



Revista EIA  
ISSN: 1794-1237  
revista@eia.edu.co  
Escuela de Ingeniería de Antioquia  
Colombia

# MODELACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA EN NORTE DE SANTANDER

**Mena Rentería, Darwin; Cañon Ramos, Miguel Angel; Suárez Rodríguez, Ana María**  
MODELACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL  
RÍO PAMPLONITA EN NORTE DE SANTANDER

Revista EIA, vol. 17, núm. 33, 2020

Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia

**Disponible en:** <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149263063015>

**DOI:** <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1265>

# MODELACIÓN DE LOS IMPACTOS DE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA EN NORTE DE SANTANDER

MODELING THE IMPACTS OF THE SCENARIOS OF CLIMATE CHANGE IN THE BASIN OF THE PAMPLONITA RIVER IN NORTH OF SANTANDER

MODELANDO OS IMPACTOS DOS CENÁRIOS DE MUDANÇA DO CLIMA NA BACIA DO RIO PAMPLONITA NO NORTE DE SANTANDER

Darwin Mena Rentería [darwinmena@usantotomas.edu.co](mailto:darwinmena@usantotomas.edu.co)

*Universidad Santo tomas, Colombia*

Miguel Angel Cañon Ramos

[miguelcanon@usantotomas.edu.co](mailto:miguelcanon@usantotomas.edu.co)

*Universidad Santo tomas, Colombia*

Ana Maria Suárez Rodríguez

[anasuarezr@usantotomas.edu.co](mailto:anasuarezr@usantotomas.edu.co)

*Universidad Santo tomas, Colombia*

Revista EIA, vol. 17, núm. 33, 2020

Escuela de Ingeniería de Antioquia,  
Colombia

Recepción: 24 Noviembre 2018

Aprobación: 06 Junio 2019

DOI: <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1265>

Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=149263063015>

**Resumen:** En el siguiente estudio se presentan los resultados obtenidos a partir de una modelación hidrológica realizada en la cuenca del río pamplonita, Colombia; Se determinan los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico de la zona, utilizando los modelos de circulación global (GCM) junto a las trayectorias de concentración representativas por su siglas en inglés (RCP) para la proyección del clima. Se integraron las variables de precipitación, temperatura y caudal evaluadas para las condiciones actuales y para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. Las series climatológicas futuras, de 2015 a 2100, se generaron por medio de la metodología de reducción de escala basada en el método estadístico de la teoría del caos a partir de los datos obtenidos del modelo de circulación global CCMS4. Los datos obtenidos se utilizaron luego como entrada en la herramienta de modelación para América Latina y el Caribe Hydro-BID.

**Palabras clave:** Cambio climático, Reducción de escala, Hydro BID, GCM, RCP, Teoría del caos.

**Abstract:** The following study presents the results obtained from a hydrological modeling carried out in the Pamplonita river basin, Colombia; The potential impacts of climate change on the hydrological regime of the area are determined, using global circulation models (GCM) along with the representative concentration trajectories (RCP) for the projection of climate. The variables of precipitation, temperature and flow evaluated for the current conditions and for the scenarios RCP 2.6, RCP 4.5 and RCP 8.5 were integrated. The future climatological series, from 2015 to 2100, were generated by means of the scale reduction methodology based on the statistical method of chaos theory based on the data obtained from the global circulation model CCMS4. The data obtained was then used as input to the modeling tool for Latin America and the Caribbean Hydro-BID.

**Keywords:** Climate change, Reduction of scale, Hydro BID, GCM, RCP, Theory of chaos.

**Resumo:** O presente estudo apresenta os resultados obtidos a partir de uma modelagem hidrológica realizada na bacia do rio Pamplonita, Colômbia; Os potenciais impactos das mudanças climáticas sobre o regime hidrológico da área são determinados, utilizando modelos de circulação global (GCM), juntamente com as trajetórias de concentração representativas (RCP) para a projeção do clima. As variáveis precipitação, temperatura e vazão avaliadas para as condições atuais e para os cenários RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 foram integradas. As séries climatológicas futuras, de 2015 a 2100, foram geradas por meio da metodologia de redução de escala baseada no método estatístico da teoria do caos, com base nos dados obtidos do modelo de circulação global CCMS4. Os dados obtidos foram então utilizados como insumo para a ferramenta de modelagem para a América Latina e Caribe do Hydro-BID.

**Palavras-chave:** Mudança climática, Redução de Escala, Hydro BID, GCM, RCP, Teoria do Caos.

## INTRODUCCIÓN

El agua está relacionada con todos los componentes del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera). Por ello, el cambio climático afecta al agua mediante diversos mecanismos ya que el ciclo hidrológico está estrechamente vinculado a los cambios de la temperatura atmosférica y al balance radiativo. Por su localización geográfica, su orografía y una gran variedad de regímenes climáticos, Colombia se ubica entre los países con mayor riqueza en recursos hídricos en el mundo. Sin embargo, cuando se considera en detalle que la población y las actividades socioeconómicas se ubican en regiones con baja oferta hídrica, que existen necesidades hídricas insatisfechas de los ecosistemas y que cada vez es mayor el número de impactos de origen antrópico sobre el agua, se concluye que la disponibilidad del recurso es cada vez menor. (Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, 2010).

