

**Escenarios de Cambio Climático en
Colombia y Uruguay. Explorando el
modelo hidrológico HYDROBID**
*Climate Change Scenarios in Colombia and
Uruguay. Exploring HYDROBID hydrological
model*



Editores

Juana Sanz

Irene de Bustamante





Serie: Cuadernos de Geomática

7. Escenarios de Cambio Climático en Colombia y Uruguay.
Explorando el modelo hidrológico HYDROBID

Series: Notes on Geomatics

7. Climate Change Scenarios in Colombia and Uruguay. Exploring HYDROBID hydrological model

Instituto Madrileño de Estudios Avanzados-Agua
Avenida Punto Com, nº 2., 28805 Alcalá de Henares, Madrid

Centro para el Conocimiento del Paisaje
Calle Rocha del Cine 41, 12415 Matet, Castellón

Alcalá de Henares
2020

ISBN: 978-84-09-17885-8

PREFACIO

Una de las consecuencias del cambio climático será la alteración del régimen hídrico natural de las cuencas de drenaje. El proceso, como todo lo que involucra a los distintos sistemas ambientales, es complejo, por lo que aventurarse en la previsión de escenarios de modificación hidrológica debido a las posibles tendencias de cambio climático no deja de tener una componente de incertidumbre, aunque sea más que necesario aventurarse en ellas para poder gestionar adecuadamente las necesidades hídricas futuras.

En este tipo de situaciones, cuando se quiere establecer un escenario que plantee cambios en las características ambientales de una cuenca de drenaje para obtener cierta luz sobre sus consecuencias hidrológicas futuras, la modelización se impone. Es una forma relativamente asequible de predecir las consecuencias a futuro de esos cambios para poder anticiparse a los aspectos más negativos que tales alteraciones puedan acarrear.

Hydro-BID es uno de esos modelos hidrológicos desarrollados para analizar tales situaciones, amparadas bajo el amplio paraguas de los cambios ambientales, incluyendo en éstos el cambio climático. A diferencia de otros modelos hidrológicos, Hydro-BID posee unas características propias que le convierten en una herramienta con gran potencial y que le diferencian de otros modelos que también podrían hacer análisis similares, como es el haberse orientado a cuencas de América Latina y el Caribe, la inclusión de una base de datos espacial que incorpora parámetros básicos de la modelización, la relativa facilidad de uso y el estar específicamente concebido para el análisis de escenarios de cambio climático.

Eso es lo que analizan las tres contribuciones que en este libro se recogen. Son ensayos que, además, de evaluar la proyección futura del posible impacto climático, también valoran el programa y se aplican a casos de estudio concretos.

El primero de ellos se aplica a una cuenca característica de la región Andina de Colombia, la cuenca del Río Coello. Para analizar las posibles consecuencias hidrológicas del cambio

climático se utilizó una serie temporal de 20 años (1995-2015) y se establecieron dos escenarios de cambio: uno con aumento de la temperatura de 2°C y aumento de la precipitación en un 20% y, el otro, con aumento de la temperatura de 2°C pero descenso de la precipitación de un 20%.

El segundo estudio se aplicó a la cuenca alta del Río Negro, en Uruguay. Incluye una validación de la calibración inicial, pero también valora, además de los escenarios de cambio climático la posible incidencia en el régimen hídrico de la cuenca de nuevas plantaciones de eucaliptus.

El último trabajo también se desarrolla en una cuenca de Colombia, la del Río Chicamocha, localizada en una zona climatológica y ambientalmente distinta a la del río Coello del primer estudio. En esta ocasión se utiliza una serie temporal corta de 5 años y se plantean tres escenarios: uno que sólo tiene en cuenta un aumento de temperatura de 1°C y dos más que junto a la variación en temperatura de 1°C consideran un incremento y descenso de precipitación en un 10% respectivamente.

Índice temático

Título y autores	Página
Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello (departamento del Tolima, Colombia) con el programa Hydro-BID	
<u>Freddy Leverí Amaya</u>, Juan Antonio Pascual-Aguilar	1
Desarrollo de un modelo de balance hídrico en la cuenca alta del Río Negro (Uruguay): Análisis de la disponibilidad de agua en diferentes escenarios	
<u>Marcelo Sadres Blanco</u>, Juan Antonio Pascual Aguilar	57
Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha en Colombia, con el programa Hydro-BID	
<u>Paula Rincón Lara</u>, Juan Antonio Pascual Aguilar	113
<u>Autores para correspondencia</u>	

Índice de autores

Autor	Afiliación
Leverí Amaya, Freddy	Leverí y Castro Ingenieros S.A.S Avenida Suba 100-93 Oficina 403 Edificio Arco, Bogotá D.C., Colombia freddyleverí@hotmail.com , ingenieria@levca.com.co
Pascual Aguilar, JuanAntonio	Centro para el Conocimiento del Paisaje Calle Rocha del Cine 41, 12415, Matet, España Instituto IMDEA Agua Avenida Punto Com nº 2, 28805, Alcalá de Henares, Madrid, Spain info@cpaisaje.org juanantonio.pascual@imdea.org
Rincon Lara, Paula Vanessa	Consultora Independiente Consorcio Pavicar Carrera 13A 89-31 Bogotá D.C., Colombia paularlara@gmail.com
Sadres Blanco, Marcelo	Dirección Nacional de Medio Ambiente Galicia 1133 Montevideo, Uruguay msadresb@gmail.com marcelo.sadres@mvtoma.gub.uy

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello (departamento del Tolima, Colombia) con el programa Hydro-BID

F. Leverí-Amaya^a, J.A. Pascual-Aguilar^{b,c}

^aLeverí y Castro Ingenieros S.A.S, Bogotá, Colombia

^bCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^cInstituto IMDEA-AGUA.

Resumen

Con el ánimo de contar con una herramienta práctica para la gestión del recurso hídrico en las cuencas hidrográficas colombianas, en este trabajo se desarrolló la caracterización hidrográfica de la Cuenca del río Coello, en el departamento de Tolima, Colombia, mediante la Herramienta Hydro-BID desarrollada por el BID en colaboración con el RTI.

La cuenca del río Coello se localiza en la parte centro norte del departamento del Tolima, en inmediaciones de la cordillera central colombiana, con una extensión aproximada de 1842 km², siendo parte integral de la cuenca alta del río Magdalena, afluente principal de Colombia.

En el desarrollo del modelo en la herramienta Hydro-BID, se consideraron como principales áreas de estudio la hidrología, incluyendo el estudio estadístico para la complementación y homogenización de datos, el manejo de cartografía y SIG; conocimiento y utilización de programas para la modelización hidrológica de cuencas y la gestión integral del recurso hídrico frente a los cambios climáticos que sufre la región.

Para la caracterización de la cuenca se desarrollaron 5 etapas metodológicas, iniciando con una visión general de la herramienta, su entorno y software de apoyo; posteriormente se realizó la adquisición, ordenamiento y complementación de la información climatológica base de la cuenca en estudio; se continuó con la construcción de la base de datos para la alimentación de Hydro-BID con la revisión y definición de parámetros hidrológicos para el desarrollo del modelo; seguidamente, se desarrolló la puesta en marcha de la herramienta con su calibración, considerando los datos de caudales registrados en la cuenca estudiada, para finalmente obtener resultados hidrológicos confiables y proceder a la variación de escenarios climáticos como herramienta para la gestión del recurso hídrico en décadas futuras.

