

**APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA  
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN  
SANTANDER**

**PRESENTADO POR**

**DIEGO FERNANDO GÓMEZ ESTUPIÑAN**

**ID: 0002732555**

**ANGIE DANIELA RODRÍGUEZ BUITRAGO**

**ID: 000256135**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**SECCIONAL BUCARAMANGA**

**2018**

**APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA  
MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN  
SANTANDER**

**PRESENTADO POR**

**DIEGO FERNANDO GÓMEZ ESTUPIÑAN**

**ID: 0002732555**

**ANGIE DANIELA RODRÍGUEZ BUITRAGO**

**ID: 000256135**

**DIRECTOR ACADÉMICO**

**Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SECCIONAL BUCARAMANGA**

**2018**

## PÁGINA DE FIRMAS

---

---

---

---

---

---

---

Firma Presidente del Jurado

---

Firma Jurado N°1

---

Firma Jurado N°2

Bucaramanga, Agosto de 2018

## **DEDICATORIA**

A Dios que me ha dado la vida, la sabiduría y la fortaleza para llegar a esta etapa de mi vida.

A mis padres, por su amor y su apoyo, son mis mentores quienes has inculcado en mí principios y valores, por sus consejos, su ejemplo de perseverancia, a quienes les debo todo lo que soy.

A mi hermano por su apoyo desinteresado e incondicional. Gracias.

A mi familia de quienes siempre tengo el apoyo incondicional.

A Diana por su amor y apoyo.

**Diego Fernando Gómez E.**

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a

Dios, por regalarme la vida, guiarme en el caminar y haberme permitido llegar hasta este punto de mi formación personal.

A mi madre Ana Isabel Buitrago, por darme la vida, por ser parte fundamental de quien soy, por su incondicional apoyo, consejos y educación en valores, gracias por darme una carrera para mi futuro.

A mi hermana Paola Alexandra Buitrago, por ser una hermana mayor ejemplar de la cual he aprendido valores como la perseverancia y la constancia. Por todos los consejos brindados que me han influenciado siempre.

Todos aquellos familiares y amigos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este proyecto.

¡Gracias a ustedes!

**Angie Daniela Rodríguez B.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por avernos acompañado y guiado a lo largo de la carrera y por brindarnos una vida llena de aprendizaje.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por ser nuestra alma máter y siempre brindarnos excelencia.

Al Ingeniero PhD. Sergio Manuel Pineda Vargas y la Ingeniera PhD. Sandra Rocío Villamizar Amaya que han sido primero amigos y apoyo, gracias por su excelente trabajo, su sabiduría y dedicación.

Al IDEAM, amb y CDMB por brindarnos la información requerida para culminar este trabajo.

Y a todas las personas que nos aportaron directa e indirectamente durante esta etapa de formación.

## CONTENIDO

CONTENIDO.....	3
LISTA DE TABLAS.....	5
LISTA DE FIGURAS .....	6
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. HIPÓTESIS .....	3
2. OBJETIVOS.....	4
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	4
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	4
3. MARCO TEÓRICO .....	5
4. METODOLOGÍA.....	10
4.1 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO Y SU INFORMACIÓN DISPONIBLE .....	10
4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA APLICABILIDAD DE LOS MODELOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA COLOMBIA.....	11
4.3 EVALUACIÓN DE LA USABILIDAD DE LOS MODELOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA COLOMBIA .....	12
5. SELECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS .....	16
5.1 ANÁLISIS DE LOS MODELOS CLIMATOLÓGICOS QUE APLICAN PARA COLOMBIA.....	19
5.2 MODELOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS, PERTINENTES PARA COLOMBIA Y DISPONIBLES PARA DESCARGA .....	20
5.3 SELECCIÓN DEL GCM .....	24
DESCRIPCIÓN DE LOS GCM SELECCIONADOS .....	26
5.4.....	26
6. DISPONIBILIDAD DE DATOS DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA .....	28
6.1. SELECCIÓN DE LA VENTANA DE TIEMPO.....	30
7. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS MODELOS.....	33

8. VERIFICACIÓN DE LOS DATOS ESCALADOS .....	37
9. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES.....	53
10. BIBLIOGRAFÍA.....	56



## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 TRAYECTORIA DE CONCENTRACIÓN REPRESENTATIVA (RCP).....	9
TABLA 2 BIBLIOGRAFÍA DISPONIBLE DE ESCALAMIENTOS PARA COLOMBIA .....	16
TABLA 3 LOS 21 GCMS DISPONIBLES PARA LA DESCARGA EN LA PÁGINA DE LA NASA [44]... 21	
TABLA 4 TABLA RESUMEN CON LA EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DISPONIBLES PARA DESCARGA CORRESPONDIENTE AL AR5 .....	25
TABLA 5. DISPONIBILIDAD DE DATOS DE LAS DIFERENTES ESTACIONES Y SELECCIÓN DE LA VENTANA DE TIEMPO .....	32
TABLA 6 LOCALIZACIÓN DE LOS CENTROS DE PIXEL CORRESPONDIENTES A LOS GCMS MIROC5 Y MPI-ESM-LR. ....	33
TABLA 7. PÍXELES QUE PRESENTARON LOS MEJORES RESULTADOS ESTADÍSTICOS PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES. PARA LOS MODELOS MIROC5 Y MPI-ESM-LR.....	37
TABLA 8. RESULTADOS DE MAE Y RMSE PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES Y EL PIXEL EN EL QUE SE ENCUENTRA, PARA EL MODELO MIROC5. ....	39
TABLA 9 RESULTADOS DE MAE Y RMSE PARA CADA UNA DE LAS ESTACIONES Y EL PIXEL EN EL QUE SE ENCUENTRA, PARA EL MODELO MPI-ESM-LR. ....	39

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 . UBICACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO TONA .....	11
FIGURA 2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS ESTACIONES DISPONIBLES .....	30
FIGURA 3 LOCALIZACIÓN DE LOS CENTROS DE PIXEL CORRESPONDIENTES A LOS GCMS MIROC5 Y MPI-ESM-LR.....	35
FIGURA 4. CICLO ANUAL DEL PIXEL 11 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA DE PRECIPITACIÓN PARA EL MODELO MPI-ESM-LR. ....	42
FIGURA 5. CICLO ANUAL DEL PIXEL 3 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA DE PRECIPITACIÓN PARA EL MODELO MIROC5. ....	42
FIGURA 6. CICLO ANUAL DEL PIXEL 12 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA EN LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA EL MODELO MPI-ESM-LR. 43	
FIGURA 7.CICLO ANUAL DEL PIXEL 12 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA EN LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA EL MODELO MIROC5.....	43
FIGURA 8. CICLO ANUAL DEL PIXEL 3 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA EN LA TEMPERATURA MÍNIMA PARA EL MODELO MPI-ESM-LR. ....	44
FIGURA 9. CICLO ANUAL DEL PIXEL 3 Y LA ESTACIÓN DE BERLÍN. REPRESENTACIÓN CON MEJOR CONCORDANCIA EN LA TEMPERATURA MÍNIMA PARA EL MODELO MIROC5. ....	44
FIGURA 11.COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN LA GALVICIA Y EL PIXEL 10 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	48
FIGURA 12.COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 12 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	49
FIGURA 13.COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN DE LA UIS Y EL PIXEL 12 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	49
FIGURA 14.COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN TONA Y EL PIXEL 11 DEL MODELO MPI-ESM-LR DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	50
FIGURA 15.COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 12 DEL MODELO MPI-ESM-LR DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	50
FIGURA 16.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 12 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1990-2003). ....	50
FIGURA 17.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA LA ESTACIÓN DE LA UIS Y EL PIXEL 2 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	51

FIGURA 18.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 12 DEL MODELO MPI-ESM-LR DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1990-2003). .....	51
FIGURA 19.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA PARA LA ESTACIÓN DE LA UIS Y EL PIXEL 2 DEL MODELO MPI-ESM-LR DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	51
FIGURA 20.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 8 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1990-2003). ....	52
FIGURA 21.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA PARA LA ESTACIÓN DE LA UIS Y EL PIXEL 5 DEL MODELO MIROC5 DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1987-2003). ....	52
FIGURA 22.COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA MÍNIMA PARA LA ESTACIÓN DE BERLÍN Y EL PIXEL 3 DEL MODELO MPI-ESM-LR DURANTE LA VENTANA DE TIEMPO (1990-2003). ....	52

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN SANTANDER

**AUTOR(ES):** DIEGO FERNANDO GÓMEZ ESTUPIÑAN  
ANGIE DANIELA RODRÍGUEZ BUITRAGO

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.

### RESUMEN

Este trabajo verifica la usabilidad de las series de datos climatológicos escalados de modelos globales para la modelación hidrológica de cuencas tropicales con el modelo semidistribuido SWAT. A través de una extensa revisión bibliográfica y, teniendo en cuenta su disponibilidad de datos diarios, se identificaron los MCGs MIROC5 Y MPI-ESM-LR como relevantes para representar el clima de Colombia. Se realizó una comparación de los datos de precipitación y temperatura (máxima y mínima) de estos MCG de resolución  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ , con las series puntuales de estaciones climáticas suministradas por el IDEAM, CDMB y amb, en el período comprendido entre 1987 y 2003. Para esta comparación se estimaron diferentes parámetros estadísticos, entre los que se encuentran, el error medio absoluto, la raíz del error medio cuadrático, el índice de concordancia, el error sistemático (BIAS), y el coeficiente de correlación de Pearson. Con el Modelo MIROC5 se obtuvieron resultados más favorables de precipitación para las estaciones de La Galvicia, La UIS y Berlín, y en temperatura mínima para las estaciones de La UIS y Berlín, mientras que el MPI-ESM-LR mostró un mejor desempeño en temperatura máxima para las estaciones de La UIS y Berlín, y en precipitación para la estación de Tona.

### PALABRAS CLAVE:

MCG, precipitación, temperatura, cambio climático, MIROC5, MPI-ESM-LR

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** APPLICABILITY OF SCALED CLIMATOLOGICAL DATA FOR THE HYDROLOGICAL MODELING OF THE TONA RIVER BASIN IN SANTANDER

**AUTHOR(S):** DIEGO FERNANDO GÓMEZ ESTUPIÑAN  
ANGIE DANIELA RODRÍGUEZ BUITRAGO

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Ing. SERGIO MANUEL PINEDA VARGAS PhD.

### ABSTRACT

This work verifies the usability of climatic climatological data series scaled from global models for the hydrological modeling of tropical basins with the semi-distributed SWAT model. Through an extensive bibliographic review and, taking into account their availability of daily data, MCGs MIROC5 and MPI-ESM-LR were identified as relevant to represent the Colombian climate. A comparison of the precipitation and temperature data (maximum and minimum) of these GCs of resolution  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  was made, with the punctual series of climatic stations supplied by the IDEAM, CDMB and amb, in the period between 1987 and 2003. For this comparison, different statistical parameters were estimated, among which are the absolute average error, the root of the mean square error, the concordance index, the systematic error (BIAS), and the Pearson correlation coefficient. With the MIROC5 model, more favorable precipitation results were obtained for the La Galvicia, UIS and Berlin stations, and at minimum temperature for the UIS and Berlin stations, while the MPI-ESM-LR showed a better performance in temperature maximum for the UIS and Berlin stations, and in precipitation for the Tona station .

### KEYWORDS:

GCM, precipitation, temperature, climate change, MIROC5, MPI-ESM-LR.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

## 1. INTRODUCCIÓN

El río Tona es una de las principales fuentes de abastecimiento de agua potable del área metropolitana de Bucaramanga[1]. Por ello, es esencial comprender el efecto que los fenómenos antrópicos puedan tener en la producción hídrica de su cuenca hidrográfica, mediante estudios apropiados y actualizados. Este tipo de estudios pueden implementarse usando software como SWAT, un modelo hidrológico semidistribuido que requiere, como uno de los datos de entrada principal, información climatológica en forma de series de tiempo de precipitación y temperatura. Dado que esta cuenca es de alto interés para la empresa prestadora del servicio de acueducto (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, amb), existen algunas estaciones pluviométricas localizadas en ciertos puntos de la cuenca que colectan este tipo de información [2]. Adicionalmente, existen algunas estaciones de propiedad del IDEAM que podrían ser usadas para la modelación [3]. Sin embargo, no hay una uniformidad en la ventana de tiempo que cubre cada una de las estaciones y solo dos de ellas (estaciones climatológicas principales del IDEAM) han recolectado datos de temperatura [2].

Aun en países desarrollados, es difícil y costoso mantener redes de monitoreo climatológico con alta resolución espacial y temporal por lo que se ha fortalecido el uso de datos climatológicos escalados de modelos climatológicos globales [4]. Especialmente en estos países, el acceso y uso de este tipo de información ha permitido modelar hidrológicamente cuencas hidrográficas para evaluar su respuesta tanto para condiciones climatológicas presentes como para futuras [5]. Este contexto, y la necesidad de evaluar escenarios futuros de producción hídrica, hacen dirigir nuestra mirada a la posibilidad de usar datos climatológicos escalados para llevar a cabo la modelación en la cuenca del río Tona.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) es un órgano científico que, desde 1988, se ha encargado de evaluar la bibliografía científica, técnica y socioeconómica relacionada con el cambio climático [6]. En el marco de ese proceso el IPCC ha publicado cinco informes de evaluación de estos avances, los dos últimos, AR4 y AR5, presentando un reporte especial de escenarios de emisiones (SRES, Special Report on Emissions Scenarios) y el proyecto de intercomparación de escenarios acoplados (CMIP, Coupled Model Intercomparison Project) [7]. Para el caso del informe AR5, el CMIP5 y el SRES reúnen modelos

climatológicos que proporcionan simulaciones a largo plazo del clima del siglo XX y proyecciones para los siglos siguientes; estos modelos se diseñaron simulando el sistema océano-atmósfera y algunos de estos incluyen la atmósfera, el océano, la vegetación y el ciclo del carbono.

Los modelos climatológicos son una herramienta que permite obtener datos de series de tiempo pasadas con las cuales se puede realizar una proyección climática futura. Sus principales desarrolladores son instituciones universitarias y centros meteorológicos y de investigación por lo que estos desarrollos están sujetos a las necesidades e intereses de cada institución en particular [4]. Por estas razones, los resultados de cada modelo son únicos y en consecuencia es fundamental conocerlos para identificar el modelo con mayor semejanza en los elementos físicos principales (precipitación y temperatura) para el sitio de estudio. Los modelos objeto de estudio de este proyecto son los que corresponden a los implementados en el cuarto y quinto informe de evaluación (AR4 y AR5) del IPCC.

Varios estudios se han dedicado a evaluar la pertinencia de dichos modelos climatológicos a diferentes regiones del planeta y el caso de Colombia no es la excepción [8]. Del mismo modo, ha habido esfuerzos para refinar la resolución de dichos modelos de tal manera que se puedan hacer análisis regionales [9]. Dado que en Colombia existe una gran variabilidad climatológica influenciada por diversos factores como la topografía y la circulación atmosférica [1] [2], se hace necesario determinar hasta qué nivel, o bajo cuál incertidumbre, los datos climatológicos escalados pueden sustituir y/o complementar los datos de las estaciones climatológicas existentes. El objetivo de este trabajo fue analizar si los datos de precipitación y temperatura obtenidos de modelos climatológicos globales escalados, se comparan, en algún nivel, con los datos de campo; de tal manera que estos datos escalados puedan suplir la información de campo cuando esta no está disponible (por ejemplo, para la calibración y validación de modelos hidrológicos en cuencas que no tienen estaciones de monitoreo de clima) y/o para modelar escenarios futuros. Para hacer esta verificación, empleamos diferentes estadísticos (desviación absoluta media de los datos observados, error medio absoluto, raíz del error medio cuadrático, índice de concordancia, error sistemático sesgo o BIAS, coeficiente de correlación de Pearson y coeficiente de determinación) que se compararon con la literatura existente.

## **1.1. Hipótesis**

El clima de la Tierra ha presentado variaciones a través de la historia y se considera que en los últimos 650.000 años han ocurrido siete ciclos de avance y retroceso glacial. Este cambio se ha venido presentando con mayor frecuencia, generando el aumento o la disminución de variables medibles como la precipitación y la temperatura, ocasionando inundaciones, deshielos, deslizamientos de tierra, entre otros[10]. Es importante entonces estudiar a profundidad el clima para conocer, planear y mitigar los posibles cambios que puedan ocurrir; para hacer posible el estudio de escenarios futuros, se hacen necesarios datos de estaciones pluviométricas que brinden series de tiempo de precipitación y temperatura, sin embargo estos estudios suponen una gran inversión por parte del estado.[11]

Los modelos climatológicos escalados son una solución al planteamiento anterior porque, entre otras cosas, mejoran la resolución de los GCM, proporcionando mayores detalles en la distribución de clima y ofrecen información climatológica de series históricas y posibles escenarios futuros. También pueden considerar la influencia de diversas variables como los diferentes sistemas sociales y ambientales, y su capacidad de mitigación o adaptación al cambio, que puede contribuir a la identificación de extremos climáticos de la región analizada, además de ser de gran ayuda para estudios de impacto y vulnerabilidad.[12]



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Verificar la usabilidad de las series de datos climatológicos escalados de modelos climatológicos globales para la modelación hidrológica de una cuenca tropical usando el modelo semidistribuido SWAT

### **2.2 Objetivos específicos**

- Identificar los modelos climatológicos globales con más relevancia para Colombia a partir de una revisión bibliográfica.
- Evaluar la disponibilidad de datos climatológicos escalados (precipitación y temperatura) para la zona de estudio haciendo énfasis en la técnica de escalamiento usada, la ventana de tiempo disponible y su frecuencia.
- Verificar la comparabilidad entre los datos climatológicos obtenidos en campo y los obtenidos por el proceso de escalamiento a través de análisis estadísticos.

### 3. MARCO TEÓRICO

Los **modelos climatológicos globales (GCM** por su sigla en inglés) han servido para comprender los procesos macro que determinan el clima a escala global y las relaciones que existen entre las actividades humanas y nuestro planeta. Desde el siglo XIX se han desarrollado modelos matemáticos de balance energético y transferencia radiativa; a mediados del siglo pasado (1950's) se empezaron a desarrollar modelos computacionales de circulación general global; y desde la última década del siglo pasado (1990's) se han desarrollado modelos integrados de todo el sistema climático [5]. En este escenario, instituciones internacionales han desarrollado modelos generales de circulación atmósfera-oceano para simular la dinámica climatológica en diversos reservorios del planeta, para realizar proyecciones que obedecen a diferentes escenarios futuros. El **Panel Intergubernamental de Cambio Climático** (Intergovernmental Panel on Climate Change, **IPCC**) es la entidad que se ha encargado de consolidar, analizar, y comparar estos modelos, a partir de las investigaciones y modelaciones realizadas por las distintas comunidades científicas. Desde el año 1990 el IPCC ha emitido cinco informes de evaluación (el último informe, Assessment Report No. 5, AR5, fue publicado en 2014 [13]). Estos informes de evaluación se enfocan en presentar la base científica actualizada (grupo de trabajo I), el análisis de los impactos del cambio climático de acuerdo a la base científica (grupo de trabajo II), y una propuesta de mitigación (grupo de trabajo III).