El cambio climático es definido por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) como una alteración en el régimen climático atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima. (Unidas, 1992). En este sentido el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM) dentro de su función de determinar la situación actual y posibles escenarios futuros del agua en Colombia, considera los componentes de oferta, demanda, calidad y riesgo hidrológico, a partir de las características de ocurrencia natural y afectaciones por su interrelación con el medio natural y la sociedad. (IDEAM, 2015). La evaluación de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos representa una preocupación en los diferentes niveles, lo que ha llevado a los organismos gubernamentales a realizar un esfuerzo por hacer frente a los efectos adversos; planteando acciones de mitigación y adaptación y fortaleciendo el desarrollo de investigación. (Arango, et al., 2012). En el caso particular de Colombia, a pesar de no ser un gran aportante de gases de efecto invernadero a la atmósfera, se ha determinado que hace parte de un

conjunto de naciones que se consideran más vulnerables a los efectos del cambio climático (Torres, 2010).

Según estudios realizados por parte del grupo de modelamiento de tiempo, clima y escenarios de cambio climático perteneciente al IDEAM la precipitación actual presenta un aumento de entre el 10% y el 40% comparado con las décadas anteriores, además la temperatura presenta un comportamiento acorde a la región, con anomalías entre 0.5°C y 1.5°C (Arango, et al., 2012). Adicionalmente, este instituto ha estimado que para los escenarios de cambio climático planteados en el periodo 2011-2040 se prevé un aumento de la precipitación que varía entre el 10% y el 30% (García, 2012). Por esta razón, para apoyar la evaluación de los impactos locales en los recursos hídricos existe la necesidad de desarrollar proyecciones climáticas a escala reducida que nos permitan obtener valores de precipitación y temperatura a futuro en la cuenca del río pamplonita.

En este estudio se evaluó la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Pamplonita y su proyección futura basados en escenarios de cambio climático obtenidos a partir de la técnica de reducción de escala (DownScaling) apoyado en los modelos climáticos globales de alta resolución, así como también el desarrollo de la modelación hídrica proyectada a través de la herramienta Hydro-BID el cual permite realizar la simulación de impactos del cambio climático sobre el recurso hídrico, esta información servirá de base para una planificación y gestión adecuada de la oferta hídrica superficial en la cuenca para un mediano y largo plazo.

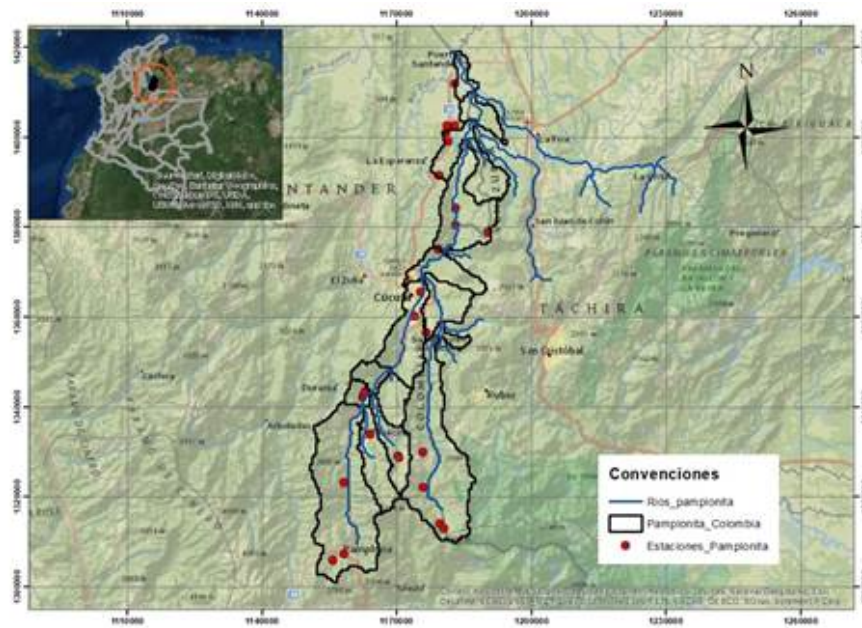
## **1. MATERIALES Y METODOS**

En este estudio se modelan los impactos del cambio climático en la hidrología con la aplicación del modelo para América latina y el caribe Hydro BID en la cuenca del río pamplonita en norte de Santander Colombia, se desarrolló una metodología por fases las cuales fueron divididas en tres grandes etapas, como primera etapa se encuentra la caracterización climática de la cuenca del Río Pamplonita, la cual consiste en hacer una revisión de antecedentes a partir de la información hidroclimática de la cuenca que fue suministrada por las diferentes entidades de la región y del país, como lo son la Corporación Autónoma Regional De la Frontera Nororiental (CORPONOR), El instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Plan de Ordenamiento y Manejo Cuenca Río Pamplonita (POMCA), además de informes relacionados con el estudio y evaluación de la cuenca. Una vez obtenida la información se seleccionaron las estaciones con registros históricos para los periodos desde 1989-2014, debido a que en muchas estaciones meteorológicas este periodo presenta una continuidad de datos históricos relevantes óptimos para la caracterización y análisis de datos. Posterior a esto se llevó a cabo la homogeneización y complementación de series de variables climáticas para poder obtener la caracterización climática de la cuenca presente y futura.