Con los resultados obtenidos se observó que la herramienta Hydro-BID logra una calibración aceptable del modelo respecto a los datos históricos de caudales de la cuenca, generando volúmenes de error menores al 5% de la correlación media entre

los datos modelados y los observados en la misma. Lo anterior, genera una buena confiabilidad en el volumen total final de flujo a la salida de la cuenca, y valores de oferta hídrica bastante cercanos a los dictaminados por el IDEAM en el ENA 2014 y 2018 para la región de la cuenca del río Coello.

En cuanto a la caracterización hidrográfica de la cuenca, se observa, en su estado actual, una tendencia moderadamente decreciente en su flujo total anual para las décadas analizadas, mostrando una posible pérdida de oferta hídrica en años futuros. Lo anterior, es concordante con los escenarios de cambio climático realizados, teniendo en cuenta que al proponer una elevación de temperatura en 2°C en las próximas décadas, sumado a la variación positiva y negativa de precipitación en un 20%, se evidencian incrementos de evapotranspiración, lo que para uno de los escenarios generará pérdidas importantes de flujo en la cuenca próximas al 38% respecto al volumen promedio modelado para las décadas actuales; y en el otro, se podrían presentar incrementos cercanos al 26% del flujo, por lo que existe la necesidad de contar, por parte de la autoridad ambiental colombiana, con una gestión integral del manejo del recurso hídrico en la cuenca para minimizar los posibles efectos de desabastecimiento o eventos extremos de inundación particularmente en la parte final de la cuenca del río Coello.

Palabras clave: Modelación hidrológica, Escenarios de cambio climático, ENSO, región Andina colombiana

Hydrological characterization of the Coello river basin (department of Tolima, Colombia) with the Hydro-BID software

F. Leverí-Amaya^a, J.A. Pascual-Aguilar^{b,c}

^aLeverí y Castro Ingenieros S.A.S, Bogotá, Colombia

^bCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^cInstituto IMDEA-AGUA.

Abstract

With the aim of having a practical tool for the management of water resources in the Colombian hydrographic basins, in this paper the hydrographic characterization of the Coello River Basin was developed, in the department of Tolima, Colombia, through the Hydro-BID Tool developed by the IDB in collaboration with the RTI.

The Coello river basin is in the north central part of the department of Tolima, in the immediate vicinity of the central Colombian mountain range, with an approximate area of 1842 km², being an integral part of the upper Magdalena river basin, the main tributary of Colombia.

In the development of the model in the Hydro-BID tool, hydrology was considered as the main areas of study, including the statistical study for the complementation and homogenization of data, the management of cartography and GIS; knowledge and use of programs for the hydrological modeling of basins and the integral management of water resources in the face of climatic changes in the region.

For the characterization of the basin, 5 methodological stages were developed, starting with an overview of the tool, its environment and supporting software; subsequently the acquisition, ordering and complementation of the base climatological information of the basin under study was carried out; The construction of the database for the feeding of Hydro-BID continued with the revision and definition of hydrological parameters for the development of the model; Next, the implementation of the tool with its calibration was developed, considering the flow data recorded in the basin studied, to finally obtain reliable hydrological results and proceed to the variation of climatic scenarios as a tool for water resource management in decades future.

With the results obtained, it was observed that the Hydro-BID tool achieves an acceptable calibration of the model with respect to the historical flow data of the basin, generating error volumes less than 5% of the average correlation between the modeled data and those observed therein. This generates good reliability in the final

total volume of flow at the exit of the basin, and water supply values quite close to those dictated by IDEAM in the 2014 and 2018 ENA for the Coello river basin region.

Regarding the hydrographic characterization of the basin, there is, in its current state, a moderately decreasing trend in its total annual flow for the analyzed decades, showing a possible loss of water supply in future years. The foregoing is consistent with the climate change scenarios carried out, taking into account that when proposing a temperature rise of 2 ° C in the next decades, in addition to the positive and negative variation of precipitation by 20%, increases in evapotranspiration, which for one of the scenarios will generate significant losses of flow in the basin close to 38% with respect to the average volume modeled for the current decades; and in the other, there could be increases near 26% of the flow, so there is a need for the Colombian environmental authority to have comprehensive management of water resources management in the basin to minimize the possible effects of shortages or extreme flood events particularly in the final part of the Coello river basin

Keywords: Hydrological modeling, Climate change scenarios, ENSO, Colombian Andean region

1 Introducción

La hidrografía colombiana es una de las más extensas y ricas de América latina, contando en la actualidad con el 5% del recurso hídrico del planeta (IDEAM, ENA, 2018); sin embargo, esta oferta hídrica no se encuentra repartida de manera regular en el territorio colombiano, lo que ha generado zonas con excesos de precipitación como es el caso de la región de los Llanos Orientales y la región Pacífica colombiana, y por otro lado zonas áridas y susceptibles a desabastecimientos como ocurre al norte de la región Atlántica. Además, también se debe tener en cuenta los cambios climáticos producidos por los efectos del ENSO (IDEAM, Tomo 1, 2015), que han generado sobre la hidrografía colombiana variaciones importantes de los regímenes de precipitación y, consecuentemente, inundaciones y sequías extremas con periodicidades cada vez más cortas; afectando de manera importante las cuencas de cauces naturales que sirven para el abastecimiento de poblaciones, que en la mayoría de los casos se encuentran sobre las riberas.

Es, por tanto, necesario, además de contar con un registro temporal homogéneo y completo de la hidrología y climatología de la región, acceder a programas de modelación que se aproximen cada vez más a la realidad de las cuencas hidrográficas, representando los diferentes procesos que se dan en ellas, como transformar inicialmente una cierta precipitación en escorrentía (Pascual y Diaz, 2016), además de representar un balance hídrico acertado que pueda servir para la gestión integral del recurso hídrico. Y que también tengan opciones de simulación de transporte de sedimentos, calidad de agua y cambios climáticos futuros.

Entre los programas más utilizados en Colombia para la simular la escorrentía en cuencas, principalmente para la determinación de caudales en eventos extraordinarios utilizados para diseño, destaca el software HEC-HMS (IDEAM, 2018), desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos para la simulación de procesos hidrológicos en sistemas de cuencas detríticas (<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). Sin embargo, esta herramienta no cuenta en la actualidad con opciones de simulación de cambios climáticos, por lo que es poco eficaz a la hora de gestionar los recursos hídricos futuros.

Recientemente el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), conociendo las necesidades de la región de América latina y el Caribe, también sus perspectivas ante el cambio climático, que pueden afectar el desarrollo de proyectos gestionados por ellos y los diferentes países, concibió la herramienta Hydro-BID para dar soporte a la región en el manejo y planificación del recurso hídrico (<http://sp.hydrobidlac.org>).