Las predicciones de los modelos climatológicos para América Central y del Sur muestran tendencias significativas en precipitación y temperatura, así como cambios en la variabilidad climática y eventos extremos que han afectado la región [14]. Entre las observaciones importantes se pueden mencionar un calentamiento general entre 0.7°C - 1.0°C desde la mitad de la década de los 70's y un incremento de las temperaturas extremas en la mayoría de América del Sur tropical y subtropical. Para el año 2100, los modelos climatológicos predicen un aumento en la temperatura del aire entre 1.7°C - 6.7°C en América del Sur, y un aumento en los períodos de sequía y en el número de días y noches calurosos. Finalmente, los cambios en los patrones de precipitación y la desaparición de los glaciares afectarán la disponibilidad de agua para la agricultura, el consumo humano y la generación de Energía. Estos impactos negativos se pueden exacerbar por los cambios descontrolados de los usos del suelo (expansión de la frontera agrícola y urbana) que debilitan la capacidad de los ecosistemas para amortiguar los efectos del cambio climático [14].

En el marco de las proyecciones para América Central y Sur, se hace necesario entonces profundizar en los modelos climatológicos que pueden proveer efectivamente información sobre los efectos del cambio climático en Colombia. En el año 2001, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) utilizó el modelo **MM5** [15, p. 5] para simular incrementos de la temperatura con escenarios del AR3 y estimar un posible aumento del nivel del mar en las zonas costeras de Colombia [16]. En el año 2007 esta institución utilizó el modelo japonés **MRI-CGM2.3** [17] para desarrollar proyecciones de precipitación para Colombia bajo el escenario A1B [18]. En el año 2010, nuevamente el IDEAM realizó una evaluación de 20 de los 22 modelos globales de circulación (Global Circulation Models, GCM) analizados por el IPCC en su informe de evaluación No. 4 (AR4) [12]. Este estudio destaca la capacidad del modelo **ECHAM5** del Max Planck Institute for Meteorology (Alemania) [19], para simular el clima presente de Colombia. Finalmente, en el año 2012, el IDEAM realizó una evaluación de las simulaciones de precipitación y temperatura de los GCM del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project) [20], encontrando que los modelos que mejor se ajustaron a las condiciones presentes de precipitación y temperatura son el **CCSM4** (National Center for Atmospheric Research NCAR), **MPI-ESM-LR** (Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)), **HadCM3** (Met Office Hadley Centre) y **CNR-CM5** (Centre National de Recherches Météorologiques / Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique).

Así mismo, existen otros estudios que han implementado diferentes GCM para la zona tropical donde se encuentra ubicada Colombia. Por ejemplo, en el 2008 Acevedo y Poveda [21] hicieron un análisis comparativo entre cuatro modelos (ECHAM5, CCSM3, HADGEM1 y MIROC3.2) y series puntuales de precipitación (1950-1999), encontrando que los modelos estudiados sobreestiman la precipitación en la región de estudio. Palomino-Lemus et al. [22] utilizaron el modelo **MIROC5** [23] para simular la precipitación de verano en Colombia para clima presente, usando la técnica de escalamiento “regresión de componentes principales” (principal component regression, PCR), encontrando resultados favorables con una buena resolución lo que genera un porcentaje de incertidumbre menor y valida la información obtenida permitiendo comparar los datos de campo con los del modelo escalado. Finalmente, en el 2017 Bonilla-Ovallos y Mesa [9] evaluaron la precipitación histórica de 16 modelos del CMIP5 con precipitaciones observadas, encontrando que el modelo **CMCC-CMS** (Centro Euro-Mediterráneo Per I Cambiamenti Climatici) fue el que pudo acercarse más a representar adecuadamente el ciclo anual de precipitación, aunque ninguno de los

modelos evaluados cumplió exitosamente este objetivo. Vale la pena aclarar que el componente atmosférico de CMCC-CMS es el modelo ECHAM5 identificado por Rodríguez [12] como el modelo capaz de simular el clima presente de Colombia.

Adicionalmente, el **downscaling o reducción de escala** es un conjunto de técnicas para obtener predicciones regionales del clima a partir de GCM [24]. Estas técnicas ofrecen la posibilidad de obtener datos climatológicos de alta resolución (comparado con el carácter disperso o poco denso de las estaciones climatológicas en la mayoría de regiones del mundo) que sirven como información de entrada para estudios regionales como es el caso de modelamiento hidrológico de cuencas [24], [25], [26]. El éxito de la reducción de escala depende en gran medida de la selección del GCM apropiado para la zona de estudio [24], [26]. La reducción de escala se puede desarrollar mediante diferentes métodos; entre los más usados se encuentran la reducción dinámica y la reducción estadística [14]. La reducción dinámica requiere de sistemas computacionales intensivos y la ejecución de modelos climatológicos de alta resolución [18]. Por otra parte, la reducción estadística requiere de un conjunto de datos históricos de estaciones meteorológicas para obtener la relación existente con el modelo climatológico global, para poder hacer una correcta calibración y luego ser proyectados bajo los diferentes escenarios establecidos por el IPCC[27]. Por esta razón se puede desarrollar este método en zonas con poca información y poder garantizar una baja incertidumbre [19].

Estudios realizados por diferentes instituciones permiten ver los resultados obtenidos aplicando las diferentes técnicas de escalamiento. La fundación para la investigación del clima (FIC) [28] desarrolló una metodología de *downscaling* estadístico denominado “FICLIMA” [29] con buenos resultados reconocidos en Europa en el proyecto STARDEX como una de las más potentes [30],[25]; el IDEAM realizó, mediante el método estadístico, la evaluación de 20 de los 22 modelos del IPCC implementados en AR4 para determinar la capacidad de los modelos climáticos globales de representar adecuadamente el ciclo anual del clima de Colombia y así generar una representación más precisa de los escenarios futuros en el país [12]. La Universidad Nacional de Colombia UNAL realizó una comparación de series de precipitación con algunos GCM del informe AR4 del IPCC, utilizando el *downscaling* estadístico donde se pudo concluir que los modelos climatológicos globales de baja resolución son capaces de simular bien las características de la circulación atmosférica en general [31]. Además el IDEAM y la UNAL realizaron un proyecto piloto

nacional de adaptación al cambio climático (INAP) con el objetivo de determinar los incrementos de temperatura superficial utilizando PRECIS (Providing Regional Climate Scenarios for Impacts Studies), un modelo dinámico utilizado para mejorar la resolución espacial de los resultados de los modelos globales del clima, que utiliza como entrada los datos de un modelo global de 150x150 km y genera datos más detallados de 50x50 km a 25x25 km. Utilizando este modelo generaron proyecciones para la segunda mitad del siglo XXI en diferentes regiones de Colombia [32].

Los **escenarios** presentados por el IPCC corresponden a emisiones futuras de gases de efecto invernadero y se encuentran compuestos de sistemas dinámicos complejos, que a su vez se hallan definidos por variables como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico. Ya que el comportamiento climatológico futuro es muy incierto, los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y establecen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán dichas variables determinantes en las emisiones futuras, permitiendo evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático, y en particular para la creación de modelos climatológicos; además permiten realizar un diagnóstico de los impactos y la generación de iniciativas para adaptación y la mitigación [33].

El IPCC en su quinto informe del año 2013 (AR5) presentó cuatro nuevos escenarios para evaluar el cambio climático denominados trayectorias de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés), caracterizadas por su forzamiento radiativo (FR) [27] (ver Tabla 1). El FR es el cambio positivo o negativo en la radiación (calor) debido a la concentración de gases de efecto invernadero, generando cambios en el sistema climático [27]. El FR puede deberse a cambios en la radiación solar incidente, a incrementos en la concentración de especies activas radiativas como aerosoles, o a cambios en las propiedades reflectivas superficiales del planeta que alteran el balance energético de la tierra. El FR es medido por el cambio en el flujo neto, es decir en la vertical, en algún nivel específico en la atmósfera, en respuesta a una perturbación [34]. Si el cambio es positivo es decir un FR positivo, aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> elevando la temperatura en el planeta. Si por el contrario el FR es negativo, se reduce la concentración de CO<sub>2</sub> y la temperatura de la tierra disminuiría. Por tal razón los escenarios del IPCC proponen un RCP decreciente o favorable (RCP 2.6), uno estable (RCP 4,5) uno creciente (RCP 6.0) y uno creciente a un mayor ritmo o menos favorable (RCP 8.5).

Tabla 1 Trayectoria de concentración representativa (RCP). El IPCC ha definido un conjunto de 4 escenarios nuevos que se caracterizan por el cálculo aproximado que hacen del forzamiento radiativo (FR) total en el año 2100 en relación con 1750.

<b>Forzamiento Radiativo (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Trayectorias de concentración representativas</b>
<b>2.6</b>	RCP 2.6
<b>4.5</b>	RCP 4.5
<b>6.0</b>	RCP 6.0
<b>8.5</b>	RCP 8.5

Fuente: los autores

## **4. METODOLOGÍA**

El trabajo desarrollado requirió el conocimiento del área de estudio en cuanto a sus propiedades físicas, su localización geográfica, el reconocimiento de su importancia para la provisión de agua para el área metropolitana de Bucaramanga, y la información hidroclimatológica existente que pudiera servir para el cumplimiento de los objetivos del estudio. Por otra parte, fue necesario realizar una revisión bibliográfica que pudiera darnos un contexto sobre los modelos climáticos globales y su potencial aplicación para la solución de problemas regionales a partir del escalamiento de los mismos. Finalmente, el ejercicio de verificación de la usabilidad de los datos climáticos escalados requirió la revisión de diferentes metodologías estadísticas para así poder emitir conclusiones.

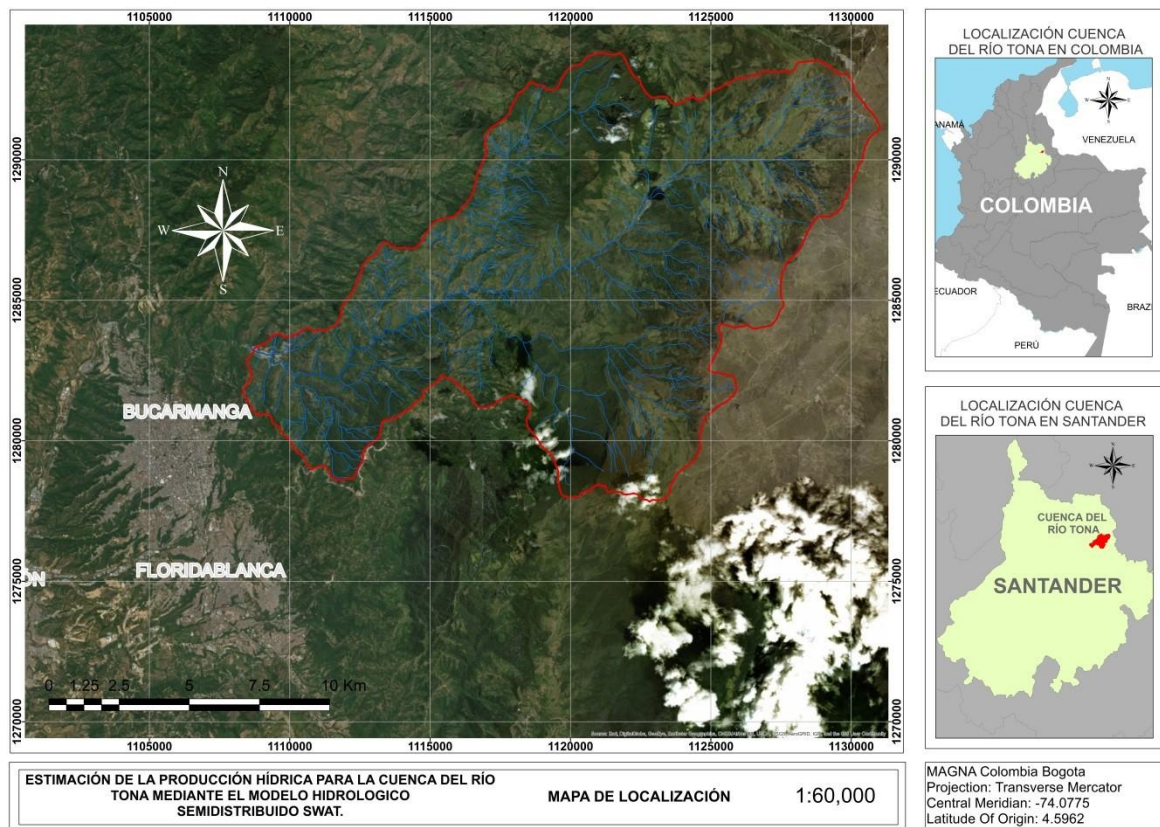
### **4.1 Definición del área de estudio y su información disponible**

La cuenca del río Tona se encuentra ubicada al nordeste del departamento de Santander, Colombia, con un área de 195 km<sup>2</sup> y una longitud de cause de 26 km cuya pendiente es de 12% y con una longitud hidráulica de 28 km. Desemboca en el río Suratá, posee un alto poder erosivo y de arrastre, con una escorrentía de 49% debido a que esta cuenca se caracteriza por su topografía montañosa y posee pendientes del 3 al 72%, con una cota inferior que corresponde a 800 msnm y una cota superior de 3.890 msnm [1], [2].

La cuenca es de gran importancia para el acueducto metropolitano de Bucaramanga debido a que es una de las principales fuentes de agua, garantizándole a la compañía un caudal mínimo confiable de 750 l/s [35], donde sus afluentes principales corresponden a las quebradas de Arnania, Carrizal y Golondrinas [2].

En la Figura 1 podemos observar la localización de la cuenca del río Tona y su cercanía y proporción espacial con el área metropolitana de Bucaramanga.

Figura 1 . Ubicación de la cuenca del río Tona



Fuente: Gustavo Carrillo, estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana

#### 4.2 Revisión bibliográfica sobre la aplicabilidad de los modelos climatológicos escalados para Colombia

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica cuyo objetivo era la identificación de la eficiencia de los diferentes Modelos Climáticos Globales (GCM por su sigla en inglés) para el territorio Colombiano, pertenecientes a los diferentes informes AR4 y AR5 del IPCC, en donde se identificaron 36 GCMs con sus respectivos resultados de precipitación y en su mayoría de temperatura, de los cuales 20 pertenecían al AR4 y 16 al AR5. Con la información disponible se hizo posible la identificación de aquellos GCMs con mayor relevancia.

Esta comparación se encuentra disponible en el Anexo1 a través de una tabla que presenta un análisis cualitativo del comportamiento de cada uno de los modelos para los diferentes



autores tanto para precipitación como temperatura. Además esta tabla presenta las características de los GCMs en donde se evidencia la diferencia entre la resolución de cada uno de estos, debido a los diversos métodos que se emplean para modelar los procesos físicos a través de ecuaciones. Es por esto que sus productos difieren, reflejando la incertidumbre presentada. De esta manera obtuvimos los resultados de cada uno de los GCMs, con los que se procedió a seleccionar aquellos con los resultados más sobresalientes tanto para temperatura como para precipitación.

#### **4.3 Evaluación de la usabilidad de los modelos climatológicos escalados para Colombia**

Se evaluó la capacidad de desempeño de los modelos seleccionados sobre la geografía de interés que corresponde a la cuenca del río Tona en el departamento de Santander, Colombia. Fue necesario realizar una comparación de la serie de tiempo regional a escala mensual para los modelos, con respecto a las estaciones puntuales alrededor de la cuenca [11], [36]. Para ello fue necesario el siguiente procedimiento:

- a. A partir de los resultados de los modelos más relevantes con información de todo el planeta se seleccionó una ventana espacial rectangular correspondiente al área de estudio para extraer la información de precipitación y temperatura; considerando el período comprendido entre el primero de enero de 1987 al treinta y uno de marzo de 2013. Se seleccionó este periodo de tiempo dado que cuenta con mayor número de datos de estaciones pluviométricas y de resultados generados por el modelo.
- b. Posteriormente se procedió a la estimación de las medidas de error usando diferentes estadísticos (desviación absoluta media de los datos observados - MAD; el error medio absoluto - MAE; la raíz del error medio cuadrático - RMSE; el error sistemático, sesgo o BIAS; el índice de concordancia – dr)[9].
- c. Se realizó entonces, el análisis de correlación que permitió describir mediante una función matemática el grado de dependencia entre el clima y la simulación. La correlación lineal es la más utilizada y el coeficiente de correlación lineal de Pearson permite estudiar el grado de asociación lineal entre dos variables [11], así:

- **Coeficiente de correlación de Pearson (r)**

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}, \quad [37]$$

donde:

$P_i =$  valor simulado

$(\bar{P}) =$  promedio del valor simulado

$O_i =$  valor observado

$(\bar{O}) =$  promedio del valor observado

$n =$  número de datos

- **Coeficiente de determinación ( $r^2$ )**

$r^2$  mide la fracción de la varianza de las observaciones explicada por el modelo.