A partir de la caracterización de la cuenca se desarrolló el balance hídrico superficial que se encuentra estructurado por la recolección de datos, la modelación hidrológica, calibración y validación que permitirá la estimación de la oferta hídrica de la cuenca. Para efectuar este balance hídrico fue empleada la herramienta Hydro-BID que permitió evaluar la cantidad y calidad del agua presente y futura para la cuenca. Paralelo a esto se llevó a cabo la técnica de downscaling o reducción de escala donde se realizó un código en lenguaje Python con modelos climáticos globales (GCM) y los RCP estimados para el país los cuales fueron RCP de 2.6, 4.5 y 8.5 ya que son los escenarios que más presentan variación en precipitación y temperatura. Este procedimiento consiste en utilizar datos de salida climática de circulación global este método se realizó para las variables de temperatura y precipitación.

### *1.1 Caso de estudio*

La cuenca del río Pamplonita se encuentra ubicado al suroeste del departamento de norte de Santander, en la vertiente oriental de la cordillera oriental de Colombia, El área de la cuenca está delimitada por dos países Colombia y Venezuela pero para efectos de esta investigación solo se trabajara el territorio Colombiano; Está comprendida entre coordenadas planas Norte: 1.300.000 y 1.415.000 y Este: 1.150.000 y 1.195.000 posee un área de 134534,97 hectáreas. El cauce principal con una longitud de 300,64Km se forma en el municipio de Pamplona en la confluencia de las quebradas El Rosal y Navarro y finaliza cerca del centro poblado de Puerto Villamizar en el Municipio de Cúcuta, en la parte alta se ha identificado como zona de recarga hídrica debido al fenómeno de condensación, además por las coberturas vegetales presentes que regulan la dinámica hídrica; sus características forman parte de una zona montañosa; es el resultado de varios procesos naturales como los movimientos tectónicos y procesos como la erosión y el transporte de material particulado desde las partes más altas a las partes más bajas, sus suelos son poco desarrollados con valores de fertilidad bajos y ácidos (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental, 2010).



**Figura 1**  
Ubicación de la cuenca Río Pamplonita  
Autores

La parte alta se ha identificado como zona de recarga hídrica debido al fenómeno de condensación, además por las coberturas vegetales presentes que regulan la dinámica hídrica. Hay numerosas microcuencas que aunque con un volumen limitado estructuran una cadena de nacimientos de agua en la parte alta y que han sido priorizados por su importancia estratégica. La parte media presenta cuencas de baja jerarquía con mayor tamaño y con una longitud mayor, debido a la distancia recorrida y las corrientes que recibe, los volúmenes son considerables y definen el caudal que recibe el área metropolitana de Cúcuta para surtir el acueducto municipal. La parte baja tiene un caudal alto debido a la entrada de afluentes importantes como el río Táchira y la quebrada Faustiner. En general que en los dos primeros meses del año se presentan los valores más bajos de temperatura, en la cuenca predominan las temperaturas bajas y medias en la mayoría del territorio superando el 60% de este, mientras que las temperaturas altas solo se presentan en un 20% del territorio aproximadamente (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental, 2010).

El recurso hídrico en la cuenca se utiliza principalmente para consumo en Cúcuta y para riego de cultivos, principalmente de arroz en las cuencas media y baja. La cuenca del río Pamplonita tiene conflictos sociales con altos índices de pobreza, desempleo, migración, vulnerabilidad y dependencia. Es por esto que se pretende evaluar la vulnerabilidad climática del recurso hídrico superficial, para sistematizar la afectación sobre su disponibilidad frente a escenarios de cambio climático. (Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental, 2010)



## 1.2 Hidro-BID

La herramienta de simulación Hydro-BID es un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de LAC, bajo escenarios de cambio (p. ej., clima, uso del suelo, población), que permite evaluar la cantidad y calidad del agua, las necesidades de infraestructura, y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación en respuesta a estos cambios. (Nalesso, 2014).

Este contiene una Base de Datos de hidrología analítica (Analytical Hydrographic Dataset, LAC-AHD) que contiene más de 230,000 cuencas delineadas y cauces fluviales a lo largo de la región de América Latina y el Caribe, un Sistema de navegación GIS para examinar cuencas y cauces fluviales, una interfaz de datos climáticos para la obtención de datos de precipitación y temperatura para la zona y el período de interés y un modelo de lluvia-escorrentía basado en la formulación de factor de carga de cauces generalizados (GWLF), el cual permite generar un volumen de escorrentía por cada de las cuencas y permite simular a escalas muy pequeñas como a nivel de subcuencas. La AHD utiliza un modelo de base de datos vectorial en las que los atributos están representados como puntos, líneas y polígonos en vez de un raster en donde la data es almacenada en una celda (grid). El modelo de base de datos vectorial de la AHD permite atribuciones más realistas de los caudales, de las relaciones entre caudales y la estructura hidrográfica, si se compara con los enfoques hidrográficos de raster o celda. (Rinner, et al., 2014)

El software hidrológico de hydro-BID aplicado a este caso de estudio requirió como datos de entrada series de precipitación en centímetros (cm), temperatura en grados Celsius (°C) y por ultimo series de caudal en metros cúbicos por segundo (m<sup>3</sup>/s), se tomaron 16 estaciones de precipitación, 5 estaciones de temperatura y 3 estaciones de caudal con un registro histórico de 25 años (01/04/1989-31/12/2014) en temporalidad diaria a las cuales se realizó un procedimiento de datos faltantes por medio del promedio aritmético ya que el porcentaje de datos faltantes es menor al 10% en la tabla 1 se observa e listado de las estaciones utilizadas y en la figura 2 su ubicación.