Hydro-BID tiene la capacidad de realizar simulaciones hidrológicas y gestionar los recursos hídricos de una cuenca en diferentes escenarios de cambio climático, uso de suelo, población, etc.; parametrizado con una base de datos robusta, que dentro de sus atractivos cuenta con un número importante de subcuencas delimitadas con muy buena precisión de toda la región de América Latina y el Caribe, incluyendo patrones de drenaje, longitudes de escorrentías, pendientes y las características del suelo en las cuencas, las cuales son representadas por el número adimensional CN desarrollado por el SCS, en su método de abstracciones de precipitación de tormentas (Chow et al. 1994). Este parámetro fue definido en la herramienta Hydro-BID, con base en obtención de información de cobertura terrestre del USGS y armonizada con los datos de suelo de la HWSO (SPOC HydroBID, 2019).

La herramienta, más allá de dar un resultado puntual en la obtención de la escorrentía de una cuenca en particular para la solución de un problema ingenieril, como lo hacen gran parte de los modelos hidrológicos, se orienta a la determinación del balance y producción hídrica de una región o cuenca y se pueda elaborar planes de acción y gestión del recurso hídrico ante escenarios de cambio. En consecuencia, para un país en vía de desarrollo como lo es el territorio colombiano (UNDP, 2018), la herramienta puede ayudar a fortalecer la toma de decisiones ante las incertidumbres que genera la disponibilidad del recurso hídrico en los planes de gestión ambiental y ordenamiento regional y local que se vienen desarrollando y actualizando a la fecha.

Con base en lo expuesto previamente, se optó por desarrollar el modelo Hydro-BID en un sector de la región Andina colombiana, en la cual se concentra una porción importante de la población del país (DANE, 2018), y por ende constituye un reto en el manejo y aprovechamiento del recurso hídrico para las autoridades ambientales colombianas. Es así como la cuenca hidrográfica adoptada corresponde

a la del río Coello, la cual se ubica en inmediaciones del departamento del Tolima, y por tanto da lugar a la proposición del objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo, al igual que a la localización general de la cuenca en estudio.

1.1 Objetivos

El objetivo general se centra en analizar la aplicación de la herramienta Hydro-BID al territorio colombiano y dar a conocer su potencial utilidad en la modelación hidrológica de cuencas y apoyo técnico para la toma de decisiones eficaces en estudios de gestión de recursos hídricos adaptados a futuros cambios climáticos.

Los objetivos específicos establecidos para llevar a cabo los generales son los siguientes:

- Construcción y desarrollo del modelo Hydro-BID en una cuenca típica de la región Andina colombiana.
- Calibración de los resultados obtenidos en el Modelo Hydro-BID con series históricas de flujos observados en la cuenca de estudio.
- Elaboración y evaluación de escenarios de cambio climático en el Modelo Hydro-BID considerando las perspectivas globales.

1.2 Localización y Caracterización de la cuenca del río Coello

Se seleccionó la cuenca Mayor del río Coello por ser característica de la región andina colombiana (Figura 1), presente dentro de la zonificación hidrográfica Magdalena-Cauca, subzona del Alto Magdalena con codificación SZH número 2121 (IDEAM, 2013). Tiene una extensión de 1842 km² correspondiente al 7,8% del área total del departamento del Tolima. Su nacimiento forma parte de la red hidrográfica del parque nacional de los Nevados, iniciando su recorrido como río Toche en inmediaciones del nevado del Tolima (con altitud de 5000 m.s.n.m, aproximadamente), discurriendo de occidente a oriente por la Cordillera Central colombiana, donde recibe afluentes relevantes como el río Tohecito, río Bermellon y río Combeima, hasta llegar a su confluencia con el río Magdalena a una elevación aproximada de 255 m.s.n.m. (CORTOLIMA, 2004). La longitud de la cuenca es de 125,8 km, con una pendiente media de 50,14%, pendientes máximas en la parte alta superiores al 100%, mientras que en sus partes media y final éstas son inferiores al 5% (Figura 2).