A continuación se describe cada uno de los estadísticos para la estimación de la medida de error:

**Desviación absoluta media de los datos observados (MAD)**

La desviación media absoluta se emplea cuando se requiere que los valores extremos no afecten demasiado al valor de la desviación.

$$MAD = \frac{1}{n} \sum |O - \bar{O}|,$$

donde:

$O_i =$  valor observado

$(\bar{O}) =$  promedio del valor observado

$n =$  número de datos

### **Error medio absoluto (MAE)**

El error medio absoluto se define como la diferencia entre un valor medido y un valor de campo; calcularlo nos permite diferenciar cuál punto de referencia del modelo escalado brinda una mejor información, más acercada a los datos de reales, por esta razón, la diferencia o el valor óptimo debe ser 0.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i|, \quad [38]$$

donde:

$P_i =$  valor simulado

$O_i =$  valor observado

$n =$  número de datos

### **Raíz del error medio cuadrático (RMSE)**

La raíz de error medio cuadrático corresponde a la comparación de los resultados del GCM ( $P_i$ ), con los obtenidos de las estaciones ( $O_i$ ). Este estadístico se apoya en las características centrales de los errores del modelo  $P_i - O_i$ , al igual que el MAE que presentan las mismas características, el RMSE tiene con valor óptimo en 0. [38]

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}},$$

donde:

$P_i =$  valor simulado

$O_i =$  valor observado

$n =$  número de datos

### Índice de concordancia ( $dr$ )

El índice de concordancia  $dr$  (adimensional) calcula la suma de la proporción de las diferencias entre los datos observados y las predicciones del modelo (MAE) en comparación con la sumatoria de las desviaciones de un modelo ideal más las desviaciones de las observaciones (MAD), como se muestra a continuación:

$$dr \begin{cases} 1 - \frac{MAE}{2MAD}, & MAE \leq 2MAD \\ \frac{2MAD}{MAE} - 1, & MAE > 2MAD \end{cases},$$

El valor de este indicador para un modelo ideal es 1; un valor de 0,5 indica que el MAE es la mitad del MAD; un valor de 0 indica que el MAE es equivalente al MAD; los valores negativos del indicador significan que el MAE es mayor que el doble de MAD [39]

### Error sistemático, sesgo o BIAS (BN)

El indicador BN es ocasionado por un error constante, no atribuible al factor que se está estudiando. Se considera como el promedio de los valores conservando el signo y Un valor de cero indica ausencia de sesgo en promedio, no necesariamente ausencia de error [6][9].

$$BN = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)$$

donde:

$P_i$  = valor simulado.

$O_i$  = valor observado.

$n$  = número de datos.

## 5. SELECCIÓN Y OBTENCIÓN DE LOS DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS

En respuesta al primer objetivo se realizó una revisión bibliográfica que permitió identificar los estudios que han realizado escalamientos para el territorio Colombiano (ver Tabla 2 y Tabla 4). El primero de estos documentos fue publicado en el 2008, mientras que el más reciente se publicó en el 2017; por esta razón contamos con modelos pertenecientes al AR4 y AR5 del IPCC. Dentro de las instituciones o centros que han trabajado en escalamientos para el territorio colombiano se pueden resaltar la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Los modelos más utilizados dentro de estos estudios han sido CCSM3, ECHAM5 y HADGEM1 para el AR4 y en el caso del AR5 el MIROC5, MPI-ESM-LR Y HadGEM2-ES.

*Tabla 2 Bibliografía disponible de escalamientos para Colombia.*

Autor	AÑO	Título del documento	Entidad/universidad/centro que hizo la investigación
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Germán Poveda Jaramillo</li> <li>• Lina Alexandra Acevedo Aristizábal</li> </ul>	2008	Comparación de series de precipitación con los GCM CCSM3, HADGEM1 y MIROC 3.2 HIRES, para el siglo XX en Colombia .[31].	UNAL (Universidad Nacional de Colombia)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lina Alexandra Acevedo Aristizábal</li> </ul>	2009	Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia .[11].	UNAL (Universidad Nacional de Colombia)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andrea Rodríguez Roa</li> </ul>	2010	Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia.[12].	IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)

Autor	AÑO	Título del documento	Entidad/universidad/centro que hizo la investigación
· Blanca Elvira Oviedo Torres	2010	Guía de procedimiento para la generación de escenarios de cambio climático regional y local a partir de los modelos globales.[40].	IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Julian Ramirez Villegas</li> <li>• Andrew J Challinor</li> <li>• Philip K Thornton</li> <li>• Andy Jarvis</li> </ul>	2013	Implications of regional improvement in global climate models for agricultural impact research.[41].	International Center for Tropical Agriculture (CIAT), Cali, Colombia CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS), Denmark Institute for Climate and Atmospheric Science (ICAS), School of Earth and Environment, University of Leeds, Leeds, UK International Livestock Research Institute (ILRI), Nairobi, Kenya
· Futurewater	2014	Climate adaptation Colombia. [42].	FutureWater SarVision UNESCO-IHE Deltares

Autor	AÑO	Título del documento	Entidad/universidad/centro que hizo la investigación
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Andrés Vélez</li> <li>• Andrés Ochoa</li> <li>• Germán Poveda</li> </ul>	2014	Validación de temperaturas medias mensuales del eta CPTEC/HADCM3 en Colombia para el escenario 20C3M. [43].	UNAL (Universidad Nacional de Colombia)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guillermo Eduardo Armenta Porras</li> <li>• Jennifer Dorado Delgado</li> <li>• Andrea Onelia Rodríguez Roa</li> <li>• José Franklyn Ruiz Murcia</li> </ul>	2014	Escenarios de cambio climático para precipitación y temperaturas en Colombia. [18]	IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reiner Palomino Lemus</li> <li>• Samir Córdoba Machado</li> <li>• Sonia Raquel Gámiz Fortis</li> <li>• Yolanda Castro Díez</li> <li>• María Jesús Esteban Parra</li> </ul>	2014	Statistical downscaling of summer precipitation in Colombia [24]	University of Granada, Granada, Spain
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia [44].	UNAL (Universidad Nacional de Colombia)

Fuente: autores

## **5.1 Análisis de los modelos climatológicos que aplican para Colombia**

Basados en el análisis realizado a cada uno de los documentos de la Tabla 2, elaboramos una nueva tabla que presenta el desempeño de cada uno de los GCM, tanto del CMIP3 del AR4 como del CMIP5 del AR5 en el territorio Colombiano, disponible en el Anexo 1. De esta manera se pudo comparar los diversos resultados para un mismo modelo con el objetivo de comprobar su eficiencia. Esta nueva tabla contiene la resolución de cada uno de estos modelos y adicionalmente presenta el país y centro desarrollo, así como el año de publicación de cada uno de los documentos que realizó la evaluación junto con las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) o escenario disponible que varía según el informe del IPCC en el que se encuentra disponible.

Se evaluó el desempeño de los modelos separando las variables de precipitación y temperatura, debido a que muchos de los análisis realizados solo contaban con uno de los factores. Además en algunos casos se evidencia la discrepancia en los resultados de dichas variables para un mismo modelo. Ya que en este proyecto se requiere de un GCM capaz de simular adecuadamente cada uno de estos parámetros se tomó dicha determinación; para esta evaluación utilizamos tres colores: verde, amarillo y rojo, que representan la simulación eficiente, intermedia y deficiente, respectivamente.

La selección del desempeño se realizó basado en el resultado obtenido en cada documento, en donde en aquellos en los que el autor realiza la comparación entre los diversos modelos se le otorga color verde a los que tuvieron un mejor comportamiento, amarillo a aquellos que no sobresalieron y rojo a los que tuvieron un desempeño negativo; en aquellos casos en que el documento solo evaluaba un modelo se tiene en cuenta la opinión del autor acerca del comportamiento de este además de los resultados que el modelo generó, debido a que el autor no realiza una comparación con los demás modelos existentes.

Con el objetivo de definir el grupo de modelos que posee mayor capacidad de reproducir el comportamiento de los factores climatológicos entre SRES (Special Report on Emissions Scenarios) perteneciente al CMIP3 del AR4 y el CMIP5 del AR5, se investigó acerca del proyecto CMIP (Coupled Model Intercomparación Project) desarrollado por el IPCC, que se encarga de la recopilación de los GCM que generan una infraestructura de apoyo en la comunidad científica, al proporcionar acceso a los datos de los diferentes GCM así como su validación e intercomparación. Gracias a la participación de la comunidad internacional



y al análisis sistemático se ha logrado una mejora importante en los GCM. El proyecto CMIP inicio en 1995 y se han generado diferentes versiones de este siendo la más reciente el CMIP5, donde en su primera versión el CMIP realizo una recopilación "control runs" en el que el forzamiento climatológico era constante, posteriormente se recopilan los resultados de los escenarios teorizando el calentamiento global a través del aumento del CO2 atmosférico [45]. El CMIP en su tercera entrega CMIP3 proporciono el uso de escenarios más reales para el forzamiento climatológico presente y pasado, demostrando que las estimaciones recientes cuentan con mayor robustez [46].

El École Polytechnique Université Paris realizó una comparación entre el CMIP5 (AR5) y su predecesor el CMIP3 (AR4) para 5 regiones del mundo entre las que se encontraba la cordillera de los Andes, en el que el CMIP5 obtuvo un aumento en la precisión del 5-15% para las temperaturas medias climatológicas, y del 3-5% para el rango diurno climatológico. Este aumento en la precisión es consistente en todos los meses del año. Las ganancias en la habilidad para reproducir la precipitación estacional se limitan a la temporada Junio, Julio y Agosto, con un aumento del 1-2%. Es relevante destacar que el CMIP5 en comparación con el CMIP3 demostró una mejora aunque las diferencias no son grandes [41]. Por esta razón se empleó el grupo de modelos del CMIP5 para seleccionar el de mejor comportamiento.

## **5.2 Modelos climatológicos escalados, pertinentes para Colombia y disponibles para descarga**

Después de revisar diferentes fuentes de datos escalados, decidimos que el proyecto Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) [47], era la fuente más adecuada por la resolución de la información ofrecida. NEX-GDDP ofrece proyecciones escaladas para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 de los 21 modelos que, en el marco del CMIP5, produjeron datos diarios de temperatura y precipitación para el período 1950-2100. El objetivo del NEX-GDDP es proporcionar estos datos a la comunidad científica para impulsar el desarrollo de estudios sobre el impacto de los cambios climáticos a escalas locales y regionales.

Cada proyección climática disponible cuenta con datos diarios de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación de 1950 a 2005 para ejecución retrospectiva, y de 2006 a 2099 para ejecución de prospectiva para los escenarios RCP 4.5 Y RCP 8.5 [47]. La

resolución espacial de estos modelos escalados es de 0.25 grados (~ 25 km x 25 km). La Tabla 3 presenta el listado de cada uno de los modelos junto con el centro o institución que lo desarrolló.

*Tabla 3 Los 21 GCMs disponibles para la descarga en la página de la NASA [47].*

Modelos	Centro de desarrollo
ACCESS1.0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Bureau of Meteorology Australia
BNU-ESM	Beijing Normal University China
CCSM4	National Center for Atmospheric Research USA
CESM1-BGC	National Center for Atmospheric Research USA
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique France
CSIRO-Mk3.6	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence Australia
CanESM2	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis Canada
GFDL-CM3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA
GFDL-ESM2G	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA
GFDL-ESM2M	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory USA
IPSL-CM5A-LR	Institut Pierre Simon Laplace France
IPSL-CM5A-MR	Institut Pierre Simon Laplace France
MIROC-ESM-CHEM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan

Modelos	Centro de desarrollo
MIROC-ESM	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Japan
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology Germany
MPI-ESM-MR	Max Planck Institute for Meteorology Germany
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute Japan
NorESM1-M	Bjerknes Centre for Climate Research, Norwegian Meteorological Institute Norway
Bcc-csm1-1	Beijing Climate Center China
Inmcm4	Russian Academy of Sciences, Institute of Numerical Mathematics Russia

Fuente: autores

La necesidad de realizar un escalado (downscaling) de los GCM surge de las limitaciones que poseen estos al generar resultados de simulación global ya que tienden a tener una resolución tosca que no permite obtener resultados detallados en patrones climáticos regionales y locales. Adicionalmente, la mayoría de estos modelos producen buenos resultados globales, pero deficientes localmente al realizar la comparación con las mediciones observadas[48].

La NASA implementó el método conocido como Bias: Correction Statistical Downscaling (BCSD). Un algoritmo de “downscaling” estadístico que verifica los resultados globales de GCM con los datos climatológicos observados durante un periodo simultáneo con el objetivo de ajustar las proyecciones futuras del GCM para generar datos más congruentes con los registros históricos y un escenario más equilibrado para la zona de interés. Asimismo, estos algoritmos emplean los elementos de un dataset (una serie de datos observados) que es producto de observaciones para interpolar GCM a la cuadrícula de mayor resolución [49], y

para la modelación de la superficie terrestre utilizan el Global Meteorological Forcing Dataset (GMFD), el cual combina una serie de datos climatológicos reanalizados con observados generando resoluciones de 0,25°, 0,5° y 1°, disponibles en the Terrestrial Hydrology Group y desarrollados por la Universidad de Princeton. Como resultado del “downscaling” cada proyección climatológica se reduce a una escala de 0,25° \* 0,25° (25Km\* 25km) generando un archivo de 12TB, aproximadamente. Los planteamientos utilizados para la generación del conjunto de datos NEX-GDDP del CMIP5 se utilizaron previamente para los datos del CMIP3 [47], [48].

Al utilizar el BCSD para el “downscaling”, se generan una serie de datos históricos para la serie de tiempo de 1950 a 2005 que no varía para ninguno de los escenarios (RCP 4.5 Y RCP 8.5) del GCM. Este método solo aporta mayor resolución a los modelos del CMIP5 que a su vez contiene los eventos extremos de temperatura para cada uno de estos [47]. El BCSD no ajusta la pendiente de las tendencias de las proyecciones del GCM ya que se conserva la misma para el “downscaling” pero ajusta el desplazamiento de la tendencia climática corrigiendo el sesgo entre los datos escalados y observados, desplazando la serie histórica para que coincidan los datos del GMFD [49]. Estas proyecciones climáticas se pueden justificar cualitativamente pero presentan problemas cuantitativos ya que un cambio lineal de temperatura no es realista debido a que el comportamiento del clima es de naturaleza no lineal, presentando este inconveniente al realizar el “downscaling” especialmente cuando solo se analiza un GCM [48].

### **5.3 Selección del GCM**

La selección del GCM se realizó teniendo en cuenta la disponibilidad de descarga de estos, así como su comportamiento en el territorio Colombiano. De los 21 modelos del (AR5) disponibles para descarga en (NEX-GDDP) y mencionados en la Tabla 3, solo 8 de ellos cuentan con la evaluación del comportamiento de precipitación y temperatura provisto por la revisión bibliográfica realizada en este proyecto, y disponible en la Tabla 4.

Para garantizar logros favorables en este proyecto se tienen en cuenta los resultados obtenidos tanto para precipitación como para temperatura y los modelos con el mejor comportamiento en estas dos variables que corresponden al MIROC5 y MPI-ESM-LR. En estudios realizados por la Universidad Nacional y la Universidad de Granada, validan el GCM MIROC5 para Colombia, dando resultados similares para los dos estudios, donde concluyen que el modelo sobre estima la precipitación en algunos sectores de la nación, pero brinda una correlación alta en la zona de los Andes Colombianos [41]. Por tal motivo este proyecto tiene como objeto el estudio el GCM MIROC5 y el MIP-ESM-LR, ya que brindan una cuadrícula de latitud y longitud de mejor resolución a las mencionadas en la Tabla 4, generando más detalle en el área de estudio.

Tabla 4 Tabla resumen con la evaluación de los modelos disponibles para descarga correspondiente al AR5

MODELO	CENTRO/PAIS DE DESARROLLO	RESOLUCIÓN	RCP O ESCENARIOS DISPONIBLES	AUTOR	AÑO DE PUBLICACIÓN	DESEMPEÑO PRECIPITACIÓN	DESEMPEÑO TEMPERATURA
INMCM4	Institute of Numerical Mathematics.	2,00°x1,50°	RCP4.5, RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación eficiente	/
IPSL-CM5A-LR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	3,75°x1,88°	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación deficiente	/
IPSL-CM5A-MR	Insitut Pierre-Simon Laplace.	2,25°x1,26°	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación deficiente	/
MIROC5	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies and Japan Agency for MarineEarth Science and Technologic.	1,41°x1,41°	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación eficiente	/
				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reiner Palomino Lemus</li> <li>• Samir Córdoba Machado</li> <li>• Sonia Raquel Gámiz Fortis</li> <li>• Yolanda Castro Diez</li> <li>• María Jesús Esteban Parra</li> </ul>	2014	simulación eficiente	simulación eficiente
MIROC-ESM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81°x2,81°	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación deficiente	/
MIROC-ESM-CHEM	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technologic, Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies.	2,81°x2,81°	RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación deficiente	/
MPI-ESM-LR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88°x1,88°	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación eficiente	/
				<ul style="list-style-type: none"> <li>• Philip Kraaijenbrink</li> <li>• Arthur Lutz</li> <li>• Peter Droogers</li> </ul>	2014	simulación eficiente	simulación eficiente
MPI-ESM-MR	Max-Planck-Institut fur Meteorologie	1,88°x1,88°	RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carlos Andrés Bonilla Ovallos</li> <li>• Oscar José Mesa</li> </ul>	2017	simulación eficiente	/

Fuente: los autores

## 5.4 Descripción de los GCM seleccionados

Los modelos MIROC 5 y MPI-ESM LR que hacen parte del CMIP5 del quinto informe de evaluación AR5 del IPCC, fueron seleccionados para realizar la validación en la cuenca del río Tona. A continuación se examinan brevemente sus características generales.

El MIROC 5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate Project, phase 5) fue desarrollado conjuntamente por el CCSR (Center for Climate System Research), University of Tokyo; NIES (National Institute for Environmental Studies); y Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology [4]. Fue diseñado con el objetivo de mejorar la simulación del clima medio, la variabilidad y el cambio climático debido al forzamiento radiativo antropogénico respecto a las versiones anteriores de MIROC [50]. Cuenta con una resolución atmosférica de  $1.4008^\circ$  de latitud por  $1.40625^\circ$  de longitud, El componente oceánico utiliza una cuadrícula de latitud y longitud con resolución longitudinal de  $0,5^\circ$  y latitudinal de  $1.40625^\circ$  entre los polos [51]. Este modelo combina el MIROC3.2 (medres) y el MIROC 3.2 (hires) en la mayoría de sus componentes, a excepción del núcleo dinámico atmosférico. La diferencia entre MIROC5 y los modelos anteriores es mayor que la que existe entre las dos versiones MIROC3.2. Esto indica un mayor efecto en la actualización de los esquemas de parametrización que genera un aumento en la resolución del modelo. Posee una simulación preindustrial de un siglo con la resolución estándar de la atmósfera T85L40 y 18 modelos oceánicos [50], [51]. Las características climatológicas obtuvieron una mejora considerable en la precipitación, campos atmosféricos medios de la zona, los campos subsuperficiales del océano ecuatorial y la simulación de la oscilación de El Niño-Sur [50].