Tabla 1  
Estaciones utilizadas cuenca Pamplonita

N°	Estacion	Fuente		Latitud	longitud
1	Villa del Rosario	IDEAM	16010010	7.817778	-72.477778
2	Santa Rita	IDEAM	16010040	8.185556	-72.368333
3	La Jarra	IDEAM	16010060	8.201944	-72.432222
4	Camilo Daza	IDEAM	16015010	7.316944	-72.718333
5	Planadas	IDEAM	16020304	8.216944	-72.436111
6	La Don Juana	IDEAM	16010020	7.697222	-72.601389
7	Ricaurte	IDEAM	16010100	8.018333	-72.350556
8	Iser Pamplona	IDEAM	16015020	7.373111	-72.645
9	Puerto santander	IDEAM	16020370	8.351389	-72.401667
10	Cinera Villa Olga	IDEAM	16025040	8.167778	-72.468611
11	La Caldera	IDEAM	16020110	7.930278	-72.509167
12	La Esperanza	IDEAM	16015030	7.569722	-72.533889
13	Naltama Parque	IDEAM	16015090	7.424444	-72.442111
14	Carmen de Tonchala	IDEAM	16025010	7.848889	-72.566111
15	Tasajero	IDEAM	16010340	7.993028	-72.461722
16	Cerro Pelao	IDEAM	16020180	8.011944	-72.500278
17	Aguas claras	IDEAM	16017010	8.233611	-72.417222
18	Automatica la Don Juana	IDEAM	16017020	7.687972	-72.605472
19	Paso de los rios	IDEAM	16017040	8.033333	-72.416667

Autores

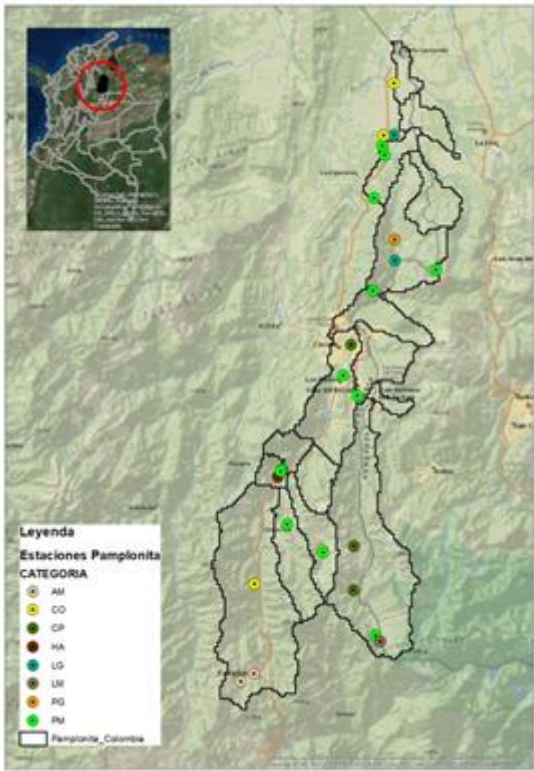


Figura 2  
Ubicación de las estaciones  
Autores



El modelo implementa datos de uso del suelo y cobertura vegetal que son obtenidos de la Base de Datos de Hidrología Analítica (ADH) que se incluye en el software, de la cual se obtuvieron también los drenajes, la hidrografía, la delimitación de la zona de estudio, así como datos propios de la geometría de la cuenca como lo son el área, la longitud del cauce principal etc (Rinner, et al., 2014) Hydro-BID posee un módulo que permite realizar una interpolación de las series de tiempo de precipitación y temperatura de las estaciones climatológicas a cada una de las subcuencas por medio de los centroides de las mismas, para ello es necesario ingresar las coordenadas de las estaciones y de los centroides.

### *1.3 Modelo de circulación global (GCM) y reducción de escala*

Los modelos climáticos globales (MCG) son la herramienta principal para comprender cómo puede cambiar el clima mundial en el futuro. (Maraun, et al., 2010). Los modelos climáticos globales presentan información en escalas espaciales y temporales mayores que las requeridas por los modelos hidrológicos, y son por lo tanto inadecuados para evaluar el efecto local del cambio climático. Se requiere realizar un proceso de reducción de escala sobre las proyecciones de los modelos climáticos, este proceso es conocido como reducción de escala. En este caso de estudio se implementó este proceso (reducción de escala) basado en la teoría del caos las cuales crean una relación entre modelos climáticos de gran escala, conocidos como predictores y las variables climáticas locales, conocidas como predictandos. (Duarte, 2017)