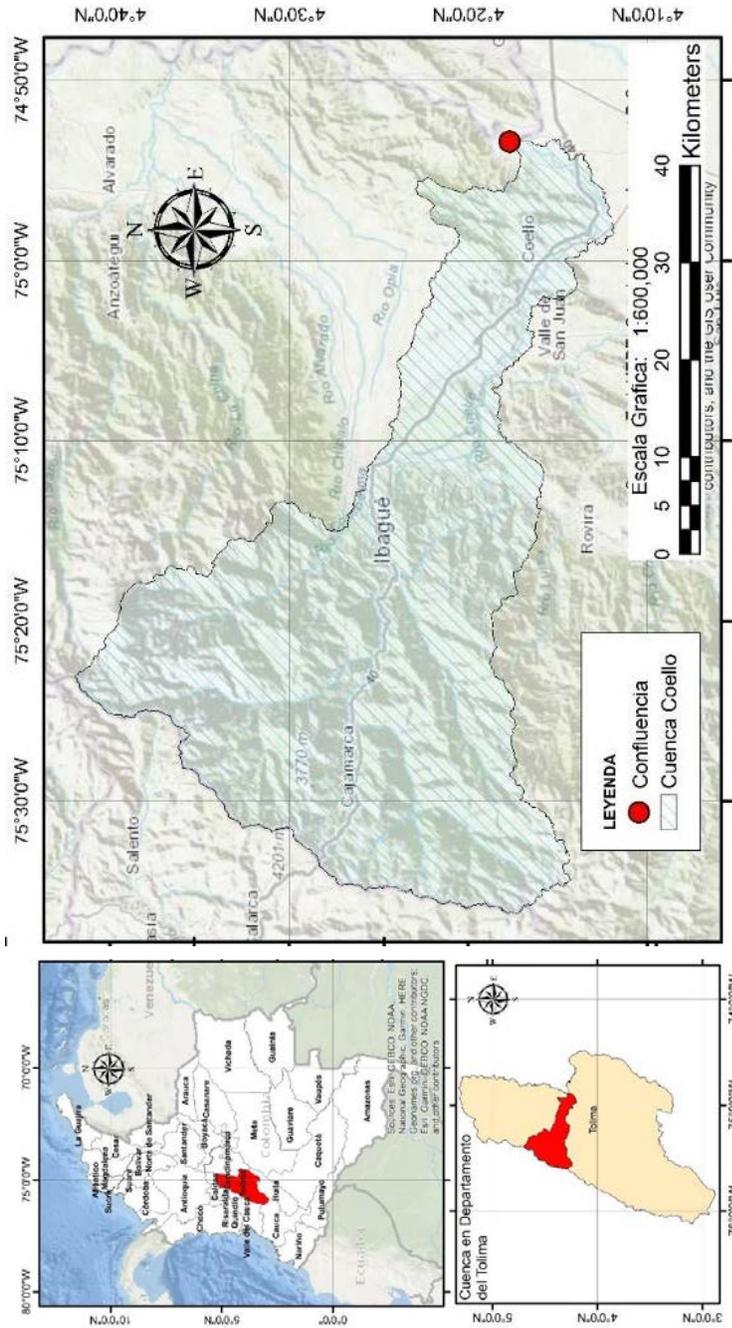
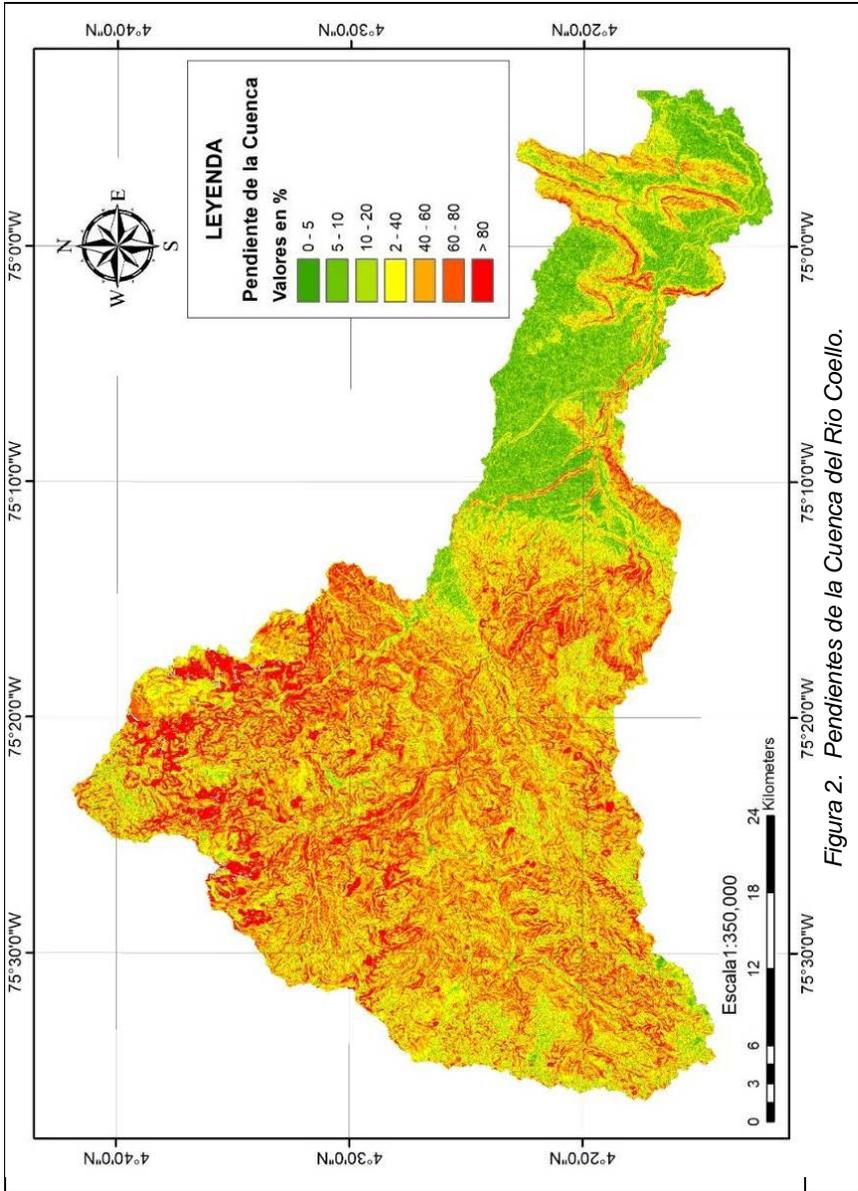


Figura 1. Localización de la Cuenca hidrográfica del río Coello.



Entre sus características más relevantes, la hoya hidrográfica y su red principal cuentan con la siguiente morfología (Tabla 1):

Tabla 1. Morfología de la Cuenca del río Coello.

PARÁMETRO	VALOR
<i>Factor de Forma</i>	0,12
<i>Índice de Compacidad</i>	2,03
<i>Densidad de Drenaje</i>	3,71
<i>Índice de Sinuosidad</i>	1,29
<i>Perímetro de Cuenca</i>	311744,00 m
<i>Pendiente del Cauce Principal</i>	1,28%

Según los parámetros anteriores, la cuenca tiene una forma alargada, por lo que se considera que tendrá tiempos de respuesta menores ante lluvias de picos de crecientes relativamente moderados. De igual forma, la densidad de drenaje es alta por lo que la cuenca tendrá una preponderancia al flujo en el cauce que al de ladera, por consiguiente, un menor tiempo al alcanzar el pico de creciente. (Ochoa, 2011).

La cuenca presenta gran diversidad de climas desde provincias nivales, zonas de páramo y clima frío, hasta zonas templadas y cálidas de tipo árido. Las temperaturas promedio de la cuenca se encuentran en 19,8°C, con temperaturas menores a 7°C en alturas superiores a los 3700 m.s.n.m. y zonas cálidas con temperaturas superiores a los 24°C en alturas inferiores a los 1000 m.s.n.m. (CORTOLIMA, 2004). Con base en el método de las Isoyetas (Breña y Jacobo, 2006), se presentan valores promedio de precipitación en la cuenca de 1510 mm/año, con máximos anuales próximos a los 2250 mm/año y mínimos cercanos a los 1000 mm/año (Figura 3).

La diversidad de cobertura terrestre en la cuenca es bastante amplia, entre las que destacan las coberturas forestales de tipo bosque natural, intervenido y secundario, así como bosque plantado del orden de 29,83% del total del área de la cuenca, ubicados principalmente en la parte media y alta de la cuenca, esta última forma parte de la zona de protección del Parque Nacional de los Nevados (Figura 4). De igual manera, se cuenta con pastos naturales y de tipo manejado, para uso de pastoreo, del orden 38,36%, ocupando principalmente la parte media y baja de la cuenca (CORTOLIMA, 2004).