El MPI-ESM LR (Max Planck Institute Earth System Model running on low resolution grid) es un modelo integral terrestre ya que posee componentes para el océano (MPIOM) acoplado por OASIS3, la atmósfera (ECHAM6) y la superficie terrestre (JSBACH). Estos componentes se acoplan a través del intercambio de energía, agua y gases como el dióxido de carbono [52]. Fue desarrollado por Max Planck Institute for Meteorology de Alemania [4], basado en sus predecesores los modelos ECHAM5 y MPIOM, los cuales fueron utilizados para las simulaciones que contribuyen a la tercera fase del proyecto de interoperación de modelo acoplado CMIP3 [52]. Posee una resolución atmosférica de aproximadamente  $1.8653^\circ \times 1.875^\circ$ , una resolución oceánica ortogonal curvilínea de coordenadas latitudinal (i,j) y longitudinal (i,j) y fue utilizado en el CMIP5 [51].

En este sentido, no solo se utilizaron modelos de mayor resolución sino también con un continuo desarrollo que es claramente una cuestión clave para reproducir mejor la variabilidad climática pasada, proyectar el cambio climático futuro y comprender sus comportamientos.



## **6. DISPONIBILIDAD DE DATOS DE LAS SERIES HISTÓRICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA**

Debido a que la cuenca del río Tona es la principal fuente de abastecimiento de agua del área metropolitana de Bucaramanga cuenta con diferentes estaciones hidrológicas y meteorológicas de entes como AMB, IDEAM y CDMB, a pesar de esto, solo 3 estaciones meteorológicas y 6 hidrológicas estuvieron disponibles luego de diversos y exhaustivos trámites. Se implementaron diversas estrategias de extracción de la información en consecuencia se presentó una limitación en cuanto a la información disponible debido a la escases de estaciones climatológicas, no obstante esta información se empleó para realizar la validación de los GCMs con el objetivo de proporcionar resultados congruentes y pertinentes al proyecto.

Colombia posee un déficit histórico de datos climatológicos lo que genera la necesidad de implementar los modelos climatológicos globales con el fin de suplir dicha ausencia pero esta misma impide su adecuada comprobación [9]. Para las necesidades del proyecto se implementaron procesos de interpolación utilizando diversos métodos como el inverso de la distancia al cuadrado y técnicas de promedio que nos permitieron completar las series históricas menores a tres meses con el propósito de realizar la selección de la ventana de tiempo más adecuada evitando un porcentaje de error elevado. En conclusión los datos climatológicos disponibles para la cuenca del río Tona son limitados por consiguiente se redujo la venta de tiempo en la cual no se seleccionaron todas las estaciones disponibles debido a la discordancia temporal existente entre ellas, debido a esto los resultados generados por esta investigación se encuentran condicionados, por ello se recomienda a las entidades encargadas una mayor incorporación y supervisión de los equipos para garantizar eficiencia y calidad de los datos suministrados para estudios futuros.

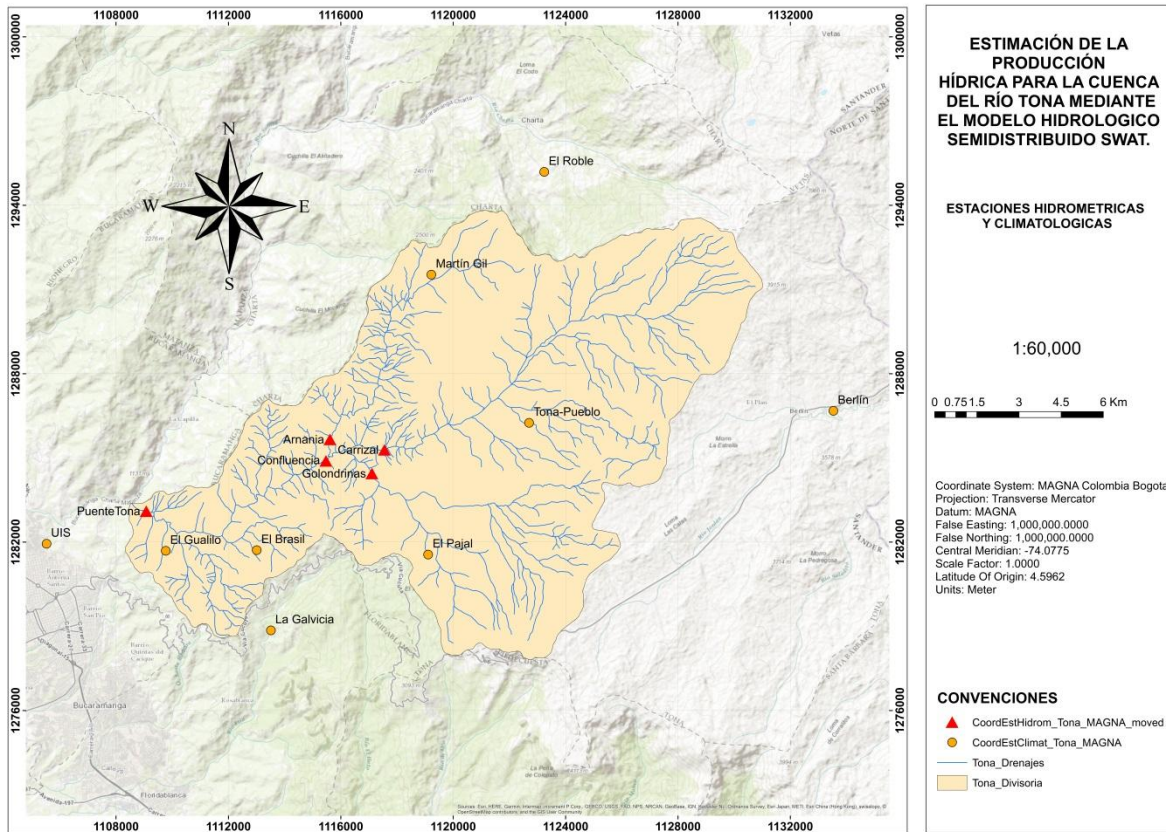
### **Series históricas de precipitación y temperatura**

En respuesta al segundo objetivo y con el propósito de establecer la ventana de tiempo más adecuada para el proyecto, se emplearon una serie de datos históricos climatológicos de precipitación y temperatura provenientes de estaciones con diversas fuentes, la información proporciona (registros diarios) de estaciones hidrológicas y meteorológicas dentro de la zona correspondiente a las coordenadas 7,07,48.38°N a 7,15'50.92°N en latitud y 73,12222222°W a 72,868611111°W en longitud, principalmente en el interior de la cuenca del río Tona y algunas estaciones contiguas. Por otra parte las series de datos de los

registros son variables así como sus periodos de datos faltantes. En la se presenta la distribución espacial de las estaciones utilizadas. Las fuentes que suministraron esta información corresponden a:

- Cuatro estaciones que ofrecen datos de precipitación diaria en formato Excel proporcionados por el amb (Acueducto Metropolitano de Bucaramanga); corresponden a las estaciones de El Brasil, que contiene datos de 1982- 2010 en una carpeta comprimida de 14,3 MB; igualmente la estación Tona con los rangos que comprende los años de 1969 a 1986 con un peso de 15,4MB y la segunda abarca del año 1987 a 2009 con un tamaño de 19,6 MB; El Gualilo con un periodo de tiempo que va de 2007 a 2017 en una carpeta de 13,4 MB y la estación de Martín Gil que contiene los periodos de 1983-1997 y 2006-2017 carpeta comprimida de 13,7MB.
- El IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) proporcionó cuatro estaciones proporcionando datos de precipitación y temperatura en formato de Word pack y con un peso de 5.940 KB, dentro de las que se encuentran: Berlín con periodos de 1959- 1968, 1986-1995, 1996- 2006 y 2007-2016, UIS contienen los periodos de 1985- 1995 y 1996-2003, brindando datos de precipitación y temperatura, estaciones como la Galvicia con 1 archivo que contiene únicamente datos de precipitación en el periodo de 1968 -2016, por último la estación de precipitación Tona que ya pertenecían a la base de datos del amb y por lo tanto sus datos se emplearon para complementar los registros.
- Una estación meteorológica suministrada por la CDMB (Corporación Autónoma Regional Para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga), con datos de temperatura y precipitación de la estación El Roble en el intervalo de 2011 a 2016 en un archivo de formato Excel, con un peso de 1,34MB.

Figura 2 Distribución espacial de las estaciones disponibles



Fuente: Gustavo Carrillo, estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana

## 6.1. Selección de la ventana de tiempo

La selección de la ventana de tiempo se realizó enfocándose en la franja de tiempo con la mayor cantidad de datos disponibles para realizar la correcta validación; la sección de tiempo inicia el 1 de enero de 1987 y finaliza el 31 de marzo de 2003,. Esta ventana de tiempo seleccionada, así como la disponibilidad de datos se presenta en la Tabla 5 en la que se puede observar claramente el periodo óptimo y con las estaciones disponibles. En el 2009 la UNAL realizó una validación para el territorio colombiano con una ventana de tiempo estrecha correspondiente a 19 años con resultados en los que los modelos sobreestimaron el ciclo anual de precipitación [11], este proyecto empleó una ventana de tiempo de 16 años en el que se obtuvieron mejores resultados vasados en la selección de los GCMs.

Para los procesos de validación de la precipitación se emplearon las estaciones UIS, Berlín, Tona y la Galvicia ya que cuentan con la información suficiente y de mejor calidad; Pese a que las estaciones de El Brasil y Martin Gil no se incluyeron en la validación, su información se empleó en el proceso interpolación con fin de completar las series de tiempo menores a tres meses faltantes. En la validación de la temperatura, se utilizaron las estaciones UIS y Berlín debido a que son las únicas con información disponible para este período de tiempo. En el caso de la estación de Berlín, se realizó una reducción a la ventana de tiempo a causa de la detección de una anomalía en los datos de temperatura máxima que pudo afectar la integridad de los resultados; por esta razón esta ventana de tiempo da inicio el 1 de julio de 1990 y concluye el 31 de marzo de 2003 garantizando la efectividad de los resultados.

Tabla 5. Disponibilidad de datos de las diferentes estaciones y selección de la ventana de tiempo

AÑO	PRECIPITACIÓN								TEMPERATURA		
	EL BRASIL	MARTIN GIL	EL GUALILO	TONA	EL ROBLE	UIS	BERLIN	LA GALVICIA	BERLIN	UIS	EL ROBLE
1958	/	/	/	O	/	/	/	/	/	/	/
1959	/	/	/	XX	/	/	/	/	/	/	/
1960	/	/	/	XX	/	/	/	/	/	/	/
1961	/	/	/	X	/	X	/	/	/	/	/
1962	/	/	/	XX	/	/	/	/	/	/	/
1963	/	/	/	XX	/	/	/	/	/	/	/
1964	/	/	/	X	/	/	/	/	/	/	/
1965	/	/	/	XX	/	O	/	/	/	/	/
1966	/	/	/	XX	/	O	/	/	/	/	/
1967	/	/	/	XX	/	O	/	/	/	/	/
1968	/	/	/	XX	/	/	/	/	/	/	/
1969	/	/	/	X	/	O	O	XX	/	/	/
1970	/	/	/	XX	/	XX	O	XX	/	/	/
1971	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1972	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1973	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1974	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1975	/	/	/	XX	/	X	X	XX	/	/	/
1976	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1977	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1978	/	/	/	XX	/	O	XX	XX	/	/	/
1979	/	/	/	X	/	XX	XX	XX	/	/	/
1980	/	/	/	XX	/	X	O	O	/	/	/
1981	/	/	/	X	/	XX	XX	XX	/	/	/
1982	O	O	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1983	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	X	/	/	/
1984	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	/	/	/
1985	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	O	/	XX	/
1986	XX	XX	/	XX	/	XX	O	XX	/	XX	/
1987	XX	XX	/	XX	/	XX	X	XX	XX	XX	/
1988	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1989	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1990	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	O	XX	/
1991	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1992	XX	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1993	XX	X	/	XX	/	O	XX	XX	XX	O	/
1994	XX	XX	/	XX	/	O	XX	XX	XX	O	/
1995	O	XX	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1996	X	X	/	X	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1997	XX	O	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
1998	XX	/	/	XX	/	X	X	XX	XX	O	/
1999	O	/	/	XX	/	XX	XX	XX	X	XX	/
2000	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
2001	/	/	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
2002	X	/	/	XX	/	XX	XX	XX	XX	XX	/
2003	XX	/	/	XX	/	O	XX	XX	XX	XX	/
2004	XX	/	/	XX	/	/	XX	XX	XX	/	/
2005	XX	/	/	O	/	/	XX	XX	XX	/	/
2006	XX	O	/	/	/	/	XX	XX	XX	/	/
2007	XX	XX	X	X	/	/	XX	XX	XX	/	/
2008	XX	XX	XX	XX	/	/	XX	XX	XX	/	/
2009	XX	XX	XX	XX	/	/	XX	XX	XX	/	/
2010	XX	XX	XX	XX	/	/	XX	XX	XX	/	/
2011	XX	XX	XX	XX	X	/	XX	XX	XX	/	O
2012	XX	XX	XX	XX	XX	/	XX	XX	XX	/	XX
2013	XX	XX	XX	XX	XX	/	XX	XX	XX	/	XX
2014	XX	XX	XX	XX	XX	/	XX	XX	XX	/	XX
2015	XX	XX	XX	XX	X	/	XX	XX	XX	/	X
2016	XX	XX	XX	XX	X	/	XX	XX	XX	/	XX
2017	O	O	O	O	O	/	O	O	/	/	O

SÍMBOLO	ESTADO	
XX	COMPLETO	NO TIENE SEGMENTOS CONSECUTIVOS FALTANTES MAYORES A 15 DIAS CONSECUTIVOS
X	SEMICOMPLETO	TIENE SEGMENTOS CONSECUTIVOS FALTANTES DE MAS DE 15 DIAS Y MENOREA 3 MESES
O	TIENE DATOS	FDALTAN MAS DE TRES MESES
/	SIN DATOS	NO HAY DATOS DISPONIBLES

Fuente: los autores.

## 7. EXTRACCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOS MODELOS

A partir de los resultados de los modelos MIROC5 y MPI-ESM-LR con un periodo de registro para la simulación disponible desde 1950 para todo el planeta, es oportuno para este proyecto enfocarse en la extracción de la información de las coordenadas correspondientes a la zona de estudio y a la ventana de tiempo que corresponde al lapso de 1987 a 2003.

Una vez descargadas las series de datos de precipitación y temperatura máxima y mínima diaria escaladas, se realizó la extracción de los datos del GCMs en formato netCDF a través de un código desarrollado por Darren L. Ficklin y Bradley L. Barnhart en un trabajo conjunto de la Universidad de Indiana y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Este código se encuentran disponible para Matlab y R, y permite extraer la serie de tiempo en netCDF en formato SWAT [53]. Posteriormente, se identificaron las coordenadas de los pixeles pertenecientes a la zona de estudio con los que se correlacionó la información de la serie histórica cuya localización se encuentra en la Tabla 6 y su representación gráfica en la Figura 3. Por último, se recopilaron estos datos con los de cada estación en formato Excel y se procedió a evaluar cada uno de los parámetros estadísticos considerados en la metodología.

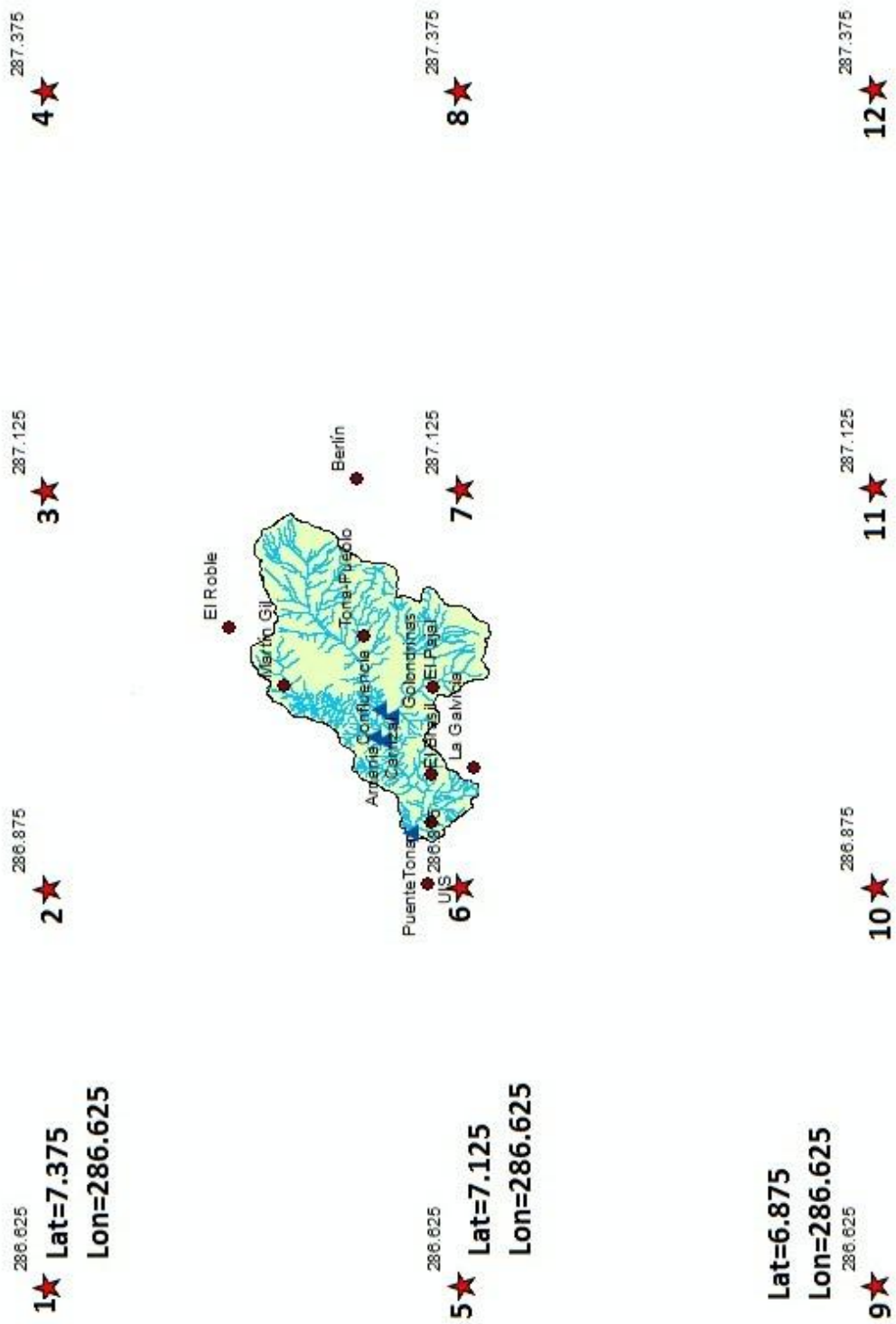
*Tabla 6 Localización de los centros de pixel correspondientes a los GCMs MIROC5 y MPI-ESM-LR.*

GCMs	PUNTOS	LATITUD	LONGITUD
MIROC5 Y MPI-ESM-LR	1	7.375	286.625
	2	7.375	286.875
	3	7.375	287.125
	4	7.375	287.375
	5	7.125	286.625
	6	7.125	286.875
	7	7.125	287.125
	8	7.125	287.375
	9	6.875	286.625
	10	6.875	286.875
	11	6.875	287.125
	12	6.875	287.375

Fuente: los autores

Una vez obtenidos GCMs escalados, se procedió a la identificación de los píxeles de mayor relevancia para el lugar de estudio, generando la Figura 3, en donde podemos apreciar las coordenadas del centro del píxel escalado y las estaciones de la cuenca. Basados en las coordenadas obtenidas, se estima que los puntos más cercanos a las estaciones de estudio tendrán los mejores resultados estadísticos así mismo entre más lejos esté el centro del píxel escalado de la estación estudiada los resultados serán menos precisos.