Se seleccionaron 3 escenarios de cambio climático de los 4 planteados por el Panel de Expertos Intergubernamentales sobre Cambio Climático (IPCC); estos fueron el RCP 2.6 RCP 4.5 Y RCP 8.5. Ya que para cada una de las categorías de emisiones un RCP contiene un conjunto de valores iniciales y el valor estimado de las emisiones para el año 2100, basado en suposiciones sobre la actividad económica, fuente de energía, crecimiento de la población entre otros factores socio-económicos (Duarte, 2017). El escenario RCP 2.6 fue desarrollado por el equipo de modelación IMAGE. Este escenario representa en la literatura el más bajo nivel de concentración de gases de efecto invernadero. El escenario RCP 4.5 fue desarrollado por el equipo de modelación GCAM. Es un escenario de estabilización en el cual la fuerza radiativa total se estabiliza inmediatamente después del año de 2100 sin sobrepasar el nivel objetivo de fuerza radiativa a largo plazo. El escenario RCP 8.5 fue desarrollado utilizando el modelo MESSAGE y el marco de referencia IIASA. Esta trayectoria está caracterizada por el incremento de emisiones de gases de efecto invernadero a través del tiempo. (Wayne, 2013).

Posteriormente se desarrolló la selección del modelo de circulación global (GCM) para obtener la proyección de las variables climáticas precipitación y temperatura inicialmente se preseleccionaron 3 modelos teniendo en cuenta una búsqueda bibliográfica de estudios, donde se evaluaron modelos de circulación global en Colombia el documento tiene como título “Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para

la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia” allí se evaluó el desempeño de algunos GCM a partir de métricas para todo Colombia (Rodríguez, 2010). Los modelos que se escogidos para identificar cual se ajustaba más, fueron CCSM4, MPI-ESR.MR y CanCM4, Para cada modelo se ingresó el mismo periodo de tiempo con los escenarios de RCPs mencionados, con el fin de determinar a partir de métricas estadísticas el modelo más óptimo el cual se ajuste a las condiciones de la zona, para esta primera variable de precipitación se determinó que el modelo que más se ajusta a las condiciones de la cuenca, es el modelo CCSM4. De igual forma se realizó el procedimiento para la variable Temperatura de la zona, con el mismo periodo de tiempo, modelos climáticos globales, y escenarios RCPs.

El modelo que más se ajustó a las condiciones actuales de la zona fue el modelo CCSM4 el cual se evaluó a partir de la correlación donde se muestra el "grado de ajuste," o semejanza, entre los valores del modelo y los patrones observados. La correlación valora el rango entre -1 y 1, donde 1 representa la correlación perfecta y cero ninguna correlación. (Rodríguez, 2010) Como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2**  
RMSE para los modelos de circulación global

Modelo	Precipitación	Temperatura
CCSM4	0,698	0,286
MPI	0,038	0,187
canCM4	0,134	0,272

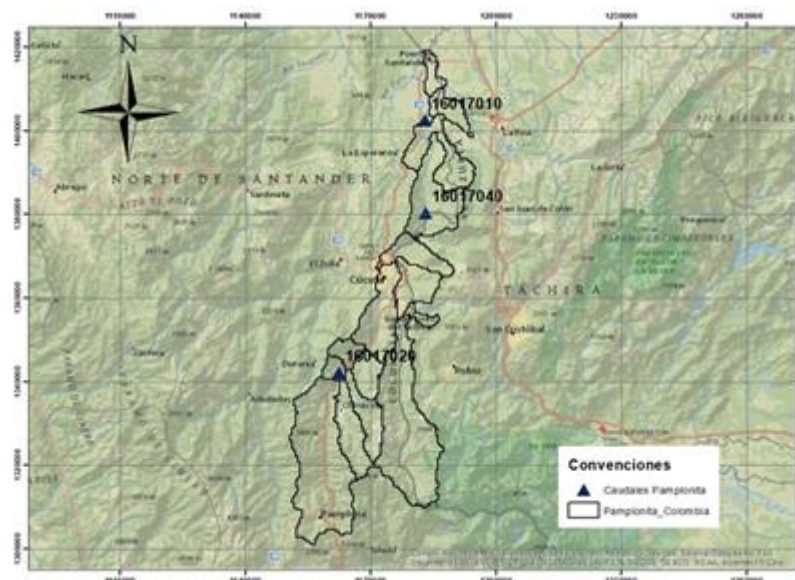
Autores

La técnica de reducción de escala mencionada anteriormente considera los conceptos del caos determinístico y la dinámica no lineal en series climatológicas. Evalúa la presencia de caos determinístico para diferentes intervalos de acumulación de la precipitación de las series de tiempo históricas tanto de las estaciones climáticas locales, como del modelo climático global y se construye el modelo caótico predictivo con los resultados de tiempo de retardo, este método requiere como datos de entrada las series de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas y un catálogo que contiene las coordenadas de las estaciones y el modelo histórico del GCM al igual que los datos de los RCP seleccionados y como salidas genera las series reducidas, un error que evalúa el desempeño del modelo que en este caso es el RMSE para la validación del modelo. (Duarte, 2017).

#### 1.4 Calibración y validación del modelo Hydro-BID

La calibración del modelo se llevó a cabo teniendo en cuenta la cuenca más aguas arriba hasta la cuenca más aguas abajo, se desarrolló por subcuencas de forma manual por ensayo y error relacionando los parámetros de la cuenca inmediatamente anterior hasta llegar a la salida del cauce principal, se tuvo en cuenta un periodo de calibración comprendido entre

01/01/1989 al 31/12/2003 ya que las series de datos presentaban el periodo más completo. Se calibro por medio der las estaciones de caudales como se muestra en la figura 3 se realizó en tres secciones de la cuenca, la primera calibración con la estación 16017020) y COMID 300608300, la segunda calibración en la estación 16017040 COMID 300526900 y por último la tercera calibración con la estación 16017010 COMID 300482400.