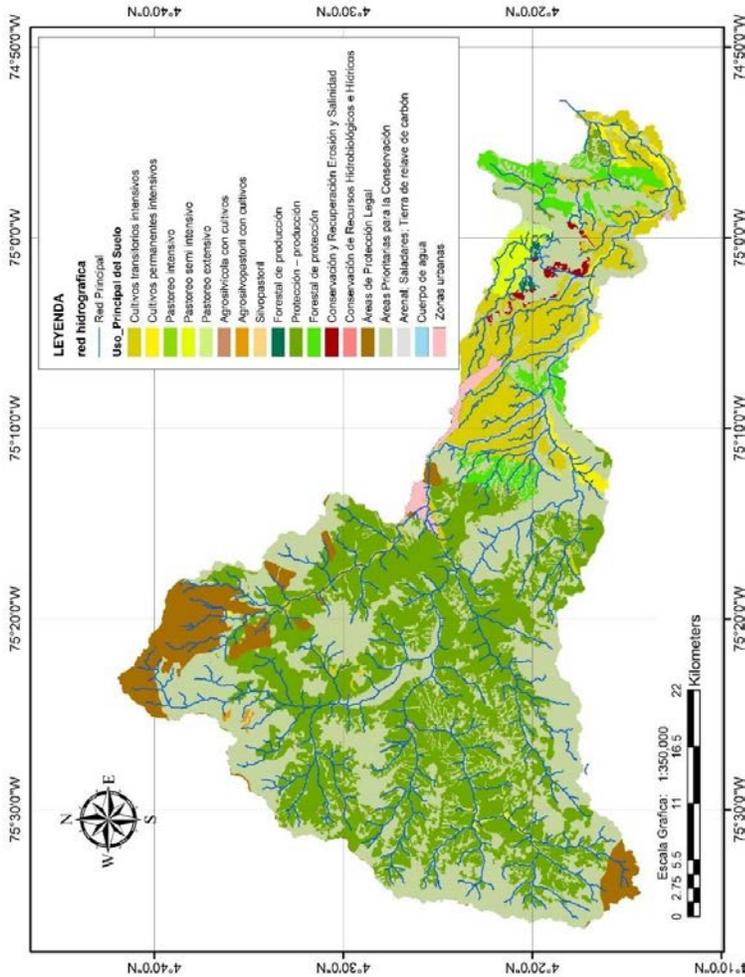


Figura 4. Cobertura de Tierra de la Cuenca del río Coello. Fuente: Adaptado por autor de mapa Oferta Ambiental Colombia Escala 1:100.000, IGAC

Otras de las coberturas relevantes en la cuenca del río Coello corresponden a la vegetación de tipo paramo y rastrojo, ocupando el 14,85% del área total de la cuenca, y también otras áreas sin uso agropecuario o forestal como, principalmente, cuerpos de agua, zonas urbanas, afloramientos rocosos, zonas de explotación, ocupando un aproximado de 4% del área de la cuenca.

De las coberturas anteriores cabe resaltar los pastos, ya que ocupan una porción importante en la cuenca, lo que puede afectar en gran medida el comportamiento de la infiltración en los suelos, desarrollando superficies mayormente impermeables, por ser pastos introducidos para pastoreos intensivos (CORTOLIMA, 2004).

Asimismo, es importante mencionar que hacen parte de la cuenca del río Coello como territorio rural los municipios de Rovira, San Luis, Espinal y Flandes, adicionales a los cascos urbanos de los municipios de Ibagué, Coello y Cajamarca con su jurisdicción rural; gran parte de estas poblaciones se abastecen y desaguan sus vertidos sobre los cauces secundarios de la cuenca del río Coello.

Por último, en la actualidad en la cuenca se localizan 15 estaciones hidroclimatológicas activas, entre estaciones pluviométricas, climatológicas y limnimétricas, lo que le es importante para garantizar la aplicación del modelo Hydro-BID y poder cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo.

2 Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos definidos, se propuso una metodología que consta de 5 etapas enfocadas en (1) una visión general del programa Hydro-BID, (2) la recopilación de información existente en la cuenca utilizada para el modelo, (3) parametrización y construcción de base de datos del modelo Hydro-BID, (4) desarrollo y calibración del modelo respecto a la información registrada en la cuenca y (5) variación de parámetros por cambio climático en la cuenca ante eventos futuros.

2.1 Etapa 1: Visión general del programa Hydro-BID Área de estudio

Considerando la presencia más recurrente y prolongada de efectos climáticos extremos sobre la región latinoamericana y del Caribe, como lo es el fenómeno

ENSO en sus dos fases, y que vienen afectando proyectos que desarrolla el BID en compañía de las diferentes naciones pertenecientes a esta región, ha surgido la necesidad de contar con una plataforma que interactúe no solo de manera individual sino a nivel regional, dando soporte al manejo y gestión del recurso hídrico en la región, para poder definir estrategias y proyectos de adaptación a los cambios climáticos que se vienen presentado en el planeta, compartiendo datos, modelaciones hidrológicas y experiencias de aplicación. Como consecuencia, el BID crea la herramienta Hydro-BID en colaboración con el RTI, aportando un sistema integrado y cuantitativo para la modelización hidrológica y gestión de recursos hídricos en la gestión de América Latina y el Caribe bajo escenarios de cambio, como el clima, uso de suelo o cambio poblacional (SPOC HydroBID, 2019).

La herramienta integra un modelo de lluvia – escorrentía y una base de datos hidrográfica denominada LAC-AHD (Analytical Hydrology Dataset for Latin America and the Caribbean), que se integra en el Sistema de Información Geográfica de libre acceso QGIS, donde se puede observar, analizar, delimitar y gestionar diferentes cuencas de América Latina y el Caribe representadas de manera geoespacial.

En la Figura 5 se representa la base de datos de la región de América del sur suministrada por el BID, con la cual se gestionó la cuenca del río Coello. Esta base de datos de América del sur cuenta con 193.000 cuencas y segmentos fluviales, con áreas promedio de 92 kilómetros cuadrados y tramos de segmentos fluviales de 11 kilómetros de manera aproximada. En cuanto al modelo de lluvia escorrentía, la herramienta utiliza el modelo de factor de carga de cauces generalizados, conocido por su sigla en inglés GWLF (Haith, et al, 1996), ligado a la metodología de tiempo de retardo en enrutamiento LAG-ROUTING, desarrollado por RTI.

Otro de los componentes importantes del modelo Hydro-BID , son los datos climatológicos de la zona en estudio, como precipitación, temperatura y caudales diarios observados en un periodo de tiempo consecutivo y sin faltantes de información, los cuales deben ser suministrados por el usuario en archivos tipo CSV, y que se integran con la base de datos definida por el BID para cada una de las cuencas parametrizadas, en el cual se encuentra información ya preestablecida de número de Curva (CN), pendientes de drenaje, tamaño de cuenca ,longitud, etc.