Figura 3 Localización de los centros de pixel correspondientes a los GCMs MIROC5 y MPI-ESM-LR.



Fuente: los a autores



### **Método para el análisis de los parámetros estadísticos (Pixel- promedio de temperatura de las estaciones)**

Con el objetivo de desarrollar la validación entre los datos puntuales y los resultados de los GCMs que generan una estación virtual ubicada en cada centro del pixel, se estimó el promedio de la temperatura mensual para cada grupo de datos y así mismo, se realizó la comparación de cada una de las estaciones con los nueve pixeles más cercanos. Este proceso inicio con la ejecución del código que transformo los datos de netCDF a texto plano (Bloc de notas), posteriormente se seleccionaron los datos correspondientes a la ventana de tiempo, se transfirieron a EXCEL en donde se consolidaron los promedios de las estaciones y los GCMs, y por último se evaluó la correlación lineal de Pearson que nos permitió estimar la semejanza de las series, además del error medio absoluto y la raíz del error medio cuadrático, que hicieron posible conocer la eficiencia del modelo. De esta forma se obtuvieron resultados que nos permitieron percibir la concordancia existente los diferentes pixeles con la misma estación.

### **Método para el análisis de los parámetros estadísticos (Pixel- precipitación acumulada de las estaciones)**

En el caso de la precipitación se desarrolló la validación entre los datos puntuales y los resultados de los GCMs a través del siguiente proceso: se inició con la estimación de la precipitación acumulada mensual para cada una de las estaciones y coordenadas de pixel; a continuación, se realizó la comparación de cada una de las estaciones con los nueve pixeles más cercanos, se ejecutó el código que nos permitió transportar los datos a EXCEL y por último se llevó a cabo la evaluación a través de las diferentes ecuaciones estadísticas que nos proporcionó una serie de resultados que permitieron identificar aquellos pixeles con mayor coincidencia con las estaciones.

## 8. VERIFICACIÓN DE LOS DATOS ESCALADOS

En respuesta al tercer objetivo, se elaboraron una serie de tablas disponibles en el Anexo 2, que contienen los resultados de las diversas ecuaciones estadísticas que hacen parte de la metodología de este proyecto para cada una de las relaciones posibles entre los pixeles y las estaciones, que posteriormente fueron analizadas y comparadas con el objetivo de identificar aquellas con los resultados más satisfactorios, como se presentan a continuación:

*Tabla 7. Puntos que presentaron los mejores resultados estadísticos para cada una de las estaciones. Para los modelos MIROC5 y MPI-ESM-LR.*

Puntos con mejores estadísticos para precipitación		
Estación	MIROC5	MPI-ESM-LR
Tona	11	11
La Galvicia	10, 11	-
Berlín	3, 7, 12	7, 12
UIS	7, 11	-

Puntos con mejores estadísticos para Temp. Max.		
Estación	MIROC5	MPI-ESM-LR
Berlín	12	12
UIS	2	2

Puntos con mejores estadísticos para Temp. Min.		
Estación	MIROC5	MPI-ESM-LR
Berlín	3, 8	3
UIS	5	-

Fuente: los autores

### **Desviación absoluta media de los datos observados – MAD**

Teniendo en cuenta que la desviación media absoluta nos permite identificar la variación presente en los datos observados con respecto a la media de estos. Se obtuvieron resultados en los que las estaciones climatológicas generaron altas desviaciones, en el caso la precipitación, la Galvicia proporcionó un resultado de 66,75, mientras que la estación de Berlín generó un valor de 31,14, así mismo Tona suministró un valor 74,24 y la UIS tuvo un resultado de 47,71. Esto nos permitió identificar que la estación de Berlín presenta un comportamiento con baja variabilidad y con valores de precipitación bastante estables; por el contrario la estación de Tona presenta un comportamiento más aleatorio y con magnitudes más elevadas con respecto a su promedio por lo que es probable que los resultados más favorables se presenten en la estación de Berlín.

De la misma forma en el caso de la temperatura máxima Berlín obtuvo un valor 0,76 y la UIS presento un resultado de 0,78, se debe tener en cuenta que en este caso el valor del MAD puede ser menor para la estación de Berlín debido a que su ventana de tiempo es más estrecha. Para finalizar la temperatura mínima genero para Berlín un valor de 1,22 y la estación de la UIS proporcionó un valor de 0,76 por lo que se pude inferir que la UIS posee características que a comparación de la estación de Berlín facilitan su simulación.

### **Error medio absoluto (MAE) - Raíz del error medio cuadrático (RMSE)**

El MAE permite cuantificar la magnitud promedio del error existente entre las variables que corresponden a los datos observados y los simulados aunque este no tiene en cuenta su dirección. De manera análoga, el RMSE también mide la magnitud del promedio del error pero la diferencia de estos parámetros radica en que el RMSE es más útil cuando los grandes errores son indeseables. Así pues los resultados de estos parámetros nos permiten diferenciar cuál de los modelos escalados brinda una mejor información con respecto a la magnitud de los fenómenos analizados y cuyo valor óptimo es cero.

Puesto que la cuenca del río Tona se encuentra ubicada entre los pixeles 6 y 7 se analizaron los resultados de MAE y RMSE correspondientes a estos pixeles y presentados a continuación, en la Tabla 8 se presentan los resultados del MIROC5 así mismo la Tabal 9 corresponde al modelo MPI-ESM-ES.

Tabla 8. Resultados de MAE Y RMSE para cada una de las estaciones y el pixel en el que se encuentra, para el modelo MIROC5.

MIROC5			
--------	--	--	--

PRECIPITACIÓN	PIXEL	MAE	RMSE
Tona Pueblo	7	66,79	95,04
La Galvicia	6	79,52	104,23
Berlín	7	44,96	59,51
UIS	6	57,00	73,10

TEM MAX	PIXEL	MAE	RMSE
Berlín	7	1,88	2,15
UIS	6	1,12	1,37

TEM MIN	PIXEL	MAE	RMSE
Berlín	7	1,05	1,44
UIS	6	2,12	2,31

Fuente: los autores.

Tabla 9 Resultados de MAE Y RMSE para cada una de las estaciones y el pixel en el que se encuentra, para el modelo MPI-ESM-LR.

MPI-ESM-LR			
------------	--	--	--

PRECIPITACIÓN	PIXEL	MAE	RMSE
Tona Pueblo	7	70,29	94,45
La Galvicia	6	76,52	101,75
Berlín	7	45,17	58,80
UIS	6	67,85	84,86

TEM MAX	PIXEL	MAE	RMSE
Berlín	7	2,00	2,31
UIS	6	1,14	1,49

TEM MIN	PIXEL	MAE	RMSE
Berlín	7	1,12	1,56
UIS	6	1,84	2,09

Fuente: los autores. .

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, el RSME penaliza más los errores de mayor magnitud. Por consiguiente los resultados expuestos anteriormente se consideran favorables para la temperatura ya que estos valores de RSME generados por los modelos se encuentran muy próximos al valor óptimo lo que indica una adecuada descripción de esta variable en la zona de estudio, de manera análoga podemos considerar que el comportamiento de la precipitación es aceptable puesto que sus resultados son un poco más elevados pero tratan de asemejarse al clima y sus cambios en la zona tropical en donde se encuentra ubicada la cuenca del río Tona.

En el artículo elaborado por Carlos Andrés Bonilla para la UNAL en el 2017 se emplearon los mismos parámetros estadísticos para validar la precipitación de varios GCMs pertenecientes al CMIP5, en los que se obtuvieron valores de MAE que oscilan entre 50mm a 100 mm, al realizar una comparación con los resultados generados en este proyecto que corresponden 44,96 mm a 79,52 mm y teniendo en cuenta que el valor óptimo de este parámetro corresponde a 0 podemos percibir una sutil mejoría en el comportamiento de los modelos escaldos frente a la zona de estudio establecida. Así mismo los valores de RSME obtenidos por Bonilla corresponden a 25 mm- 50 mm para las mejores zonas del país mientras que los generados por el proyecto corresponden a 58,80 mm – 95,04 mm valores que se encuentran por encima de los resultados más óptimos generados por el artículo pero que a su vez se encuentran muy por debajo de los peores resultados hallados en este, por esta razón podemos considerar que los valores proporcionados por este proyecto son aceptables teniendo en cuenta la incertidumbre presente en los MCGs.

### **Índice de concordancia (dr)**

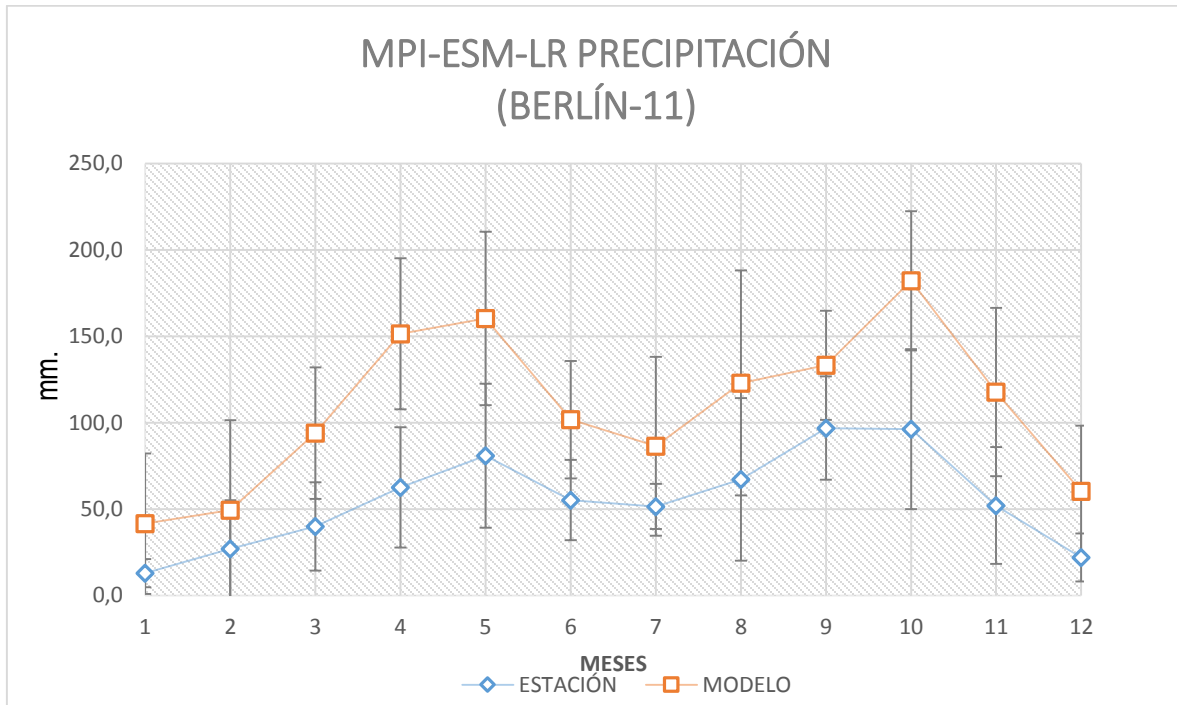
Se entiende por índice de concordancia al valor resultante de la coincidencia entre los datos (MAE) y (MAD), es decir en qué medida hubo equivalencia entre dichas variables. Así mismo esto lo podemos observar gráficamente en las Figuras 4 a 9 en donde los valores correspondientes a 1 representan la perfección del modelo y hacen referencia a la ocupación de los mismos puntos para las dos variables, mientras que valores como 0 se representan con la coincidencia de solo uno de los extremos de las desviaciones estándar para cada uno de los errores. Por otra parte, el 0.5 se simboliza con la coincidencia del punto medio de una de las variables y el extremo de la desviación estándar de la otra, por último los valores negativos representan la falta de coincidencia entre las variables.

A continuación se exponen los resultados del modelo MIROC5 cuyos valores de **dr** en el caso de precipitación oscilan de 0,28 a 0,55, y su resultado más óptimo se presenta gráficamente en la , de manera análoga se obtuvieron valores de temperatura mínima con un rango de -0,02 a 0,57 y su mejor comportamiento se encuentra disponible en la y finalmente se registró un intervalo valores que comprenden de -0,15 a 0,43 para temperatura máxima así como su mejor resultado se muestra en la , fundamentado en los resultados anteriormente descritos se determinó que el comportamiento del **dr** en el modelo es aceptables puesto que la precipitación genero valores positivos y en su mayoría superiores a 0,5, así mismo la temperatura produjo valores razonables a pesar de que se presentaron resultados negativos a causa de las pequeñas magnitudes de las desviaciones estándar, lo cual género dificultades en la coincidencia de las variables.

Así mismo el modelo MPI-ESM-LR proporciono los valores de **dr** que se describen a continuación. En primer lugar la precipitación con un rango de 0,27 a 0,53 cuyo mejor comportamiento se presenta en la , del mismo modo la Representa el resultado con mayor relevancia para la temperatura mínima que genero valores de 0,12 a 0,55 y para concluir se exponen los resultados de la temperatura máxima con valores que varía de -0,21 a 0,27 y su mejor resultado se muestra en la . Al igual que el modelo MIROC5 su comportamiento es aceptables y en el caso de la temperatura mínima genero valores más satisfactorios, teniendo esto en cuenta el modelo MIROC5 presento resultados más favorables en los factores de precipitación y temperatura máxima.

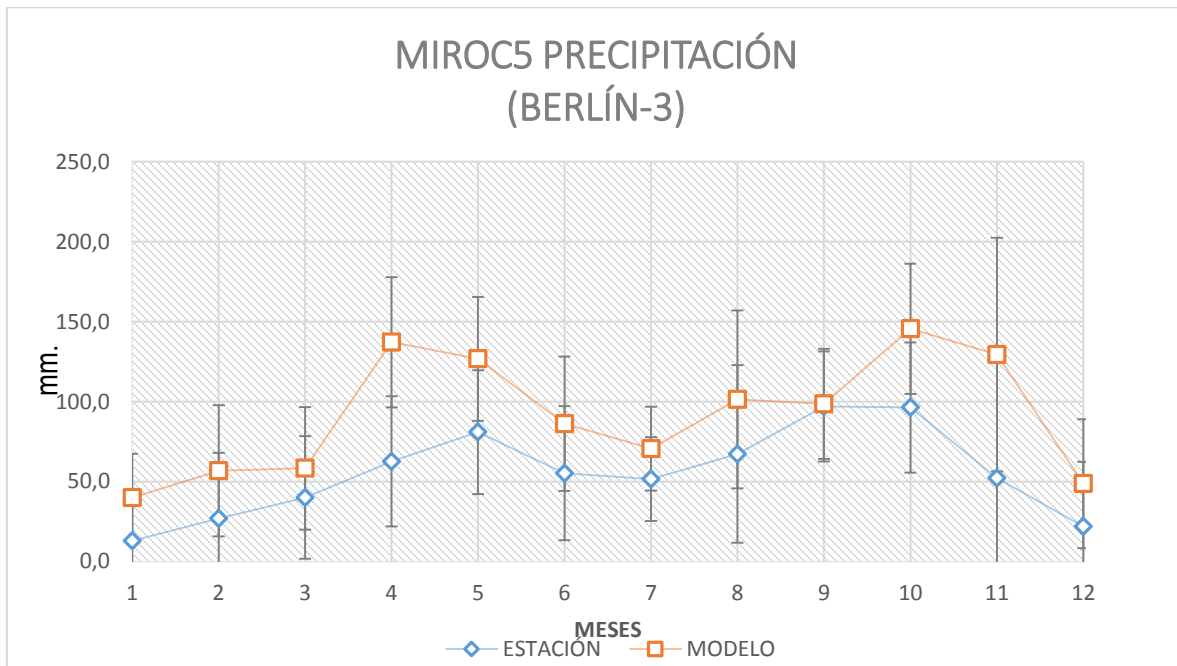
Carlos Andres Bonilla en su artículo realizo un análisis a 2270 estaciones pluviométricas y a diferentes modelos del del CMIP5 a través de parametros estadísticos entre los cuales se encuentra el índice de concordancia, en el que obtuvo resultados superiores a 0,5 para la mayoría de país, teniendo en cuenta los resultados anteriormente expuestos generados en este proyecto corresponden al rango entre 0,27 y 0,55, podemos concluir que los valores se encuentran en el mismo rango y teniendo en cuenta que el valor óptimo de este parametro estadístico es 1 podemos considerarlo un valor aceptable.

Figura 4. Ciclo anual del pixel 11 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia de precipitación para el modelo MPI-ESM-LR.



