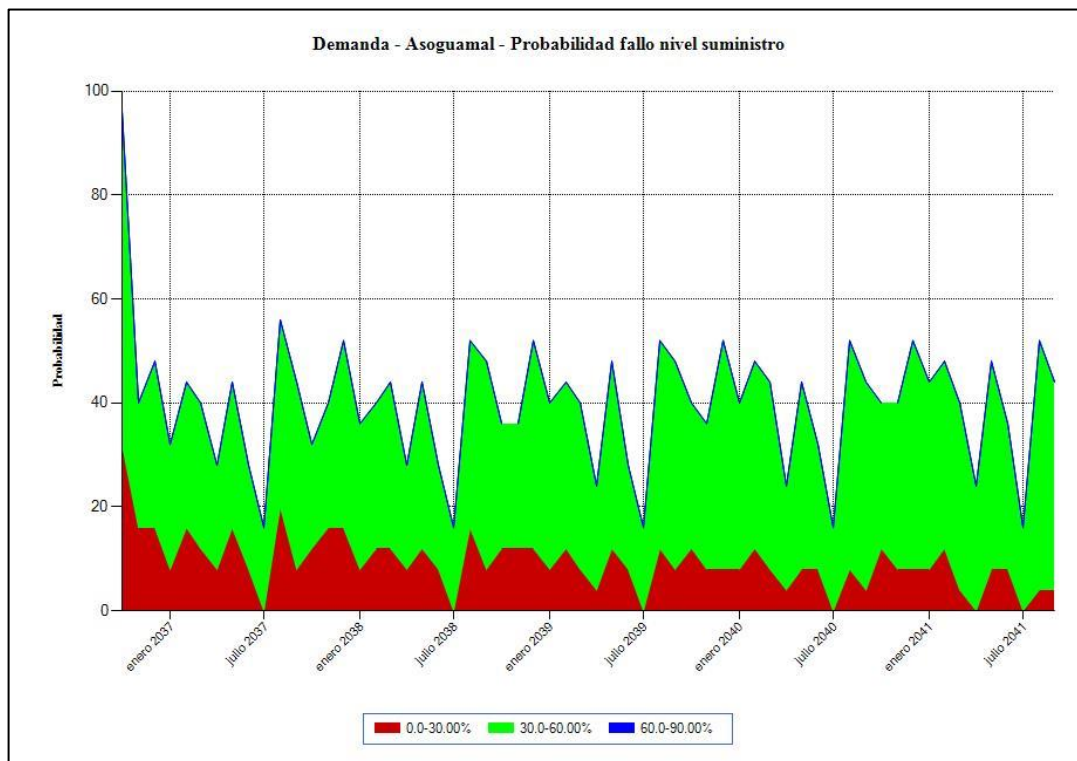
*Fuente: elaboración propia*

Con base en los resultados obtenidos se estima que para el periodo 2035-2065 la cuenca no suplirá completamente las demandas de la población, por lo que se infiere que la oferta bajo estas condiciones no será suficiente para cubrir el consumo de los usuarios en periodos futuros, cabe mencionar que el déficit en unidades de volumen es bajo en comparación con el volumen demandado en cada punto, sin embargo la no satisfacción de las demandas en su totalidad puede generar posibles impactos negativos que repercute directamente sobre las actividades socioeconómicas de la población.

Después de realizada la modelación en SIMGES, se procede a realizar la simulación con el módulo de SIMRISK, en este módulo se utilizan los datos ingresado en el modelo anterior, se incluye únicamente los porcentajes de riesgo a evaluar y el porcentaje de demanda bajo el cual se estimara la probabilidad de fallo, en esta caso para ambos parámetros se establecen porcentajes de 30, 60 y 90%. Los resultados obtenidos a partir de los valores estipulados permitieron identificar que en todos los puntos de consumo existe una probabilidad de riesgo, se determina que para los años 2035 a 2065 posiblemente se presentaran fallos en el sistema, generando déficits en cada punto de demanda.