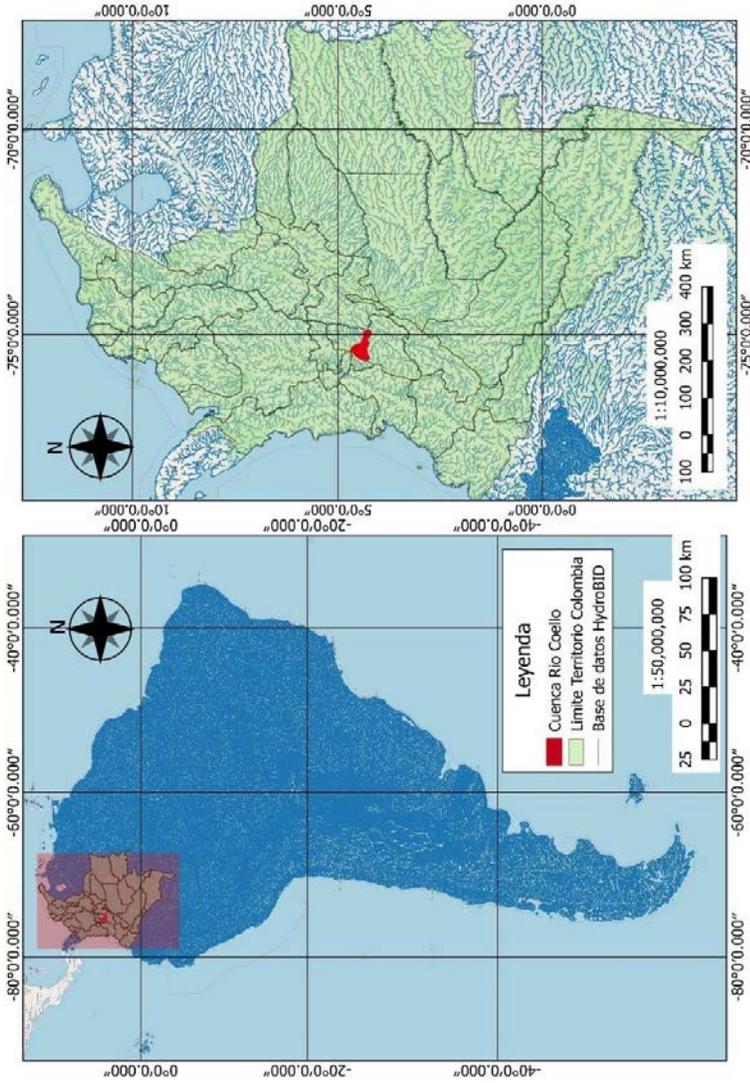


Figura 5. Visualización de la Base hidrográfica para América Latina propuesta en la base de datos LAC-AHD. Fuente: Adaptado por Autor de LAC-AHD en QGIS.

Todo lo anterior es procesado por el gestor de bases de datos SQLite, donde se puede revisar o modificar cada uno de los parámetros preestablecidos en las cuencas se pretenden estudiar.

En resumen, la herramienta Hydro-BID, para el desarrollo y análisis de recursos hídricos dispone de una base de datos geográfica integrada a una base de datos locales observados, los cuales mediante un modelo de lluvia – escorrentía ampliamente utilizado, provee al usuario una gran variedad de resultados para su respectivo análisis y gestión frente al comportamiento de las cuencas hidrográficas analizadas y su posible variabilidad frente a alteraciones climáticas.

2.2 Etapa 2: Recopilación y análisis de información existente en la cuenca

Para esta etapa y conforme a los requerimientos de la herramienta Hydro-BID, se realizó la recolección de información principal de climatología, pluviometría y de caudales sobre la cuenca en estudio, así como la obtención de mapas de usos y coberturas de suelo del territorio que cubre la cuenca con el fin de corroborar y verificar que los números de curva de cada subcuenca implícitos en la base de datos del programa estén acordes con la realidad actual del uso y tipo de suelo.

2.2.1 Información Hidroclimatológica

Para la consecución de la información hidroclimatológica, se realizó la solicitud al IDEAM de las estaciones activas y disponibles en la cuenca, requiriendo principalmente datos de temperatura media diaria, precipitación total diaria y caudales medios diarios, con los cuales se alimentó el modelo para su parametrización y posterior calibración. En la Tabla 2 se presentan las estaciones seleccionadas para el estudio de la cuenca. De igual manera, en la Figura 6 se presenta la ubicación de las estaciones en la cuenca del río Coello.

De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 2, se obtuvo información de caudales diarios de 6 estaciones limnimétricas y liminigráficas, y datos de precipitación diaria de 9 estaciones de las cuales 7 son pluviométricas y 2 climatológicas ordinarias, de donde también se extrajo la información de temperatura media para la cuenca.

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello con Hydro-BID / 17

Teniendo en cuenta que para el desarrollo de la herramienta se requería contar con una serie histórica igual para todas las estaciones, fue necesario revisar y analizar cada una de las estaciones existentes con el fin de contar con un periodo de tiempo constante y datos completos. De lo anterior, se adoptó una serie entre el 1 de enero de 1995 y 31 de diciembre de 2015, correspondiente a 20 años de datos diarios.

Tabla 2. Estaciones Hidroclimatológicas seleccionadas.

Código IDEAM	Nombre	Categoría	Fecha instalación	Altitud	Latitud	Longitud	Corriente
21215100	Cajamarca	Climática Ordinaria	01/09/1965	1920	4,44	-75,50	Saldana
21217250	Bocatoma	Limnigráfica	15/06/1983	1509	4,46	-75,26	Quebrada Cay
21217220	San Vicente Del Combeima	Limnimétrica	15/06/1983	1750	4,54	-75,31	Combeima
21210020	Juntas Las	Pluviográfica	15/08/1971	1765	4,56	-75,32	Canal Intercept
21210130	Delicias Las	Pluviométrica	15/09/1983	295	4,38	-75,51	Cocora
21210140	Plan EL	Pluviométrica	15/09/1983	388	4,38	-75,50	Cocora
21217120	Puente Carretera	Limnigráfica	15/02/1972	1156	4,40	-75,29	Coello
21210150	Cascada La	Pluviométrica	15/09/1983	3280	4,28	-75,54	Guaroco
21217200	Carmen EL	Limnigráfica	15/07/1979	821	4,30	-75,21	Coello
21217070	Payande Palogrande	Limnigráfica	15/08/1959	562	4,30	-75,09	Coello
21210170	Hacienda Buenos Aires	Pluviométrica	15/11/1986	2212	4,33	-75,40	Meta
21210200	Puente Luisa	Limnimétrica	15/03/1985	2205	4,34	-75,52	Anaime
21215130	Cucuana Hacienda	Climática Ordinaria	15/11/1986	2229	4,34	-75,52	Anaime
21220050	Aceituno EL	Pluviométrica	15/01/1969	680	4,35	-75,05	Upia

Las estaciones seleccionadas cuentan con un número de datos mayores, iniciando sus series en las décadas de los años 60, 70 y 80. Sin embargo, debido a que algunas estaciones presentan un gran número de datos de años faltantes e incompletos, particularmente al inicio de su operación, se optó por tomar las dos últimas décadas registradas para la realización de la modelación.

De igual manera, en las dos décadas seleccionadas, en las estaciones se evidenciaron algunos datos faltantes, por lo cual fue necesaria la complementación de las series adoptando la metodología de media aritmética para las estaciones con porcentajes inferiores al 10% de datos faltantes, y realizando correlaciones entre estaciones con un número mayor de datos faltantes y estaciones con series mayormente completas, debido a que la herramienta Hydro-BID no permite series de datos incompletas para la realización de las modelaciones.

Considerando los regímenes estacionales de precipitación, temperatura y caudal que se presentan en las estaciones de la cuenca del río Coello, se procedió, tanto para la complementación de datos con la media aritmética como para las ecuaciones de correlación de estaciones, realizarlas de manera mensual con toda la serie histórica de los 20 años de análisis. El método de correlación o regresión lineal consiste en establecer una regresión lineal, utilizando una estación de referencia, mediante una ecuación lineal expresada como:

$$y = a + bx$$

Dónde:

y: Precipitación o Caudal Estimado.

x: Precipitación o caudal de estación base

a y *b*: Constantes de regresión

La correlación entre las estaciones se considera aceptable si los valores del coeficiente de correlación se encuentran entre $-0,8 \leq R \leq 0,80$ (Pizarro et al., 1993).