**Figura 3**  
Estaciones de caudales  
Autores

Los parámetros para realizar el proceso de calibración son, el número de curva, que se usa para caracterizar el tipo de suelo de la cuenca y su hidrología; este parámetro oscila entre 0 y 1, el contenido disponible de agua (AWC) que representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo para ser usada por las plantas, afectando la infiltración hacia el agua subterránea, el coeficiente de recesión (R) que evidencia cómo el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie contribuye a los caudales de los ríos o corrientes superficiales después de un evento de lluvia y por ultimo las pérdidas del sistema o el seepage, que representa el intercambio entre las aguas sub-superficiales con los cuerpos de agua más profundos, en donde la cantidad de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida del modelo. (Morena, et al., 2014).

Otros parámetros importantes son el factor de evapotranspiración de la estación de cultivo (Grow season ET factor) y el factor de evapotranspiración de la estación de latencia para cuando hay o no presencia de cultivos en la cuenca. Estos parámetros pueden ser un solo valor aplicado a todas las cuencas o un multiplicador de los valores de las cuencas, en este caso de estudio se le otorgo el valor de 1, ya que en la cuenca se encuentran una gran variedad de cultivos diferenciados por su tipo y su estacionalidad.

En los resultados finales Hydro-BID integra una serie de métricas con los cuales se evalúa el proceso de calibración estas métricas se observan en la tabla 3 la idea final del proceso es encontrar un equilibrio entre las variables estadísticas y las variables hidráulicas.

**Tabla 3**  
Valores óptimos métricas

Métrica	Valor optimo
Volumen del error general	Más cercano a 0
Correlación (R)	0-1
Correlación Modificada	0-1
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0 - 0.1 insatisfactorio 0.2 - 0.4 es satisfactorio 0.4 - 0.6 es bueno 0.6 - 0.8 es muy bueno >0.8 es excelente

Cabrera (Cabrera, s.f.)

## 2. RESULTADOS

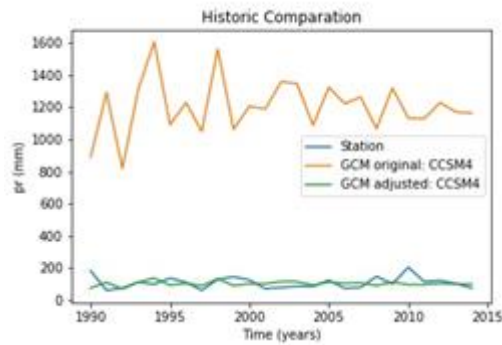
Se evaluó el desempeño de la reducción de escala por medio de la métrica RSME para estimar la correlación entre los datos del GCM antes y después del proceso de reducción de escala respecto a las futuras de las estaciones climatológicas. En la tabla 4 se evidencia es RSME de cada uno de los RCP con las variables climatológicas (precipitación y temperatura) se puede evidenciar que en la variable de temperatura el RMSE se acerca más al valor optimo que es 0 la técnica de reducción de escala permite minimizar los niveles de error que se generan aplicando los modelos de circulación global para la zona de estudio.

**Tabla 4**  
RMSE Después de la técnica de reducción de escala

RSME			
RCP	2.6	4.5	8.5
Temperatura	0,89	0,86	0,86
Precipitación	13,99	13,61	13,87

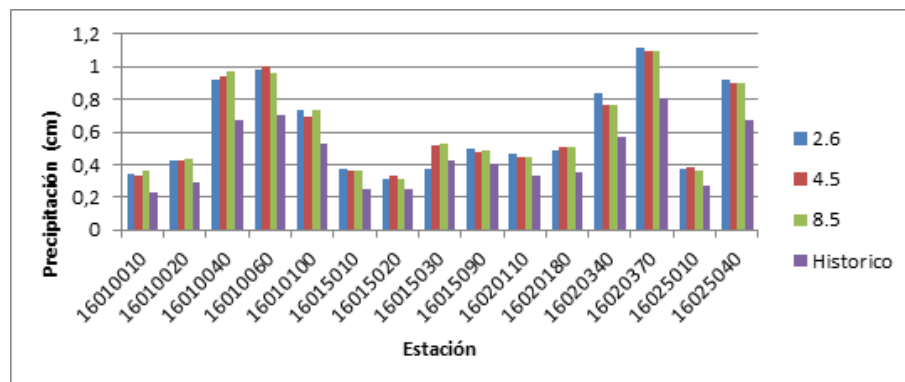
Autores

De igual manera en la figura 4 se puede observar la comparación del GCM aplicado a la zona de estudio sin la técnica de reducción de escala donde se evidencia una sobreestimación de los datos, con el GCM ajustado a la técnica donde este nivel de error se minimiza



**Figura 4**  
Comparación datos históricos con el GCM  
Autores

En las figuras 5 y 6 se puede observar los valores promedio de cada uno de los RCP con los valores históricos de cada una de las estaciones tanto de precipitación como de temperatura, en la figura 5 de precipitación no se muestra una tendencia clara de que RCP aumenta o disminuye constantemente ya que en algunas estaciones el mayor aumento se presenta en el RCP 2.6 y en otras el RCP 8.5. Lo contrario pasa en la figura 6 de temperatura donde se evidencia que los valores para cada uno de los RCP son similares a los históricos.