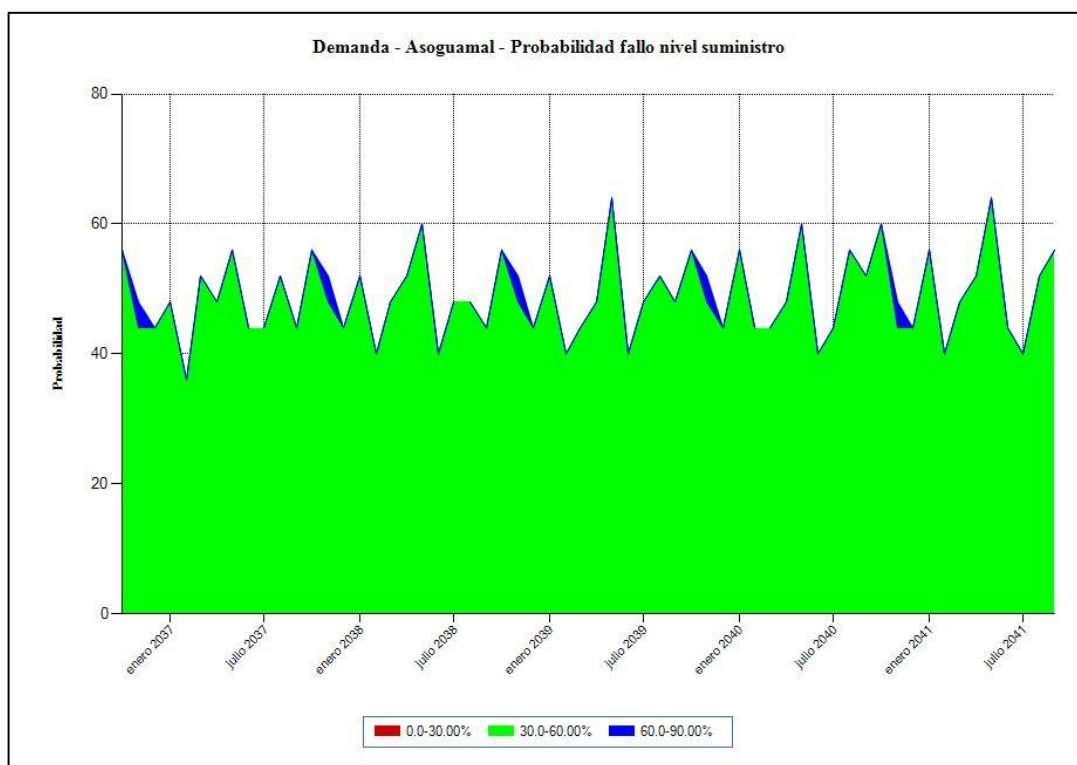
La gráficas 15 a 17 ejemplifican los resultados generados por la modelación en SIMRISK, donde se indica la probabilidad de fallo para el punto de demanda Asoguamal bajo las condiciones del RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5, el área roja representa el 30% de suministro sobre la demanda, el área verde entre 30-60% de suministro y suministro de 60-90% área azul, en el eje Y se establece el porcentaje de probabilidad de riesgo que se ha de presentar bajo cada porcentaje de suministro y en el eje X tiempo en el que se presentara dicha probabilidad. Los resultados obtenidos en cada modelo permiten evidenciar que las condiciones de cambio climático asumidas en cada escenario (RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5), inciden sobre la disponibilidad de recurso hídrico en periodos futuros para los usuarios de la cuenca, puesto que existirá un riesgo de fallo en el sistema, que tendrá como consecuencia la no satisfacción de las demandas, lo que indica un déficit de agua en la zona de estudio. No obstante es importante considerar que para el periodo de tiempo simulado, las demandas presentaran un aumento, lo que también repercute directamente en el déficit que se ha de presentar en el periodo evaluado.