Se consideró también relevante verificar la confiabilidad y homogeneidad de los registros seleccionados entre el año 1995 y el año 2015, por lo que se analizaron diferentes estaciones con el método de Doble Masas (Montealegre, 1990). Este método consiste en analizar gráficamente la serie de datos de una estación con otra cercana, construyendo un diagrama cartesiano; si los puntos tienen una tendencia lineal, los datos son válidos y no requiere correcciones, por el contrario, cuando se presentan cambios de pendientes fuertes, es necesario realizar el ajuste, proporcionando la constante K que, multiplicada por los valores inconsistentes de las estaciones analizadas, permite el ajuste y corrección de estos.

Es importante precisar que el criterio para afirmar que el modelo lineal se considera adecuado y aceptable, es aquel donde el valor del coeficiente de determinación lineal (R^2) se aproxima a 1, que indica un ajuste lineal perfecto.

Una vez completada y revisada la homogeneidad de las series históricas de cada una de las estaciones tanto de precipitación, temperatura y caudales, se procedió a generar los archivos tipo CSV para cargar en la base de datos de Hydro-BID y proceder con la construcción y desarrollo del modelo.

2.2.2 Información de uso del suelo

Como parte de la base de datos que proporciona Hydro-BID, se cuenta con una caracterización de la cobertura del suelo de la región, con los que se definieron los números de curva para cada una de las subcuencas, basados en los tipos de suelo y grupo hidrológico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, su sigla en inglés) ; complementada con información de cobertura de suelo obtenida del USGS y los datos del suelo para la clasificación hidrológica adaptados de la base de datos mundial de suelos (HWSD, su sigla en inglés), (SPOC HydroBID, 2019)

Lo anterior, permite tener una aproximación bastante acertada del parámetro de número de curva para las respectivas modelaciones de caudales; sin embargo, se realizó una revisión general de los números de curva propuestos por el programa Hydro-BID con base en los mapas de uso de cobertura de tierras definidos por el IGAC (Figura 4), con el fin de contar con una respuesta más acertada de la modelación al momento de la calibración de la cuenca en estudio.

2.3 Etapa 3: Construcción y Parametrización del modelo Hydro-BID

2.3.1 Construcción del modelo

Hydro-BID requiere de la introducción de datos climáticos en formato CVS, ordenados de manera particular en subcarpetas dentro de la carpeta principal de la herramienta, para lo cual se organizaron las estaciones con datos pluviométricos, de temperatura y caudales (Figura 7), los cuales fueron identificados o nombrados con los códigos de la estación definidos por el IDEAM y presentados en la Tabla 2. Cada uno de estos archivos contiene el registro diario de cada parámetro entre el 1 de

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello con Hydro-BID / 21

enero de 1995 y 31 de diciembre de 2015. Un ejemplo del contenido de los archivos se presenta en la Figura 8 y Figura 9. Cada archivo contiene un total de 7670 registros de parámetros diarios, como la precipitación diaria en centímetros, la temperatura diaria en grados centígrados (°C) y los caudales diarios registrados en metros cúbicos por segundo (m³/s).

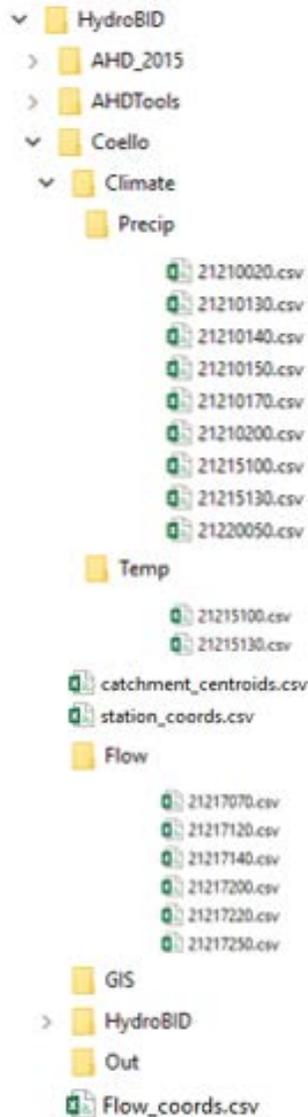


Figura 7. Construcción de Base de datos para Hydro-BID.

date,precip(cm)
1/01/1995,0.00
2/01/1995,0.00
3/01/1995,0.00
4/01/1995,0.12
5/01/1995,0.00
6/01/1995,0.00
7/01/1995,0.00
8/01/1995,0.00
9/01/1995,1.25
10/01/1995,0.50
11/01/1995,0.00
12/01/1995,0.00

Figura 8. Organización de los registros climatológicos para la base de datos.

date,flow(m3/s)
1/01/1995,17.3
2/01/1995,17.3
3/01/1995,17.3
4/01/1995,16.83
5/01/1995,17
6/01/1995,16.47
7/01/1995,16.13
8/01/1995,16.13
9/01/1995,16.13
10/01/1995,16.13
11/01/1995,16.13
12/01/1995,15.77

Figura 9. Organización de los registros de caudales para la base de datos.

Adicional a los archivos hidroclimatológicos, se crearon otros con las coordenadas de localización de las estaciones utilizadas en el estudio y de los centroides de cada una de las subcuencas que conforman la cuenca total del río Coello, realizado con ayuda del software QGIS y la base de datos LAC-AHD, como se presenta en la Figura 10.

La base geográfica LAC-AHD cuenta con una división de la cuenca del río Coello de 17 subcuencas, cada una codificada con una numeración particular en un campo denominado COMID, el cual servirá al momento de la modelación para calcular o definir los caudales del río en una cuenca específica.

Posteriormente, se creó la carpeta OUT, donde se almacenarán todos los resultados o modelaciones realizadas en la herramienta.

Una vez definidas las carpetas y bases de datos requeridas por la herramienta, es necesario realizar la interpolación de los datos construidos y organizados de precipitación y temperatura a nivel de subcuencas, particularmente a las observadas en la Figura 10, para lo cual se utilizó la herramienta incluida en Hydro-BID denominada Climate Data Interpolating Tool, y cuya interfaz se presenta en la Figura 11.