**Figura 5**  
Comparación de los promedios de precipitación generadas por estación  
Autores



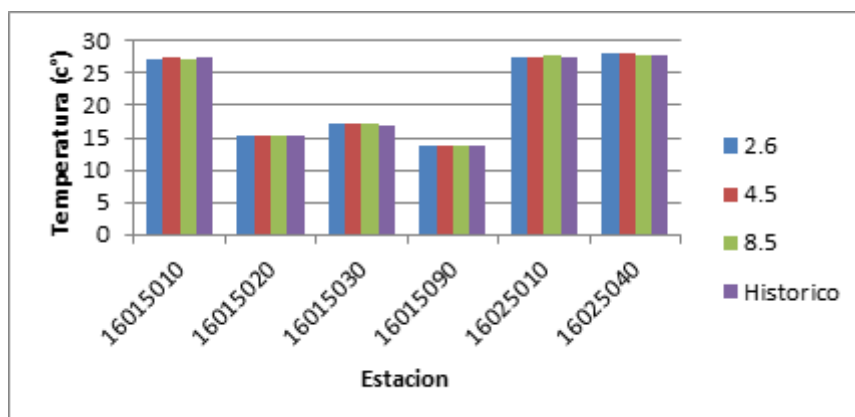


Figura 6

Comparación de los promedios de temperatura generadas por estación

Autores

## 2.1 Calibración y validación del modelo

En el momento de realizar la calibración se realizaron más de 40 pruebas hasta llegar a los resultados esperados como se muestra en la tabla 5 para la subcuenca de salida 300482400, a lo largo de esta calibración se identificó como los diferentes parámetros inducían en la curva de duración; si se aumentaba el seepage, el volumen de los caudales reflejados en la curva de duración disminuía; también se estableció que cuando el valor asociado a R suaviza la línea es decir que si se aumentaba, la pendiente de la curva reflejaba este mismo comportamiento, cuando el valor del número de curva se reduce los caudales disminuyen siendo menos sensibles a los eventos de precipitación. Hay que tener en cuenta que para los parámetros de número de curva y el contenido de agua almacenado en el suelo, el valor que se ingresa en la interfaz de los parámetros se toma como un multiplicador, en donde cuando el valor ingresado se encuentra entre 0 y 1 implica una disminución en el valor que se encuentra anidado con la base de datos AHD.

Tabla 5.

Parámetros de calibración

Parámetro	Valor
Curve Number	0,6
AWC	0,00001
R Coefficient	0,06
Seepage	0,008
Grow Season ET Factor	1
Dormant Season ET factor	3,7

Autores

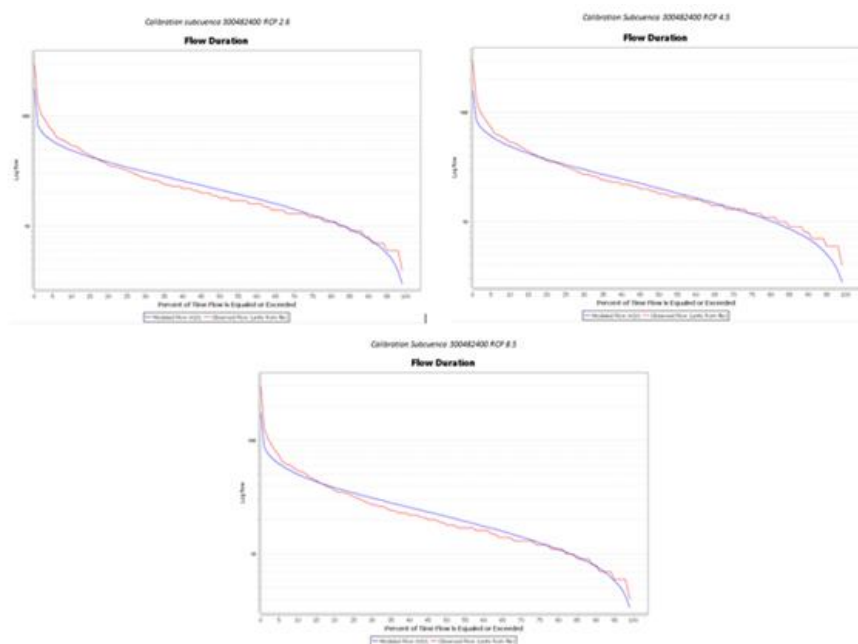
Al aplicar los parámetros se obtuvieron las métricas de desempeño como se muestra en la tabla 6 a nivel diario y mensual para cada uno de los RCPs

**Tabla 6**  
Métricas de desempeño

Métrica	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual	Valor diario
Volumen general de error	-4,87	-4,78	-7,2	-7,07	-3,52	-3,41
Correlación (R)	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0
Correlación modificada	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0
Eficiencia Nash-Sutcliffe	0,62	0,62	0,62	0,45	0,63	0,47

Autores

Finalmente, se obtuvieron las curvas de duración arrojadas por el programa, después del proceso de calibración para cada subcuenca, en donde se evidencia el ajuste obtenido entre los datos simulados y los datos observados, mostradas en la figura 7.