Gráfica 15. Probabilidad de fallo en el suministro – Asoguamal - RCP 2.6



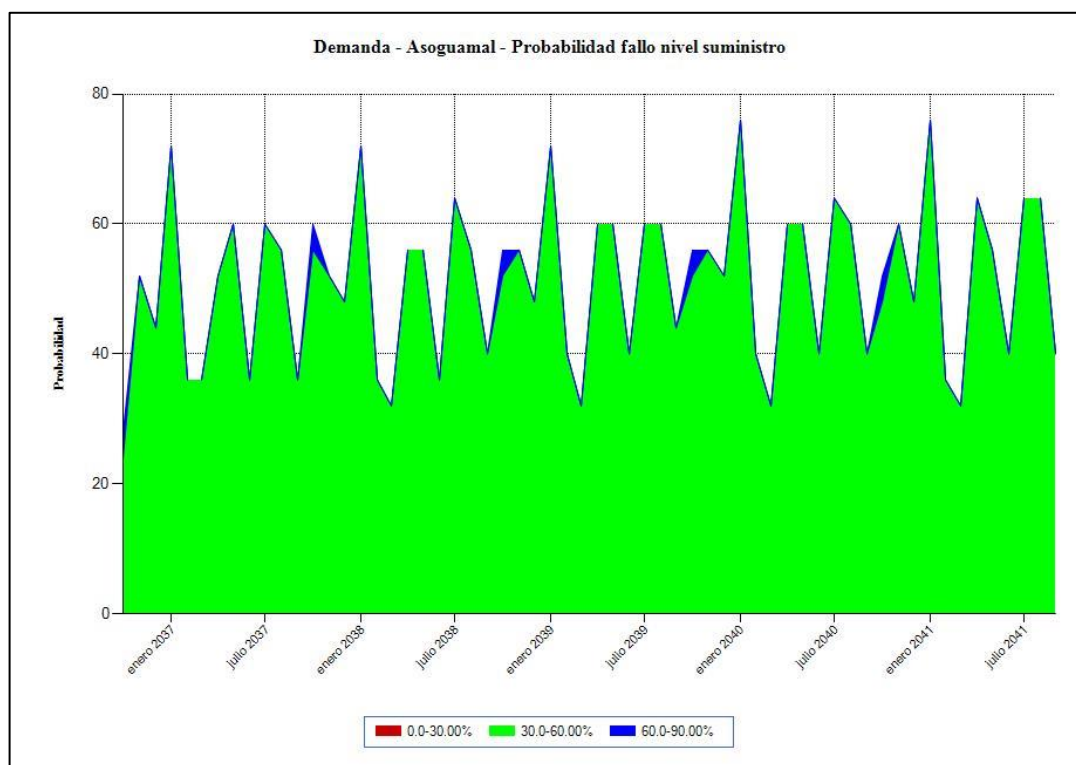
Fuente: Software SSD AQUATOOL – Módulo de SIMRISK

Gráfica 16. Probabilidad de fallo en el suministro - Asoguamal - RCP 4.5



*Fuente: Software SSD AQUATOOL – Módulo de SIMRISK*

*Gráfica 17. Probabilidad de fallo en el suministro - Asoguamal - RCP 8.5*



*Fuente: Software SSD AQUATOOL – Módulo de SIMRISK.*

## 5.2 Fase de resultados

### 5.2.1 Formulación y evaluación de las medidas de mitigación para los diferentes grados de riesgo de fallo

Como se mencionó anteriormente los resultados se generan por cada punto de demanda, es decir que se obtienen 35 resultados para cada escenario RCP, al realizar un análisis general de la probabilidad de fallo, se identificó que para el escenario RCP 2.6 las probabilidades de fallo se presentan únicamente para los suministros del 30% y 60% sobre la demanda; el suministro del 30% presenta una probabilidad de fallo de 27% aproximadamente y para el 60% de suministro la probabilidad de fallo es de 64%, por último para el suministro del 90% no existe riesgo de fallo. En el RCP 4.5 las probabilidades de riesgo son mayores al 70% sobre un suministro del 60%, lo que indica que bajo estas condiciones el déficit de agua es muy alto; para el escenario RCP 8.5 las condiciones de suministro que presentan riesgo son del 30-60% y 60-90% con una probabilidad superior al 70% y una probabilidad cerca del 4%, respectivamente.

En la anexo J se presenta la tabla con el déficit en  $\text{hm}^3$  que se ha de presentar en cada punto bajo cada escenario de cambio climático RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. Dado que los resultados indican un déficit bajo las condiciones estipuladas en el modelo es necesaria la implementación de medidas de mitigación que permitan evitar y/o regular el riesgo de fallo de suministro en la cuenca. Se estipularon dos medidas que restringen en un 10% y un 30% la demanda de agua para cada escenario, esta condición se estableció para cada una de las tomas, ingresando el valor en la pestaña del coeficiente de restricción que se

encuentra en el módulo de SIMRISK. En la tabla 19 se presentan el porcentaje de los suministros bajo los cuales se presentó riesgo de fallo después de implementada la medida de restricción en cada RCP.