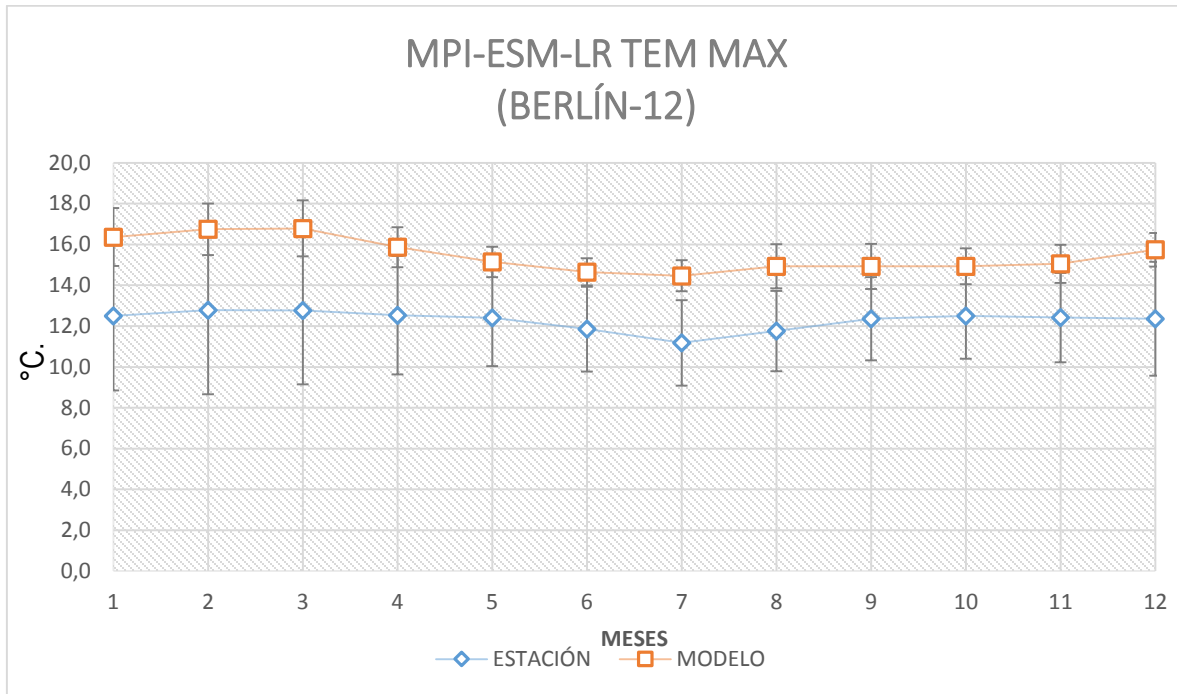
Fuente: los autores.

Figura 5. Ciclo anual del pixel 3 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia de precipitación para el modelo MIROC5.



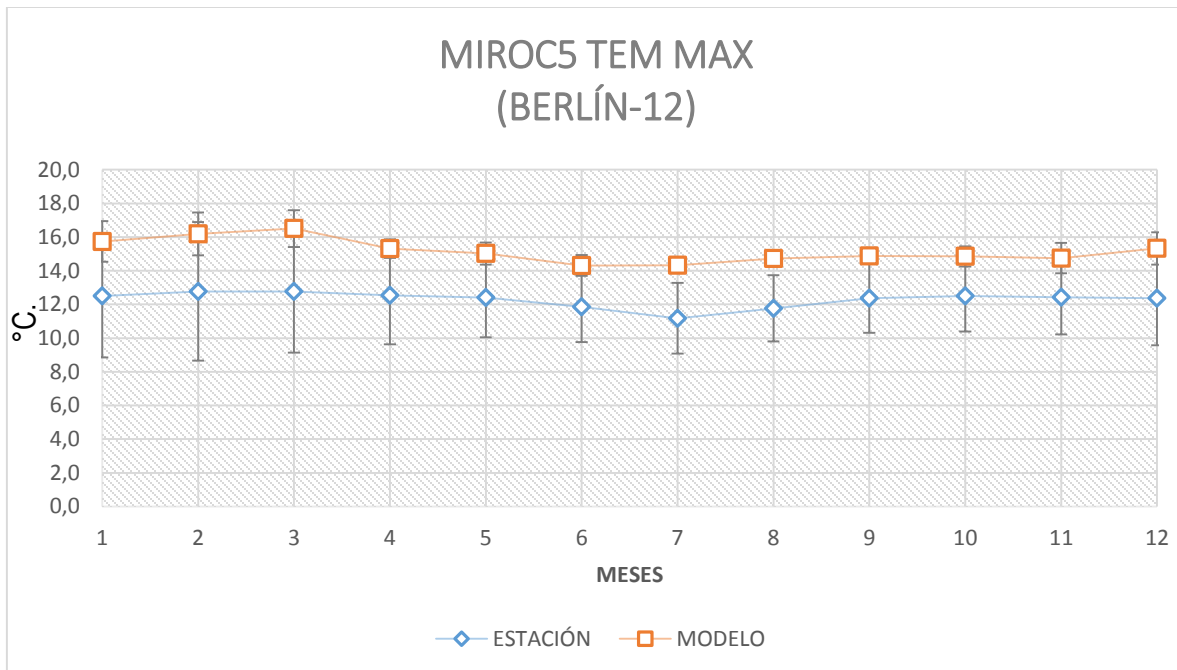
Fuente: los autores.

Figura 6. Ciclo anual del pixel 12 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia en la temperatura máxima para el modelo MPI-ESM-LR.



Fuente: los autores.

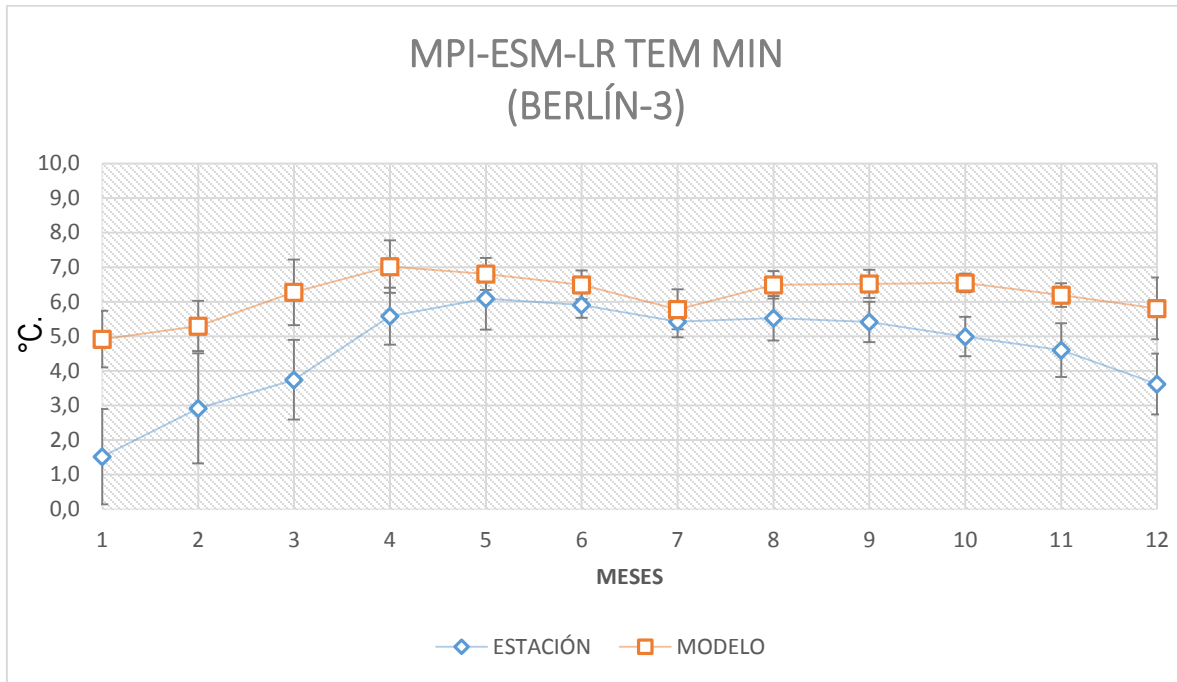
Figura 7. Ciclo anual del pixel 12 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia en la temperatura máxima para el modelo MIROC5.



Fuente: los autores.

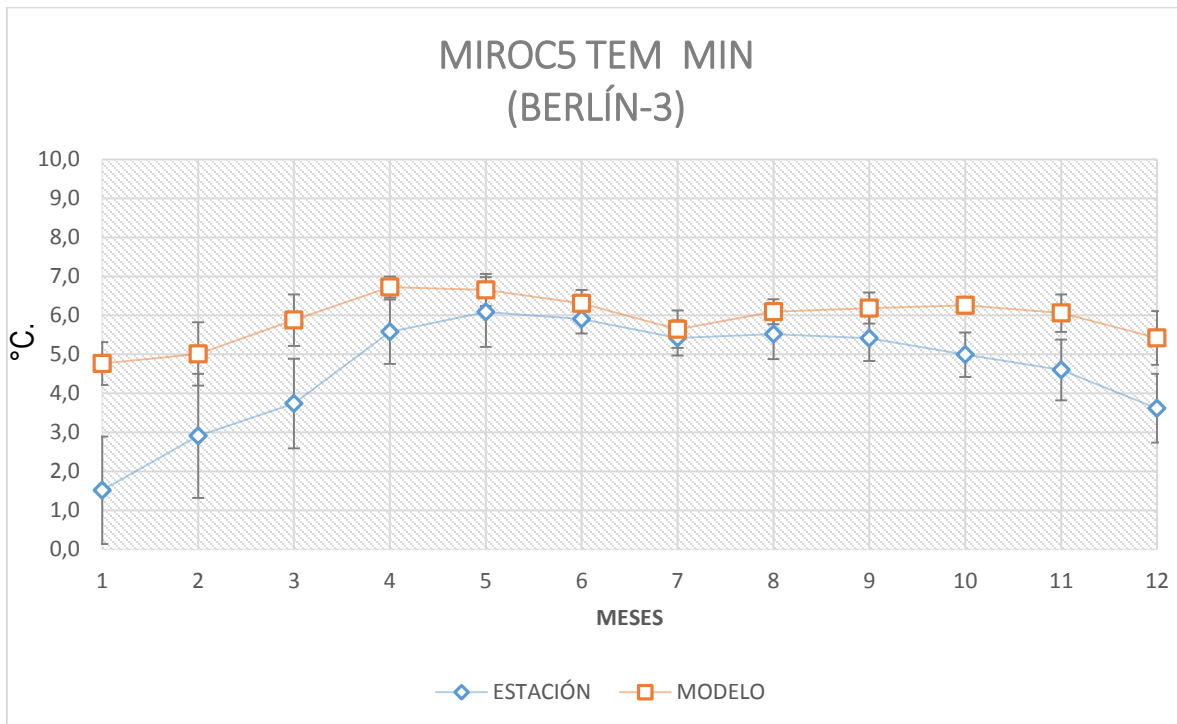


Figura 8. Ciclo anual del pixel 3 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia en la temperatura mínima para el modelo MPI-ESM-LR.



Fuente: los autores.

Figura 9. Ciclo anual del pixel 3 y la estación de Berlín. Representación con mejor concordancia en la temperatura mínima para el modelo MIROC5.



Fuente: los autores

### **Error sistemático (Sesgo o BIAS)**

Por último, se encuentra el error sistemático que permite estimar la diferencia existente entre un valor real y el promedio de los datos de la misma característica, es decir, este error se presenta o es atribuible al error de las herramientas involucradas en el desarrollo del proyecto, así como también se asocia a los datos de dichas mediciones y a los datos de campo ya que el error del medio se considera causal de este error; en donde los valores positivos representan una sobre estimación por parte del GCM y los valores negativos corresponden al subestimación de los ismos .

Para los fines del proyecto, el sesgo se encuentra asociado con la recolección de los datos observados brindados por las entidades gubernamentales, puesto que se presentó ausencia de datos en diversos puntos de la serie histórica, para entender mejor en este estudio los datos se completaron mediante los procesos de interpolación, el métodos como el inverso de la distancia al cuadrado y técnicas de promedio, teniendo en cuenta que estos datos faltantes en la ventana de tiempo seleccionada no supera un máximo de tres meses.

Cabe señalar que otra de las causas de error que se presentan con respecto a la recolección de los datos se localiza en la toma de estos, debido a que el personal encargado de la recolección en ciertos casos puntuales entregó datos con doble puntuación, ejemplo (5.6.8) como dato para precipitación. Esta clase de errores generaron una revisión y toma de decisiones que permitieron garantizar una ventana de tiempo con el menor porcentaje de dichos errores, pensando en un sesgo bajo o nulo.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los generados por los modelos al realizar la validación de las diferentes estaciones con los pixeles 6 y 7, pixeles en los que se encuentra ubicada la cuenca del río Tona. En este sentido, el modelo MIROC5 al ser comparado con las estaciones de Berlín, la UIS, Tona y la Galvicia generó valores que oscilan en el rango de  $-71,66$  a  $75,14$  para caso de la precipitación, estos resultados se pueden considerar aceptables ya que los valores de RMSE y MAE son óptimos en estos puntos, en el caso de la temperatura el modelo solo se compara con las estaciones de la UIS y Berlín, teniendo esto en cuenta la temperatura máxima genero un rango que se encuentra entre  $-13,05$  y  $14,06$  mientras que para la temperatura mínima varía entre  $-14,72$  y  $13,04$ .

Así mismo el modelo MPI-ESM-LR generó resultados de error sistemático que en el caso de la precipitación corresponden a valores entre  $-71,57$  y  $73,56$  al igual que en el modelo MIROC5 los resultados se consideran favorables cuando se miran en conjunto con los valores de RMSE y MAE, así mismo los valores para temperatura máxima se encuentran en un rango de  $-12,74$  a  $14,23$  y para temperatura mínima que varía entre  $-14,39$  y  $13,31$ .

Se puede inferir que los resultados de la amplitud del sesgo en el caso de la precipitación son superiores a los generados por la temperatura, esto se puede fundamentar en la variabilidad de las magnitudes que experimenta la precipitación y que se puede agravarse por fenómenos como los del niño y la niña que generan periodos extremos de lluvia o sequía, además de factores como la topografía que también tienen generan un impacto sobre la temperatura y cuya influencia es menor como se evidencia en la mínima variabilidad que presenta la temperatura.

Para el caso del BIAS Carlos Andrés Bonilla obtuvo valores en un rango de  $-0,50$  a  $0,50$  siendo estos resultados favorables con relación al valor óptimo, los valores que generó este proyecto oscilan en el rango de  $-32,57$  a  $34,56$ ; siendo estos valores elevados, diferentes causas pueden ser atribuidas como la amplitud existente en el error medio absoluto para datos de precipitación, la dificultad que presentan los modelos climatológicos globales entre otros.

### **Coefficiente de correlación de Pearson**

Se empleó el coeficiente de correlación de Pearson con el objetivo de cuantificar la semejanza entre la parametrización de los modelos con la de las estaciones en el periodo seleccionado, aunque es necesario tener en cuenta que este coeficiente es independiente de la escala de medidas de las variables. Las Figuras 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21 y 22 exponen la representación gráfica los mejores resultados correspondientes a la correlación para cada uno de los modelos.

El modelo MIROC5 obtuvo valores de correlación de Pearson para precipitación que varían de  $0,13$  a  $0,5$ ; una temperatura mínima que va de  $0,05$  a  $0,6$  y la temperatura máxima en un rango de  $0,02$  a  $0,42$ . Se debe tener en cuenta que se realizó una comparación de las estaciones analizadas con los nueve píxeles más cercanos a estas, de modo que es admisible la aparición de valores cercanos a cero ya que las estaciones analizadas no poseen

semejanza con todos los pixeles debido a la variabilidad climática que presenta la cuenca y que a su vez el modelo es capaz de replicar de manera aceptable. A continuación se presentan las estaciones y los respectivos pixeles con los que mejor se correlacionaron, en el caso de la precipitación la estación de Berlín tuvo mayor coincidencia con el pixel 3 y el 7; para la estación UIS los pixeles con mayor relevancia son 11 y 7; en el caso de la Galvicia el pixel 10 obtuvo los mejores resultados y por último la estación Tona con mayor concordancia en los pixeles 11 y 7. Así mismo la temperatura mínima generó los siguientes resultados, la UIS obtuvo una mayor coincidencia con el pixel 1 y en el caso de Berlín el pixel 4 ofreció un mejor desempeño para finalizar la temperatura máxima proporcionó la siguiente información, la estación UIS obtuvo una mayor similitud con el pixel 4 y la estación Berlín presentó una mayor semejanza con el pixel 12.

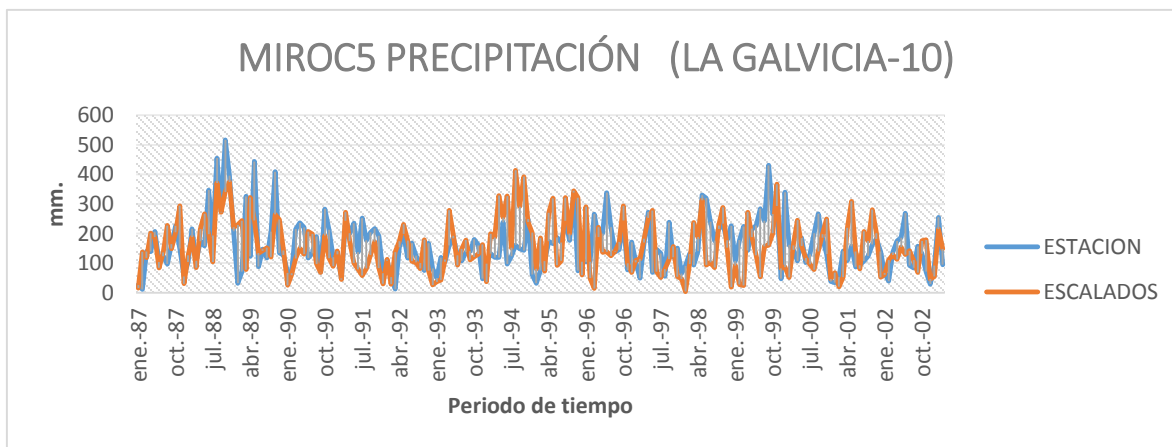
Igualmente el modelo MPI-ESM-LR generó resultados para precipitación en el rango de 0,10 a 0,5; para temperatura máxima de 0,01 a 0,53 y en el caso de la temperatura mínima de 0,10 a 0,52. Las estaciones y los pixeles con los que tuvieron mayor correlación se presentan a continuación, la precipitación obtuvo para la estación Tona una mayor coincidencia en los pixeles 11 y 6, para la Galvicia el mejor resultado corresponde a los pixeles 12 y 7, Berlín generó una mayor semejanza con los pixeles 11 y 7 y finalmente la UIS proporcionó mejores resultados en el pixel 6. Con respecto a la temperatura mínima la estación de Berlín presentó mayor semejanza con los pixeles 4 y 7 y la estación UIS con los pixeles 3 y 7, por último la temperatura máxima proporcionó resultados en los que la UIS posee una mayor coincidencia con el pixel 1 y Berlín generó un mejor desempeño en el pixel 12.