**Figura 7**  
Curvas de duración Hydro-BID

Autores

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros de calibración de HydroBID se obtuvo que el parámetro más sensible es el AWC ya que este representa el volumen de agua que es capaz de absorber el suelo, y el número de curva por que representa el nivel de impermeabilización ya sea natural o antrópico. Las métricas de desempeño obtenidas durante el proceso de calibración se encuentran cercanas al rango óptimo, demostrando que los resultados finales de la simulación son confiables y que el modelo representa la realidad de la zona de estudio.

Al finalizar el proceso de simulación, aplicando las series de datos de precipitación y temperatura obtenidas de la reducción de escala y luego de integrarlas en el modelo de Hydro-BID, se obtuvieron las series de caudales para las condiciones actuales periodo de 1989 a 2014 y para las condiciones futuras bajo los escenarios de cambio climático ya mencionados periodo de 2014 a 2100, en temporalidad mensual y diaria, que representan la escorrentía generada a lo largo de la cuenca. Adicionalmente se obtuvieron los porcentajes de variación de caudal de cada uno de los escenarios respecto a las condiciones actuales, dando como resultado que se presentará una posible disminución en el caudal entre el 7.61% y 12% para el escenario RCP 2.6, entre el 1.82% y el 10.28% para el escenario RCP 4.5 y entre el 6.83% y el 13%. Finalmente se evidenció que el modelo Hydro-BID representó de manera más precisa las condiciones mensuales que las diarias sin embargo en ambos casos se obtienen métricas de desempeño cercanas a los valores aceptables y excelentes.

### 3. Discusión

Teniendo en cuenta el aumento en la temperatura media de la zona, se concluye que para el final del siglo la temperatura aumente de 2 a 3 grados centígrados, lo que representa un consecuente aumento de fenómenos naturales, como sequías en las diferentes regiones del país, que no se encuentran en condiciones para afrontar este tipo de fenómenos y una mayor demanda del recurso hídrico. Así mismo la modelación permite tomar medidas preventivas y hacerle frente a problemáticas de abastecimiento y uso del agua. Así mismo a partir de la modelación climática, se logró concluir que estos modelos climáticos globales no siempre se ajustan a los datos de entrada del modelo debido a que muchos de estos contienen información más amplia de sus elementos subestimando así los datos de entrada de las variables climatológicas.

El proceso de reducción de escala permite representar de forma más acertada las condiciones reales de la zona de estudio, aumentando la correlación entre los datos observados y los datos históricos del GCM. Lo que se evidencia en los resultados de la métrica RSME es óptimo para el modelo. Hydro-BID representó de forma acertada las condiciones medias y mínimas de la zona de la cuenca del río Pamplonita en términos de caudal, lo que se evidencia al comparar el comportamiento del régimen de escorrentía generado como resultado de la simulación con el registro histórico de caudales. De la misma forma, la simulación de este programa representa mejor las condiciones mensuales de la cuenca, lo cual se evidencia en las métricas de desempeño.

### REFERENCIAS

- Arango, C. y otros, 2012. Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente, Bogotá: IDEAM.
- Cabrera, J., s.f. Calibración de modelos hidrológicos, Bogotá: s.n.

- Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, V. Y. D. T., 2010. *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental, 2010. *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del Río Pamplonita*, Cucuta: s.n.
- Duarte, F. S., 2017. *Técnica de reducción de escala estadística basada en la teoría del caos: Aplicación y desempeño en la Cuenca del Río Bogotá*, Bogotá: s.n.
- Estudio Nacional del Agua, 2014. *Indíces de Regulación Hídrica*. [En línea] Available at: [Dodumenacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/02308/ENA\\_2014.pdf](http://dodumenacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/02308/ENA_2014.pdf)
- García, M. c., 2012. Variabilidad climática, cambio climático y recurso hídrico en Colombia. *Revista de ingeniería Universidad de los andes*, p. 5.
- IDEAM, 2015. *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011 - 2100*, Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Maraun, D. y otros, 2010. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, Septiembre.p. 48.
- Morena, F., Miralles-Wilhelm, F. & Muñoz, R., 2014. *Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos para el cambio climático sobre los recursos hídricos, parte 2*, s.l.: Banco interamericano de desarrollo.
- Nalesso, M., 2014. *Hydro-BID*, s.l.: Banco Interamericano de desarrollo.
- Rinner, J., Bruhn Mark, Miralles-Wilhelm, F. & Muñoz Castillo, R., 2014. *Base de datos de hidrología analítica*, s.l.: BID.
- Rodríguez, A., 2010. *Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia*, Bogotá: IDEAM.
- Sistema de Información Ambiental de Colombia, 2014. *SIAC*. [En línea] Available at: [www.siac.gov.co/climaticovulnerabilidad](http://www.siac.gov.co/climaticovulnerabilidad)
- Torres, B. E. O., 2010. *Generación de escenarios de cambio climático regionales y locales a partir de modelos globales*, Bogotá: IDEAM.
- Unidas, N., 1992. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*, s.l.: s.n.
- Wayne, G., 2013. *The beginner's guide to representative concentration pathways*, Bogotá: s.n.