*Tabla 19. Porcentaje de suministro con riesgo de fallo*

| Escenario | Restricción del 10% |        |        | Restricción del 30% |        |        |
|-----------|---------------------|--------|--------|---------------------|--------|--------|
|           | 0-30%               | 30-60% | 60-90% | 0-30%               | 30-60% | 60-90% |
| RCP 2.6   | x                   | x      |        | x                   | x      |        |
| RCP 4.5   |                     | x      |        |                     | x      |        |
| RCP 8.5   |                     | x      |        |                     | x      |        |

*Fuente: elaboración propia.*

Teniendo en cuenta un análisis general de los 35 puntos de demanda se determinó que bajo las condiciones estipuladas los resultados obtenidos muestran nuevamente un déficit en las demandas, es importante señalar que estas se reducen, sin embargo la probabilidad de fallo continua; para el RCP 2.6 al establecer las medidas de mitigación no se obtiene ningún cambio en la probabilidad de fallo, se determina que bajo este escenario la probabilidad de riesgo bajo un suministro de 0-30% del suministro con una probabilidad del 25% y de 30-60% de la demanda es de 64%.

Respecto al escenario RCP 4.5 con una restricción del 10% se evidencia que el riesgo disminuye, ya que en comparación con el modelo inicial solo se presenta fallo en el suministro de agua del 30-60% donde la probabilidad es de aproximadamente 50%; para la restricción del 30%, en el sistema se presenta fallas de 40% para el suministro 30-60%. Por ultimo para el RCP 8.5 bajo la condición de restricción del 10%, el suministro de agua del 30-60% presenta un riesgo alto de fallo, ya que es mayor de 60%, por otro lado con una restricción del 30%, se presenta una probabilidad de fallo del 40% aproximadamente en el suministro del 30-60% sobre la demanda.

## 6. IMPACTO SOCIAL

Los efectos del cambio climático son notorios en las últimas décadas y la preocupación por las zonas con alto índice de vulnerabilidad desafía cada vez más a la ciencia y la tecnología a encontrar formas de enfrentar y mitigar estos efectos, según las proyecciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) cuanto mayor sea el nivel de calentamiento en el siglo XXI mayor será el porcentaje de la población mundial que experimentará escasez de agua lo que indica que se reducirán los recursos renovables de aguas superficiales y aguas subterráneas con lo que se intensificará la competencia por el agua entre los sectores ya que habrá menos agua disponible para consumir; situación que generara impactos negativos que repercuten directamente sobre el desarrollo de las actividades socioeconómicas y calidad de vida de los individuos.

Para el caso de la cuenca río Balsillas la principal actividad económica es la agricultura, por lo que es esencial mantener los niveles de suministro suficiente para la producción de las cosechas, puesto que la mayoría de la población subsiste bajo esta labor. No obstante es importante asegurar la calidad de vida de los individuos en la zona de estudio en cuanto a

la satisfacción de la demanda doméstica, para los usos cotidianos del hogar. Este proyecto evalúa el riesgo de fallo en el suministro de agua, de modo que se prevea las afectaciones que puedan sufrir la población a causa del déficit del recurso hídrico, estipulando medidas para la reducción del riesgo y evitar problemáticas a nivel socioeconómico y ambiental. Además de ello, el proyecto aporta a la investigación sobre la incidencia del cambio climático en Colombia, y abre la oportunidad de investigación sobre la aplicación de nuevas herramientas de modelación hidrológica y de gestión del recurso hídrico, así mismo el interés por aplicar nuevas metodologías que se conviertan en una herramienta fundamental para la toma de decisiones en cuanto a la planificación y gestión de sistemas de recursos hídricos.

## **7. CONCLUSIONES**

El análisis climatológico realizado permitió evidenciar la influencia del fenómeno El Niño - Oscilación Sur (ENOS), en el comportamiento de las variables climatológicas evaluadas, puesto que se identificaron datos atípicos que corresponden a eventos del El Niño o La Niña, que generaron una alteración en los datos históricos registrados en la cuenca.