En resumen, con el objetivo de identificar el comportamiento de los modelos escalados se decidió comparar las diferentes estaciones con los nueve pixeles más cercanos, lo que permitió identificar la capacidad de los modelos para simular el clima de la parte alta y baja de la cuenca. A pesar de que los resultados más altos para la correlación son aceptables se puede observar una adecuada distribución del tipo de clima correspondiente a cada una de las zonas de la cuenca, siendo capaz de diferenciar el clima del páramo de la zona templada que corresponde a la parte baja de la cuenca. Cabe recalcar que la ventana de tiempo con la que realizamos la validación es bastante pequeña y que los datos faltantes de las estaciones se completaron a través de métodos de interpolación lo que pudo afectar de manera superficial los resultados de la correlación.

Las figuras 10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21 y 22 que se presentan a continuación, contienen los resultados más favorables para la correlación lineal de Pearson obtenidos de la validación en la que se compararon las diversas estaciones con los modelos disponibles. Estas figuras nos permiten observar el comportamiento de cada una de las variables en el período de tiempo correspondiente entre enero 1 de 1987 y 31 de marzo de 2003.

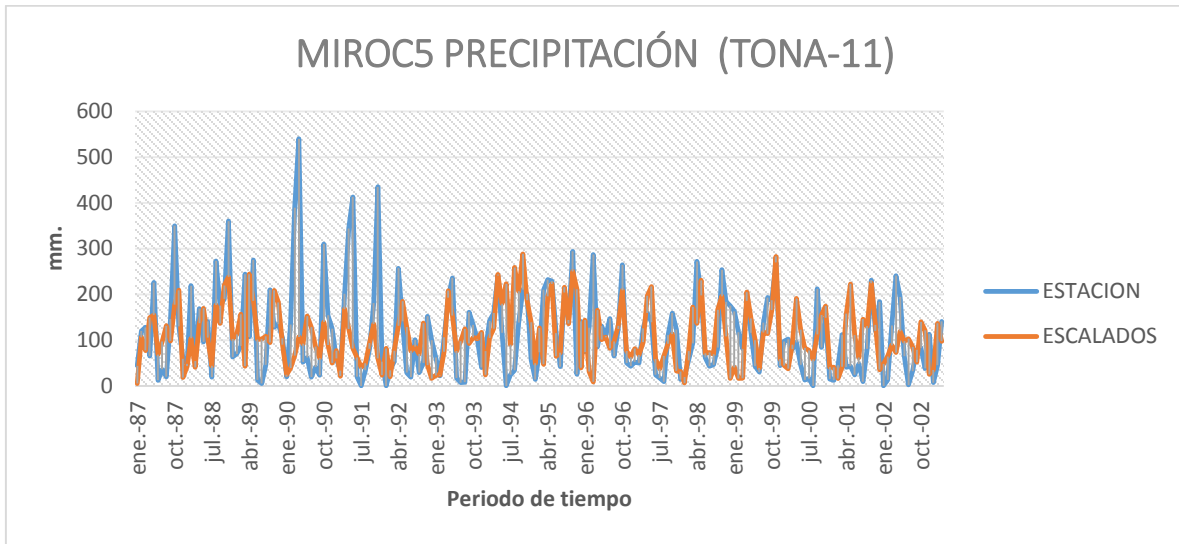
La UNAL ha realizado diversos estudios relacionados con la validación de MCGs entre los que se encuentra la tesis presentada por Lina Acevedo en el 2009 quien realizó la validación de 4 GCMs pertenecientes al AR4; y el artículo elaborado por Carlos Andrés Bonilla en el que se emplea el coeficiente de correlación como uno de los principales estadísticos para el análisis del comportamiento climático. En la tesis de Lina Acevedo los GCMs presentaron comportamientos que oscilan en un rango de 0,44 a 0,67 mientras que en el artículo de Carlos Andrés Bonilla las correlaciones correspondientes a la parte de los Santanderes fueron mayores a 0,5, dicho esto nuestra mejor correlación corresponde a 0,48 valor que se encuentra en el mismo rango de los anteriormente descritos y que por consiguiente es considerado aceptable.

Figura 10. Comportamiento de la precipitación para la estación Tona y el pixel 11 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003)



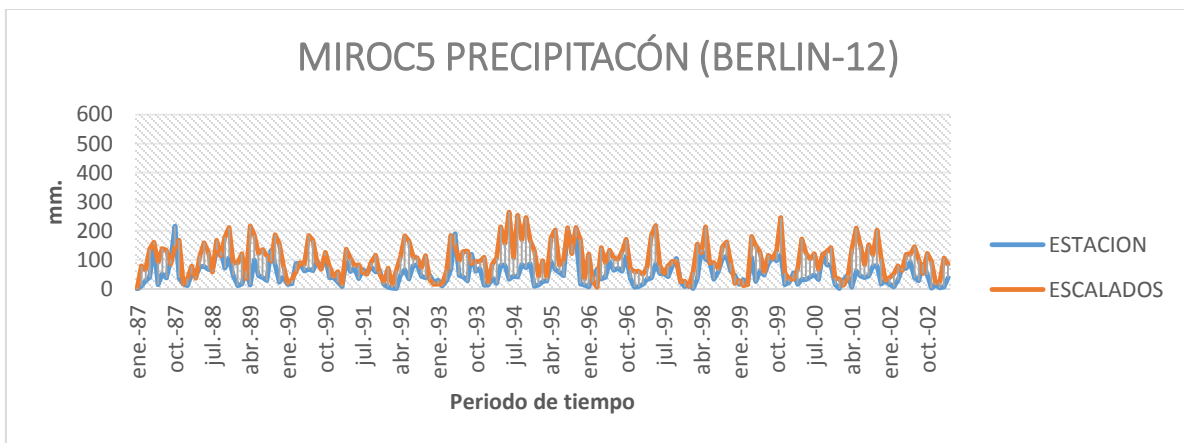
Fuente: los autores.

Figura 11. Comportamiento de la precipitación para la estación la Galvicia y el pixel 10 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003).



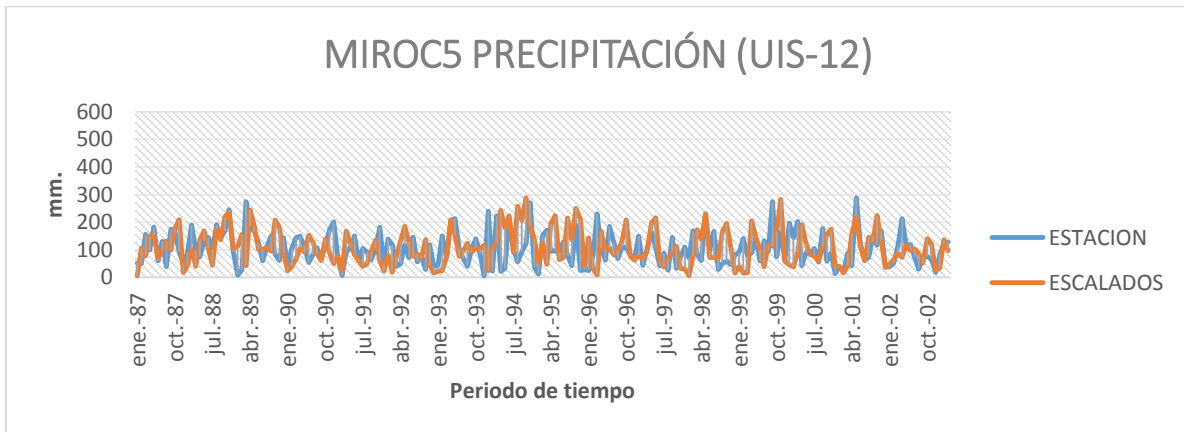
Fuente: los autores.

Figura 12. Comportamiento de la precipitación para la estación de Berlín y el pixel 12 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003).



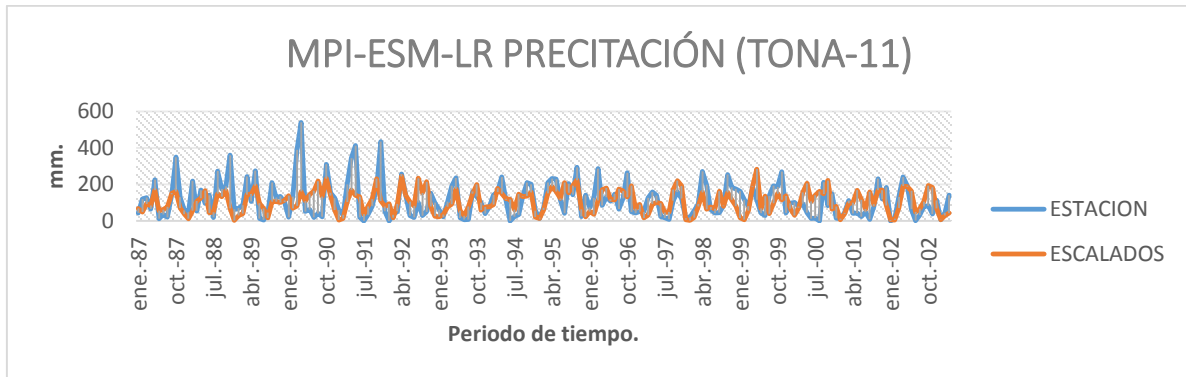
Fuente: los autores.

Figura 13. Comportamiento de la precipitación para la estación de la UIS y el pixel 12 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003).



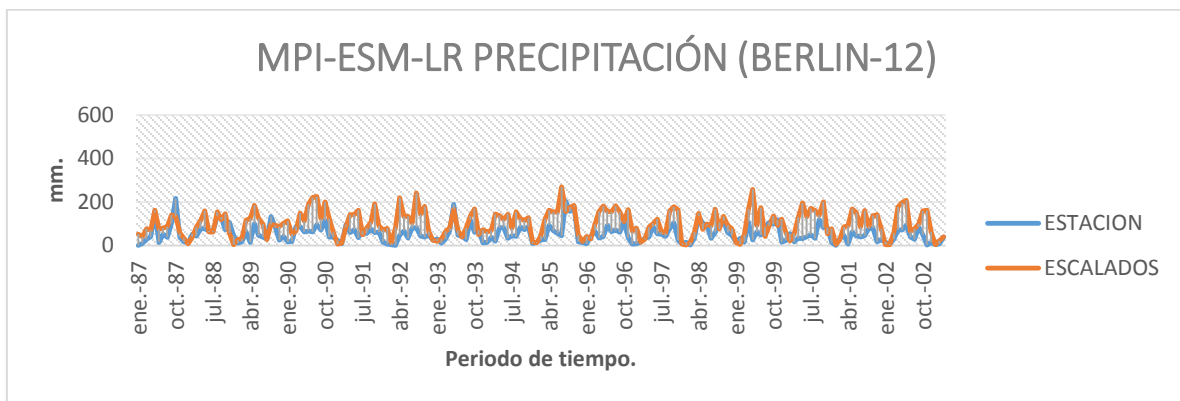
Fuente: los autores.

Figura 14. Comportamiento de la precipitación para la estación Tona y el pixel 11 del modelo MPI-ESM-LR durante la ventana de tiempo (1987-2003).



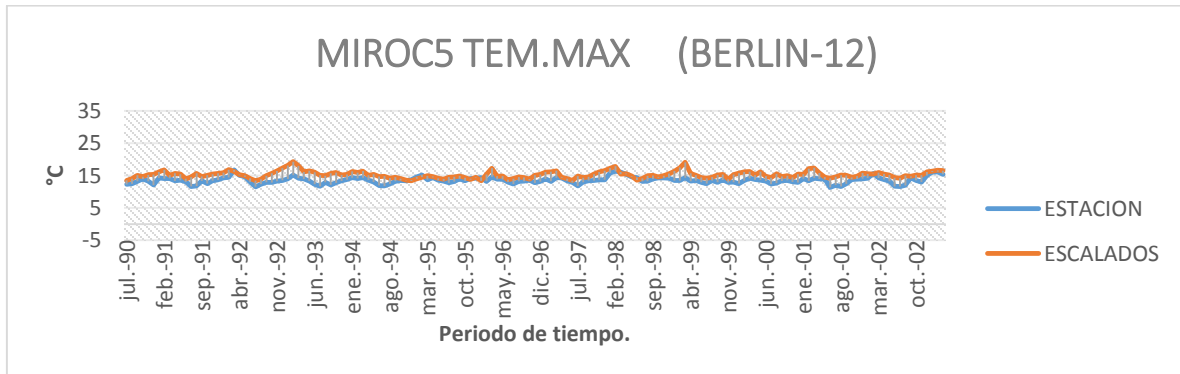
Fuente: los autores.

Figura 15. Comportamiento de la precipitación para la estación de Berlín y el pixel 12 del modelo MPI-ESM-LR durante la ventana de tiempo (1987-2003).



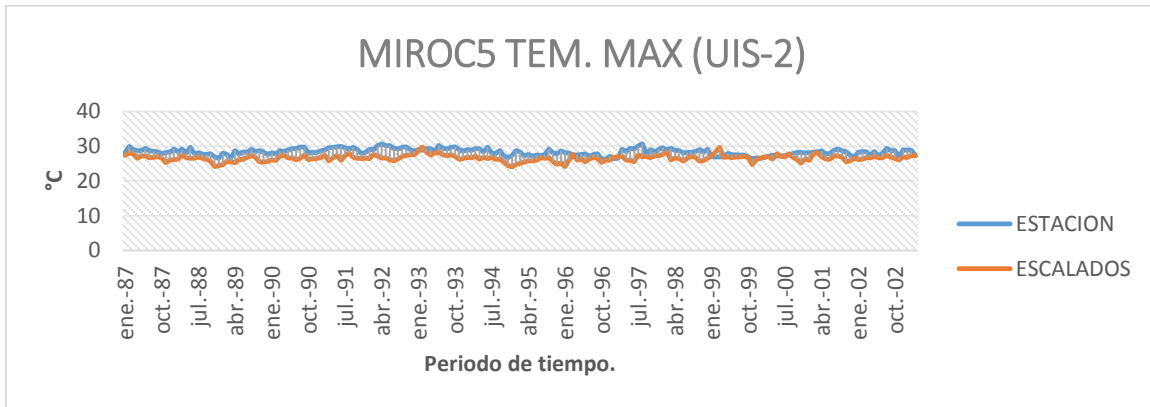
Fuente: los autores.

Figura 16. Comportamiento de la temperatura máxima para la estación de Berlín y el pixel 12 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1990-2003).



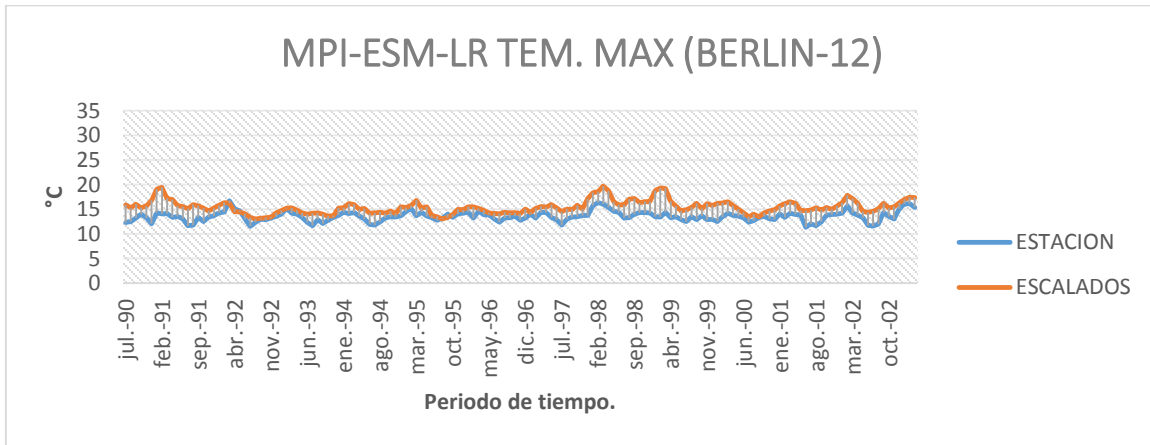
Fuente: los autores.

Figura 17. Comportamiento de la temperatura máxima para la estación de la UIS y el pixel 2 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003).



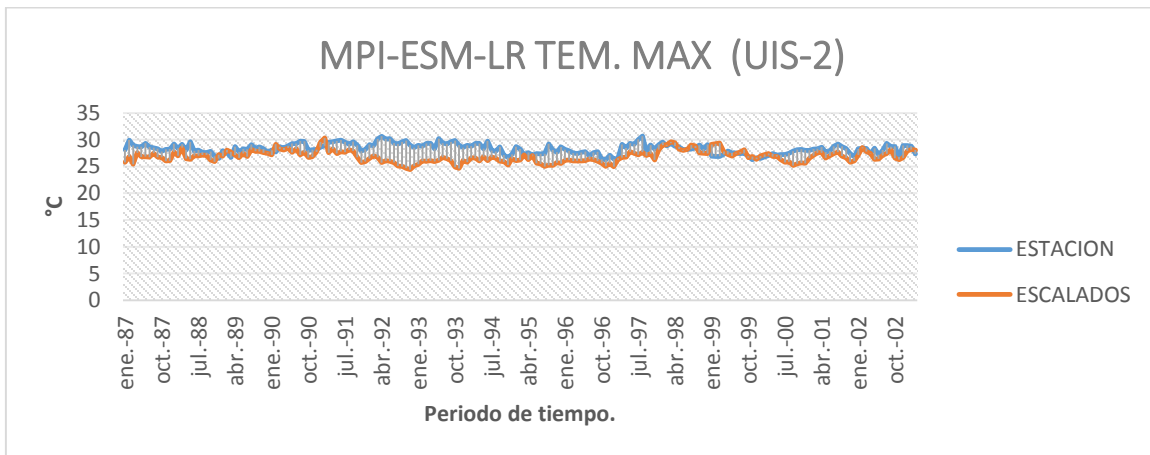
Fuente: los autores.

Figura 18. Comportamiento de la temperatura máxima para la estación de Berlín y el pixel 12 del modelo MPI-ESM-LR durante la ventana de tiempo (1990-2003).



Fuente: los autores.