La variable de precipitación presenta dos periodos, los valores máximos se presentan en los meses de marzo a mayo para el primer semestre del año y en los meses de octubre y noviembre para el segundo semestre. En cuanto a temperatura, al igual que la variable anterior los valores máximos se presentan en abril para el primer semestre y noviembre para el segundo semestre del año.

La modelación en el software HydroBID representó de manera acertada las condiciones medias y mínimas de la cuenca río Balsillas, esto se evidenció a partir de la simulación de la escorrentía con el registro histórico de caudales de la estación limnimétrica El Bosque. Es importante señalar que las métricas de desempeño a nivel mensual presentaron de mejor manera las condiciones de la zona en comparación con las métricas a nivel diario.

Para la cuenca río Balsillas el modelo que más se ajustó en relación a la variable de precipitación fue el MPI-ESM-MR CORDEX y para temperatura el GCM MPI-ESM-MR, ya que presentaron los mejores resultados en cuanto a la comparación de las medidas estadísticas y físicas.

Bajo las condiciones de reducción de escala, para cada escenario la variable de precipitación mostró un cambio respecto a los datos históricos. Para el RCP 2.6 la precipitación a mitad de siglo presentara un aumento promedio de 1.83% y a final de siglo del 4%, para el RCP 4.5 el aumento será mayor con un porcentaje de 6.53% para mitad de siglo y 6.9% para finales de siglo, por último las condiciones del RCP 8.5 presentan el mayor incremento de precipitación con un aumento aproximado de 8% para mitad y final de siglo, puesto que las condiciones atmosféricas planteadas en cada RCP influyen en el comportamiento de las variables climatológicas, en este caso por condiciones de concentración de Gases Efecto Invernadero (GEI) y forzamiento radiativo.

Bajo las condiciones de reducción de escala, para cada escenario la variable de temperatura mostró un cambio respecto a los datos históricos. Para el RCP 2.6 la temperatura a mitad de siglo presentara un aumento promedio de 0.17% y a final de siglo del 0.23%, para el RCP 4.5 el aumento será mayor con un porcentaje de 0.57% para mitad

de siglo y 0.47% para finales de siglo, por último las condiciones del RCP 8.5 presentan una disminución considerable, -0.43% para mitad de siglo y -0.60% para final de siglo; para estos escenarios la temperatura oscilará entre 12.5°C y 13.7° C, debido a que las condiciones atmosféricas planteadas en cada RCP influyen en el comportamiento de las variables climatológicas, en este caso por condiciones de concentración de Gases Efecto Invernadero (GEI) y forzamiento radiativo.

Teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático, para el RCP 2.6 los datos de caudal se espera se presente un incremento del 5.2% que corresponde a un promedio de 1.28 m<sup>3</sup>/s, para el RCP 4.5 se espera un incremento del 2.1% que corresponde a un promedio de 1.24 m<sup>3</sup>/s y por último en el RCP 8.5, los datos de caudal presentan una media de 1.29 m<sup>3</sup>/s que indica un incremento de aproximadamente del 6%, respecto a los caudales históricos registrados en la cuenca.

Para la generación sintética de caudales, el modelo estadística ARIMA-GARCH corregido por mediana se ajustó de manera óptima debido a que presentó un criterio AIC menor en comparación con el modelo ARIMA-GARCH. Las series proyectadas mantienen los cuatro primeros momentos estadísticos de la serie base y se evidencia un comportamiento similar a nivel gráfico.

A partir de los resultados generados de la aplicación de los modelos SIMGES y SIMRISK se determina que para el escenario RCP 2.6 el déficit promedio es de 0.096hm<sup>3</sup>, para el RCP 4.5 de 0.124hm<sup>3</sup> y para el RCP 8.5 de 0.126hm<sup>3</sup> sin ninguna medida de mitigación.

Se determina que al aplicar las medidas de mitigación la demanda en la cuenca del río Balsillas no se satisface completamente, debido a que en todos los escenarios existe una probabilidad de fallo que genera un déficit en el suministro de agua. No obstante bajo las condiciones de restricción se disminuye cerca de un 40% de déficit para la medida de restricción del 30% y cerca de un 20% para la medida de restricción del 10% en comparación con el modelo inicial.

## **8. RECOMENDACIONES**

Mejorar los resultados de la calibración del modelo HydroBID mediante la utilización de datos de reanálisis dada la baja densidad de estaciones climatológicas en la zona de estudio.

Teniendo en cuenta que Colombia es uno de los países con gran disponibilidad de agua, es importante introducir y fomentar la aplicación de diferentes herramientas como HydroBID y el SSD AQUATOOL que permiten obtener información esencial de calidad para la toma de decisiones frente a la gestión integral del recurso hídrico (GIRH).

Se recomienda realizar la investigación y poner en consideración la aplicación de modelos estadísticos no líneas en estudios hidrológicos, principalmente en la predicción de datos futuros en pro de una mayor precisión y confiabilidad, puesto que dichos modelos tienen en cuenta la volatilidad, es decir, la varianza y heterocedasticidad, es decir, una varianza no constante a lo largo del tiempo.

Se recomienda que para la proyección del crecimiento de población y de otros sectores económicos implicados en la simulación se tengan en cuenta otros métodos que mejoren la precisión para la estimación de la demanda hídrica.

Para estudios futuros se recomienda diseñar un esquema más detallado de la cuenca para la modelación en SIMGES y SIMRISK, considerando más elementos dentro del sistema, como presencia de acuíferos, recargas al sistema, puntos de retorno, tipos de conducciones, etc., con el fin de mejorar la calidad de los resultados.

Se considera importante hacer partícipe a la comunidad que se ve implicada por los procesos llevados a cabo dentro de la cuenca, con el fin de asegurar una gestión integral del recurso hídrico eficiente, por medio de la capacitación en temas de conservación junto con las autoridades ambientales presentes en la cuenca del río Balsillas, de modo que se reduzcan los impactos negativos que se lleguen a generar.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Ministerio de Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico," *Bogotá D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*, p. 124, 2010.
- [2] D Integrated Water Resources Management (2000 : University of California, S. P. Simonovic, M. A. Marino, and I. I. C. on W. R. Systems, *Integrated water resources management*. Wallingford : International Association of Hydrological Sciences, 2001
- [3] E. A. Dominguez Calle *et al*, "Relaciones demanda-oferta de agua y el indice de escasez de agua como herramientas de evaluacion del recurso hidrico colombiano," *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Fisicas Y Naturales*, vol. 32, (123), pp. 195, 2008.
- [4] M. c. Garcia, «Variabilidad climatica, cambio climatico y recurso hidrico en colombia,» *Revista de ingenieria Universidad de los andes*, p. 5, 2012 .
- [5] A. K. Mishra and V. P. Singh, "A review of drought concepts," *Journal of Hydrology*, vol. 391, (1), pp. 202-216, 2010. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410004257>. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- [6] Juan Carlos Alarcón Hincapié, "El cambio climático como factor transformador del territorio," 2017.
- [7] Germán Poveda and Oscar Mesa, "Las fases extremas del fenómeno ENSO," 1996. Available: <https://www.researchgate.net/publication/233921803>.
- [8] E. A. Dominguez Calle *et al*, "Relaciones demanda-oferta de agua y el indice de escasez de agua como herramientas de evaluacion del recurso hidrico colombiano," *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Fisicas Y Naturales*, vol. 32, (123), pp. 195, 2008.

- [9] A. Avilés A. *et al*, "Estimación del riesgo de fallo en el suministro de agua como ayuda a la planificación y gestión de recursos hídricos," 2012. Available: <http://biblioteca.clacso.edu.ar/gsdll/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=ec/ec-003&d=1234567895419oai>.
- [10] Terrones Saldívar, Ma del Carmen and CAR, "Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá - Subcuenca Río Balsillas," *Lux Médica*, vol. 14, (40), 2006. Available: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac25b19243a8.pdf>. DOI: 10.33064/40lm20191709.
- [11] CHÀVEZ ADRIADNA, "PROPUESTA METODOLÓGICA ARA LA IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMAS DE RECURSOS HIDRÓPICOS&nbsp;" , UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2012.
- [12] CAR, "PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO BOGOTÁ," 2006.
- [13] A. P. Guillermo Eduardo *et al*, "ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS EN COLOMBIA," .
- [14] Anonymous "Convencion Marco sobre el Cambio Climatico," *Geominas*, vol. 44, (69), pp. 31, 2016. Tech. Rep. 44, Apr 1,. 2016.
- [15] Andrea Rodríguez Roa, "EVALUACIÓN DE LOS MODELOS GLOBALES DEL CLIMA UTILIZADOS PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO CON EL CLIMA PRESENTE EN COLOMBIA," 2010. Available: <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/evaluacion-de-modelos-globales-ipcc.pdf>.
- [16] A. P. Guillermo Eduardo *et al*, "ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS EN COLOMBIA," .
- [17] Pronóstico probabilístico de eventos de sequías Y *et al*, "Programa de doctorado en ingeniería del agua y medioambiental," . 2010.
- [18] K. Riahi, A. Grübler and N. Nakicenovic, "Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization," *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 74, (7), pp. 887-935, 2007. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162506001387>. DOI: 10.1016/j.techfore.2006.05.026.
- [19] JUNICHI and FUJINO, "Multi-Gas Model Analysis on Stabilization Scenario." , NIES JAPAN, 2004.
- [20] L. E. Clarke, "Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations," vol. 2.1a, 2007. Available: <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS95354>.