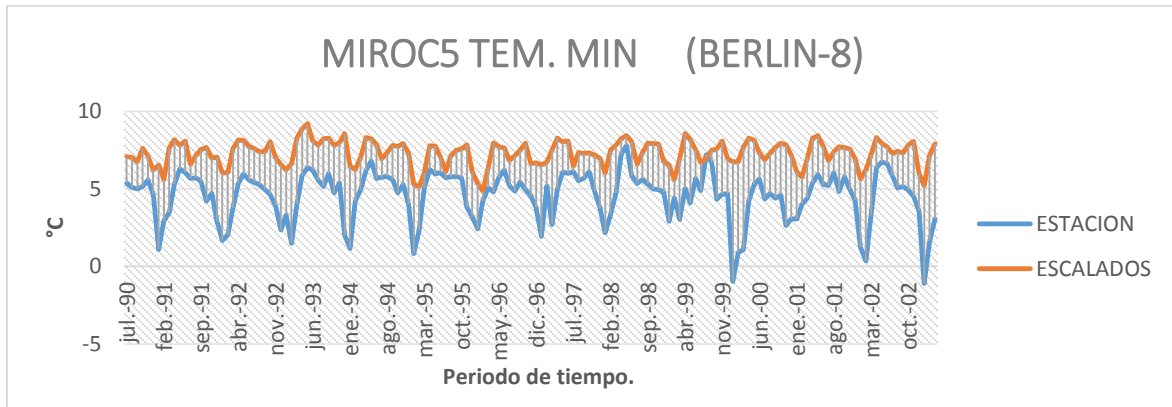
Figura 19. Comportamiento de la temperatura máxima para la estación de la UIS y el pixel 2 del modelo MPI-ESM-LR durante la ventana de tiempo (1987-2003).



Fuente: los autores.

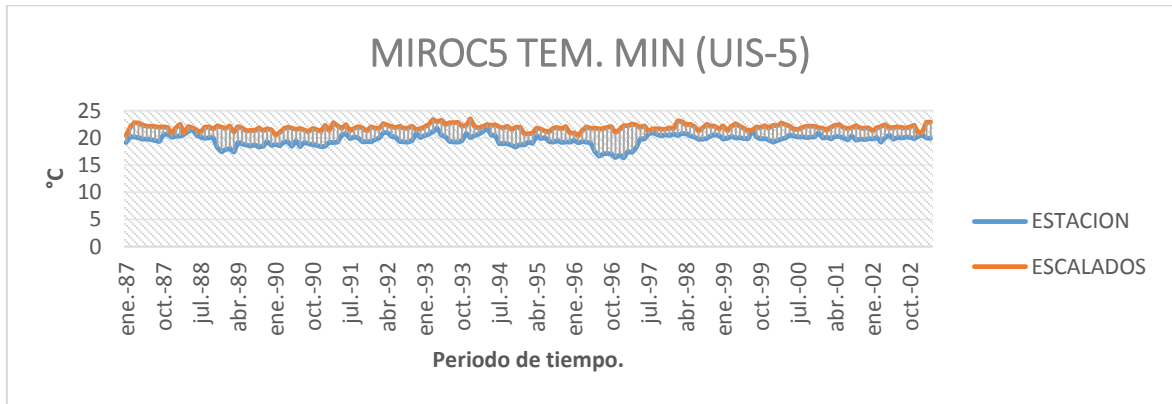


Figura 20. Comportamiento de la temperatura mínima para la estación de Berlín y el pixel 8 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1990-2003).



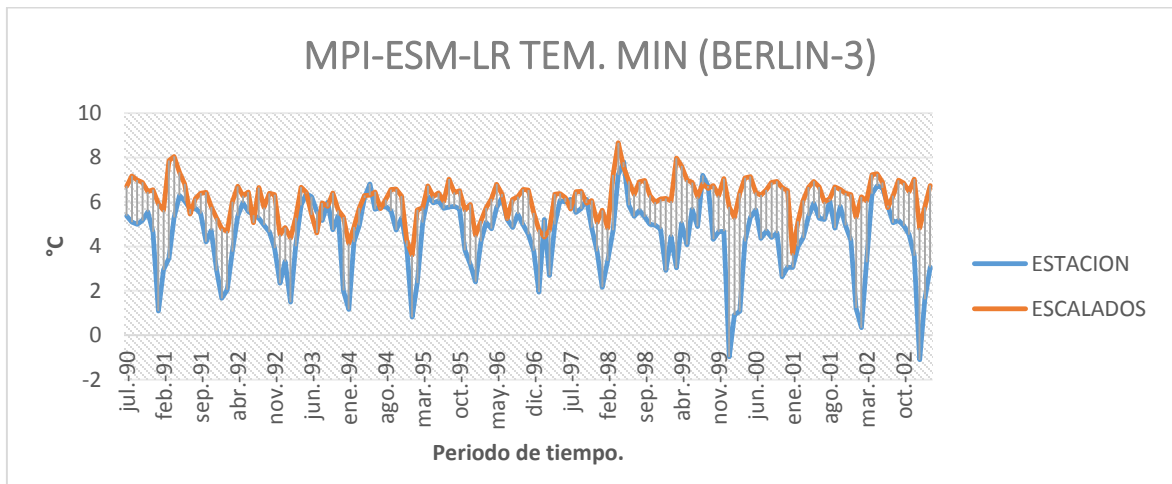
Fuente: los autores.

Figura 21. Comportamiento de la temperatura mínima para la estación de la UIS y el pixel 5 del modelo MIROC5 durante la ventana de tiempo (1987-2003).



Fuente: los autores.

Figura 22. Comportamiento de la temperatura mínima para la estación de Berlín y el pixel 3 del modelo MPI-ESM-LR durante la ventana de tiempo (1990-2003).



Fuente: Los autores

## 9. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

Este trabajo de grado cumplió con los objetivos propuestos a través de la metodología desarrollada basada en la validación de los modelos MIROC5 y MPI-ESM-LR para la ventana de tiempo del 1 de enero de 1987 al 31 marzo de 2003 ha permitido obtener las siguientes conclusiones.

Se identificaron los modelos climatológicos globales con mayor relevancia para el territorio Colombiano a partir de una minuciosa revisión bibliográfica que se enfocó en los reportes de evaluación AR4 y AR5 del IPCC. Para evaluar la capacidad de desempeño de los modelos y realizar la selección sobre la geografía colombiana se compararon los resultados obtenidos por los diferentes documentos a través de la tabla disponible en el anexo1, en la que se puede observar con mayor detalle el desempeño de 38 modelos. Si bien ningún modelo representa rigurosamente los elementos climatológicos (precipitación y temperatura) en una cuenca tropical pues la mayoría presentan problemas en su representación, debe mencionarse que para el AR5 el CMCC-CMS reveló un mejor desempeño y otros modelos como el MIROC5, MPI-ESM-LR y HadGEM2-ES la representan de manera adecuada, en el caso del AR4 el ECHAM5 ofrece la mejor representación, mientras que los modelos HADCM3, BCM2.0, ECHO-G, E-H y CGCM2.3.2 proporcionan resultados favorables.

La revisión bibliográfica permitió identificar los principales modelos climatológicos globales escalado más óptimo para Colombia y ha permitido concluir que existen dificultades que presentan los GCMs al realizar la modelación en zonas tropicales ya que la cuenca se encuentra situada en esta zona y posee un terreno montañoso que genera cambios notables y con grandes complicaciones para estos este proyecto deja abierta la investigación para nuevos estudios basados en la optimización de los modelos climatológicos escalándolos o generando nuevos que se adapten de la mejor a nuestro terreno y que tengan en cuenta los tipos de circulación.

El segundo objetivo específico generó dificultades en la búsqueda de información requerida correspondiente a los datos históricos obtenidos por estaciones climatológicas situadas en la zona de estudio, se consideraba que dicha información era de fácil acceso, pero se evidencio la dificultad para su obtención lo que limito la ventana de tiempo disponible para

la validación. Con el fin de tener una información veraz, se recomienda la selección de la ventana de tiempo más favorable con relación a los datos observados, como se ha mencionado, la ventana de tiempo seleccionada en este informe brinda una información verídica debido a que se eligieron los años con mayor cantidad de datos con el fin de garantizar resultados válidos para estudios posteriores, dando seguridad a lo concluido, así mismo se recomienda validar las temporadas de fenómenos naturales, dicha información aclara ciertos comportamientos del GCM y da una respuesta a la amplia desviación de la media que existe tanto para el sistema como para los datos de campo en series de tiempo determinadas y no periódicas.

Los modelos validados representan de manera aceptable el comportamiento de la zona de estudio pero generan una sobre estimación de los procesos climatológicos de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima y esta se presenta durante todo el año. En el caso de la precipitación los GCMs son capaces de reproducir los dos picos de precipitación que según las estaciones anualmente se presentan en la cuenca que corresponden a los meses de abril y mayo y posteriormente en octubre y noviembre. Así mismo la temperatura mínima presenta un comportamiento similar a excepción de los meses de enero y febrero donde la sobre estimación es significativa, pero se debe tener en cuenta que sus magnitudes son bastante contiguas el resto del año, para ultimo las temperaturas máximas genera una parametrización de variables semejante, por lo tanto se requiere realizar una mayor investigación en el escalamiento de los modelos buscando mayor presión en los datos de los pixeles y así granizar mejores resultados.

Con los resultados generados por los diferentes parámetros estadísticos en las pruebas realizadas se puede afirmar que un solo modelo no aprueba todas la evaluaciones consideradas, pero de los modelos evaluados el MIROC5 representó de manera más adecuada los procesos climáticos ya que tienen correlaciones significativas para los parámetros evaluados. Vale rescatar que los dos modelos presentaron correlaciones muy similares pero el MIROC5 proporciono resultados superiores en la estación de la UIS en el caso de precipitación y temperatura que la generadas por el modelo MPI-ESM-LR, Adicionalmente cuando se realizó el análisis de las estaciones con los nueve puntos el modelo MIROC5 presento un rango mayor en la variabilidad de los resultados lo que demuestra la capacidad del modelo para diversificar la precipitación y la temperatura de la zona.

Se recomienda validar todos los puntos centrales más cercanos de los píxeles del modelo climatológico escalado con la estación de estudio, se desconocen las causas, pero existe una relación entre ellos con respecto a la estación de estudio, algunos puntos centrales del modelo climatológico brindan mejores resultados que el punto más cercano a la estación climatológica.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMB, «FUENTES DEL AGUA». [En línea]. Disponible en: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=33>.
- [2] INTEGRAL, «ESTUDIOS Y DISEÑOS DEL PROYECTO DE REGULACIÓN DEL RÍO TONA EMBALSE DE BUCARAMANGA».
- [3] IDEAM, «SOLICITUD DE INFORMACION». [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>.
- [4] IPCC, «Long-term Projections: Centennial and longer Scenarios», 21-dic-2017. [En línea]. Disponible en: [http://www.ipcc-data.org/sim/gcm\\_monthly/AR5/Reference-Archive.html](http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/Reference-Archive.html).
- [5] P. N. Edwards, «History of climate modeling», *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, vol. 2, n.º 1, pp. 128-139, ene. 2011.
- [6] IPCC, «ACTIVIDADES», *Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [En línea]. Disponible en: [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_spanish.shtml](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml).
- [7] IPCC, «Quinto Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático», 2014. [En línea]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/report/ar5/index\\_es.shtml](https://www.ipcc.ch/report/ar5/index_es.shtml).
- [8] IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. 2013.
- [9] C. A. Bonilla-Ovallos y O. J. M. Sánchez, «Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia», *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Exactas Físicas Nat.*, vol. 41, n.º 158, pp. 107-118, mar. 2017.
- [10] NASA, «GLOBAL CLIMATE CHANGE VITAL SIGNS OF THE PLANET». [En línea]. Disponible en: <https://climate.nasa.gov/>.
- [11] LINA ACEVEDO ARISTIZÁBAL, «ESTIMACIÓN HIDROLÓGICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA.», UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, MEDELLÍN, 2009.
- [12] 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», UPB, 2014.
- [13] IPCC, «IPCC Fifth Assessment Report», *Intergovernmental Panel on Climate Change*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. [Accedido: 09-may-2017].
- [14] Graciela O. Magrin (Argentina), José A. Marengo (Brazil), «Central and South America».
- [15] Pennsylvania State University y National Center for Atmospheric Research, «MM5», *MM5 Community Model*. [En línea]. Disponible en: <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>. [Accedido: 11-may-2017].
- [16] IDEAM, Ministerio del Medio Ambiente, y PNUD, Eds., *Colombia: primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Bogotá, D.C: IDEAM, 2001.
- [17] Meteorological Research Institute of Japan, «MRI-CGCM2.3», *Global warming projection with the global climate model*. [En línea]. Disponible en: <http://www.mri-jma.go.jp/Dep/cl/cl4/yosoku/yosoku-en.htm>. [Accedido: 11-may-2017].
- [18] J. F. Ruíz Murcia, *Escenarios de cambio climático, algunos modelos y resultados de lluvia para Colombia bajo el escenario A1B*. Bogotá, Colombia: IDEAM, 2007.
- [19] Max-Planck-Institut für meteorologie, «ECHAM», *ECHAM*. [En línea]. Disponible en: <http://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/echam/>. [Accedido: 10-may-2017].

- [20] A. O. Rodríguez Roa, «Evaluación de las simulaciones de precipitación y temperatura de los modelos climáticos globales del proyecto CMIP5 con el clima presente en Colombia». IDEAM, 2012.
- [21] L. A. Acevedo Aristizábal y G. Poveda Jaramillo, «Comparación de series de precipitación con los GCM CCSM3, ECHAM5, HADGEM1 y MIROC 3.2 Hires, para el siglo XX en Colombia.», presentado en XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Cartagena de Indias, Colombia, 2008.
- [22] Palomino-Lemus, Reiner, Córdoba-Machado, Samir, Gámiz-Fortis, Sonia Raquel, Castro-Díez, Yolanda, y Esteban-Parra, María Jesús, «Statistical downscaling of summer precipitation in Colombia», en *Cambio Climático y Cambio Global*, Asociación Española de Climatología (AEC), 2014.
- [23] International Centre for Earth Simulation, «MIROC5», *ICES Foundation*, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.icesfoundation.org/Pages/ScienceItemDetails.aspx?siid=181>. [Accedido: 10-may-2017].
- [24] «STATISTICAL DOWNSCALING OF SUMMER PRECIPITATION IN COLOMBIA».
- [25] Gregory Flato (Canada), Jochem Marotzke (Germany), «Evaluation of Climate Models».
- [26] FICLIMA, «DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO FICLIMA».
- [27] IPCC, «Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático», QUINTO.
- [28] FIC, «El cambio climático». [En línea]. Disponible en: <https://www.ficlina.org/>.
- [29] STARDEX, «downscaling climate extremes».
- [30] STARDEX, «Statistical and Regional dynamical Downscaling of EXtremes for European regions», 2005 2002.
- [31] Acevedo L.A y Poveda G, «COMPARACIÓN DE SERIES DE PRECIPITACIÓN CON LOS GCM CCSM3, HADGEM1 Y MIROC 3.2 HIRES, PARA EL SIGLO XX EN COLOMBIA», 2008.
- [32] «GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONALES Y LOCALES A PARTIR DE MODELOS GLOBALES - GUÍA PARA TOMADORES DE DECISIONES». .
- [33] IPCC, «INFORME ESPECIAL DEL IPCC ESCENARIOS DE EMISIONES».
- [34] Guillermo Eduardo ARMENTA PORRAS, «ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURAS EN COLOMBIA».
- [35] AMB, «DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO». [En línea]. Disponible en: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=39>.
- [36] Andrés F. Hurtado, y Germán Poveda, «Dependencia del espacio-tiempo lineal y global y las hipótesis de Taylor para la lluvia en los Andes tropicales», 23-may-2009.
- [37] Jose D. Salas, *Applied Modeling of Hydrologic Time Series*. 1980.
- [38] Cort J. Willmott\*, Kenji Matsuura, «Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance».
- [39] Cort J. Willmott Scott M. Robeson Kenji Matsuura, «A refined index of model performance», 09-sep-2011.
- [40] Blanca Elvira Oviedo Torres – Gloria León Aristizábal, «GUÍA DE PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO REGIONAL Y LOCAL A PARTIR DE LOS MODELOS GLOBALES», IDEAM.
- [41] Julian Ramirez Villegas, Andrew J Challinor Philip K Thornton and Andy Jarvis, «Implications of regional improvement in global climate models for agricultural impact research», may 2013.
- [42] Philip Kraaijenbrink, Arthur Lutz, y Peter Droogers, «Climate adaptation Colombia». jul-2014.

- [43] Andrés Vélez, Andrés Ochoa, y Germán Poveda, «Validación de temperaturas medias mensuales del Eta CPTec/HadCM3 en Colombia para el escenario 20C3M», 2014.
- [44] Carlos Andrés Bonilla-Ovallos, Oscar José Mesa, «Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia», *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat*, p. 12, 2017.
- [45] WCRP World Climate Research Programme, «CMIP - Coupled Model Intercomparison Project - Overview», *CMIP Coupled Model Intercomparison Project*. [En línea]. Disponible en: <https://cmip.llnl.gov/>.
- [46] IPCC, «SRES escenarios», 2007. [En línea]. Disponible en: <http://www.ipcc-data.org/ar4/model-UKMO-HADGEM1-change.html>.
- [47] NASA, «Proyecciones a escala mundial de Global Earth Exchange de la NASA (NEX-GDDP)», 25-ene-2018. [En línea]. Disponible en: <https://cds.nccs.nasa.gov/nex-gddp/>.
- [48] NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX- GDDP), «NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP)». 08-jun-2015.
- [49] NASA, «Statistical Downscaling using the Regional Climate Model Evaluation System (RCMES)». [En línea]. Disponible en: <http://slideplayer.com/slide/5262660/>.
- [50] Masahiro Watanabe, Tatsuo Suzuki+, Ryouta O'ishi\*, Yoshiki Komuro+, Shingo Watanabe+, Seita Emori\*,+,#, Toshihiko Takemura@, Minoru Chikira+, Tomoo Ogura#, Miho Sekiguchi&, Kumiko Takata+, Dai Yamazaki\*\*, Tokuta Yokohata+, Toru Nozawa#, Hiroyasu Hasumi\*, Hiroaki Tatebe+, and Masahide Kimoto, «Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity», dic-2010.
- [51] enes, «CMIP5 Models and Grid Resolution», 2011. [En línea]. Disponible en: <https://portal.enes.org/data/enes-model-data/cmip5/resolution>.
- [52] MAX PLANCK INSTITUT FUR METEOROLOGIE, «MPI-ESM», *MAX PLANCK INSTITUT FUR METEOROLOGIE*. [En línea]. Disponible en: <https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/>.
- [53] Ficklin, Darren L. y Bradley L. Barnhart, «EXTRACCIÓN DE DATOS GCM DESCENTRALIZADOS EN SWAT FORMAT», 2014. [En línea]. Disponible en: <http://pages.iu.edu/~dficklin/netcdf-to-swat-climate-input-files.html>.