- [21] WCRP, "CORDEX — a global collaborative initiative," 2016.
- [22] USAID, "A REVIEW OF DOWNSCALING METHODS FOR CLIMATE CHANGE PROJECTIONS," *Projections*, 2014. Available: [http://www.ciesin.org/documents/Downscaling\\_CLEARED\\_000.pdf](http://www.ciesin.org/documents/Downscaling_CLEARED_000.pdf).
- [23] PRONÓSTICO PROBABILÍSTICO DE EVENTOS DE SEQUÍAS Y et al, "Programa de doctorado en ingeniería del agua y medioambiental," . 2010.
- [24] E. A. Dominguez Calle et al, "Relaciones demanda-oferta de agua y el indice de escasez de agua como herramientas de evaluacion del recurso hidrico colombiano," *Revista De La Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Fisicas Y Naturales*, vol. 32, (123), pp. 195, 2008.
- [25] Duarte Freddy, Hernandez Oscar and Corzo Gerald, "Chaotic Statistical Downscaling (CSD): Application and Comparisonbin the Bogotá River Basin," 2018.
- [26] de, "Alteraciones del Régimen Hidrológico y," .
- [27] C. P. Amézquita Marroquín, A. Pérez Vidal and P. Torres Lozada, "EVALUACIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN EL MARCO DE UN PLAN DE SEGURIDAD DEL AGUA," *Revista EIA*, (21), pp. 157-169, 2014. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1794-12372014000100014&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372014000100014&lng=en&tlng=en).
- [28] T. Bloch, "Banco Interamericano de Desarrollo," *INCAE Business Review*, vol. 2, (3), pp. 78, 2011.
- [29] Banco Interamericano de Desarrollo et al, "Hydro-BID: Nuevas Funcionalidades," NOVIEMBRE, 2016.
- [30] C. Gil, *Manual De Usuario*. 2018Available: <http://hdl.handle.net/10234/174370>.
- [31] A.Solera Solera, J.Andreu Alvarez and S.T.Sánchez Quispe, "Modelo SIMRISK de Simulación múltiple de la Gestión de Recursos Hídricos con estimación del riesgo, incluyendo Utilización Conjunta," *Universidad Politécnica De Valencia*, Available: [file:///F:/Articulos\\_tesis/20.pdf](file:///F:/Articulos_tesis/20.pdf).
- [32] CHAVEZ NICOLAS, "MODELOS ARCH Y GARCH," .
- [33] Alfonso Novales, Departamento de Economía Cuantitativa and Universidad Complutense, "Modelos ARCH univariantes y multivariantes," 2013.
- [34] M. Cruz Aldrete, "CAPÍTULO 3. Metodología," *Estudios De Lingüística Del Español*, 2009.

Available:[https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od\\_\\_\\_\\_\\_613::30c29c853bc197ae31f6abf635893030](https://www.openaire.eu/search/publication?articleId=od_____613::30c29c853bc197ae31f6abf635893030).

[35] L. Martínez Delgado, "República de Colombia RAS 2000," in Anonymous Bogotá: Lerner, 2000, .

[36] K. Burnham, D. Anderson. Model Selection and Multimodel Inference. A practical information-Theoretic approach. Segunda Edición. New York: Springer-Verlag. 2002