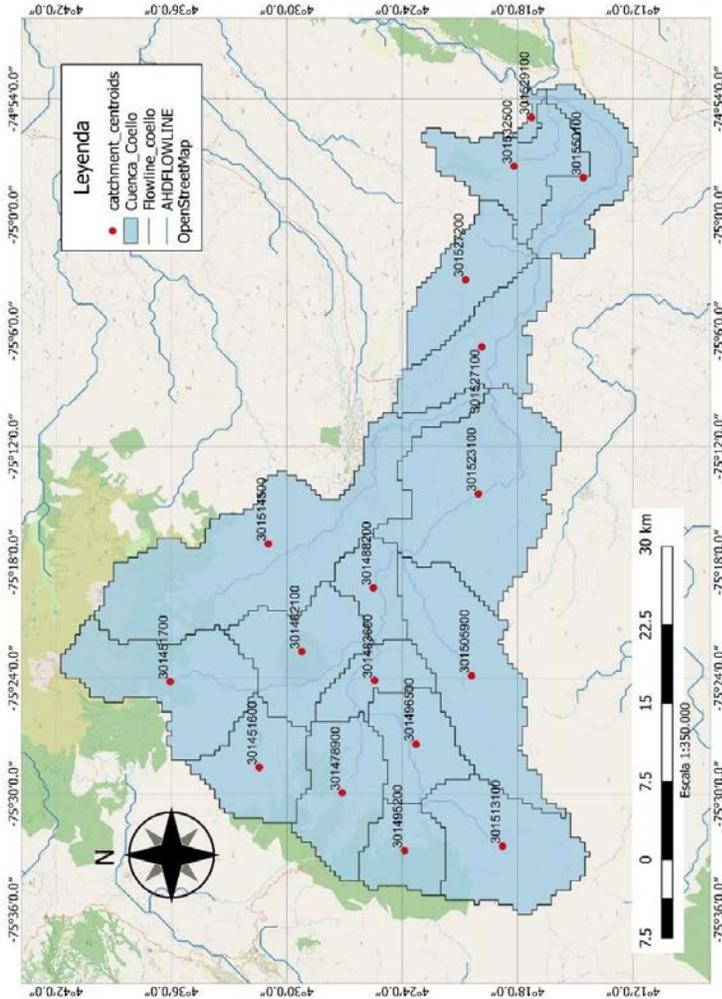


Figura 10. División e identificación de subcuencas del río Coello con la base de datos LAC-AHD.

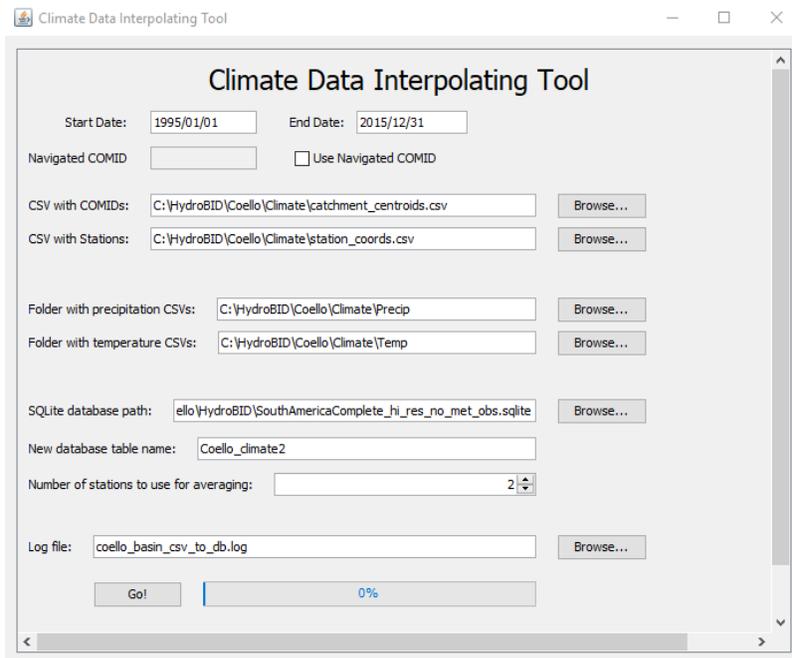


Figura 11. Interfaz Climate Data Interpolating Tool de Hydro-BID.

Este Algoritmo desarrolla la interpolación mediante la vinculación de los archivos de centroides de cuencas, ubicación de las estaciones y los demás datos climatológicos incluidos en la base de datos, con el fin de que cada subcuenca cuente con datos de temperatura y precipitación particulares, para el posterior cálculo de caudales.

Paso seguido, se definen datos básicos requeridos por la herramienta para su funcionamiento, los cuales se guardarán en un archivo denominado "settings.txt", e él se incluyen información general en la que se incorpora el nombre que llevará la modelación, el número, nombre o código identificando la cuenca a analizar, fechas de inicio y fin de la modelación -que deben ser concordantes con las fechas de los registros históricos almacenados en la base de datos-, ubicación de la base de datos, y el nombre o identificador de la carpeta de salida de resultados. En la Figura 12 se

presenta la interfaz inicial de la herramienta Hydro-BID, donde se realizó el ingreso de los datos iniciales para la ejecución del modelo.

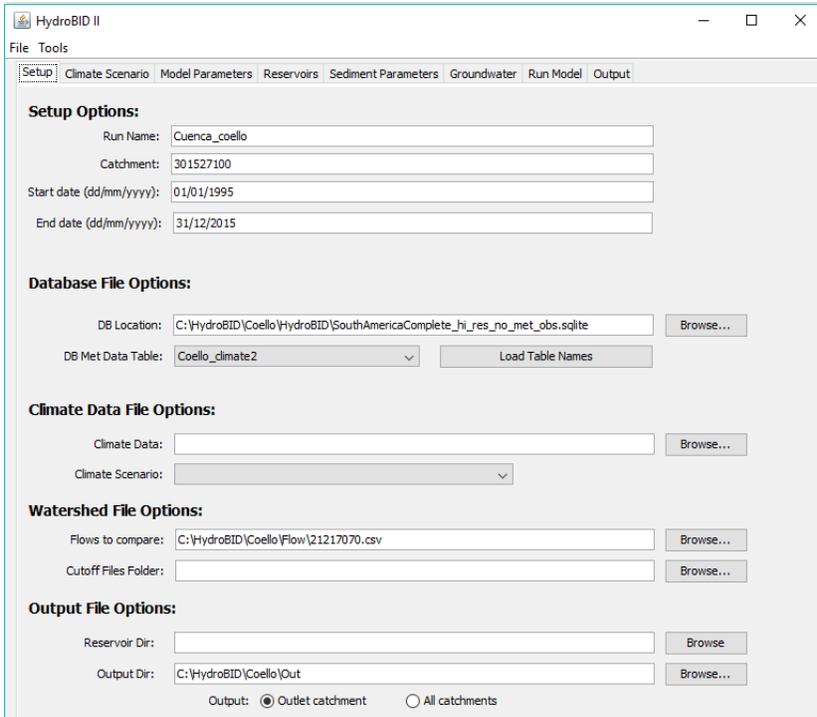


Figura 12. Interfaz de inicio “Setup” en Hydro-BID.

2.3.2 Parametrización del modelo

El modelo Hydro-BID requiere para su correcto desarrollo la definición de ciertos parámetros hidrológicos e hidráulicos, como la velocidad de la corriente, la latitud, el inicio y final de la temporada de cultivos, así como los parámetros referentes a las condiciones de suelo, como el número de curva (CN), contenido de agua, permeabilidad, entre otros. De los parámetros anteriores, algunos son referenciados por defecto en el modelo y otros deben ser incluidos de acuerdo con el conocimiento particular de la zona en estudio. En la Figura 13 se presenta la interfaz para la parametrización del modelo Hydro-BID.

De esos parámetros, la velocidad y los relativos a la capacidad hidrológica del suelo que se expondrán en el siguiente numeral, son asumidos por defecto en la herramienta y posteriormente se utilizaran para la calibración del modelo. Para el caso de los días de inicio y fin de cultivos en la cuenca, se propone un número de días cercano a la totalidad de días del año, ya que en la cuenca de estudio se presentan cultivos permanentes, y que por las condiciones climáticas de la misma se pueden mantener prácticamente todos los días del año.

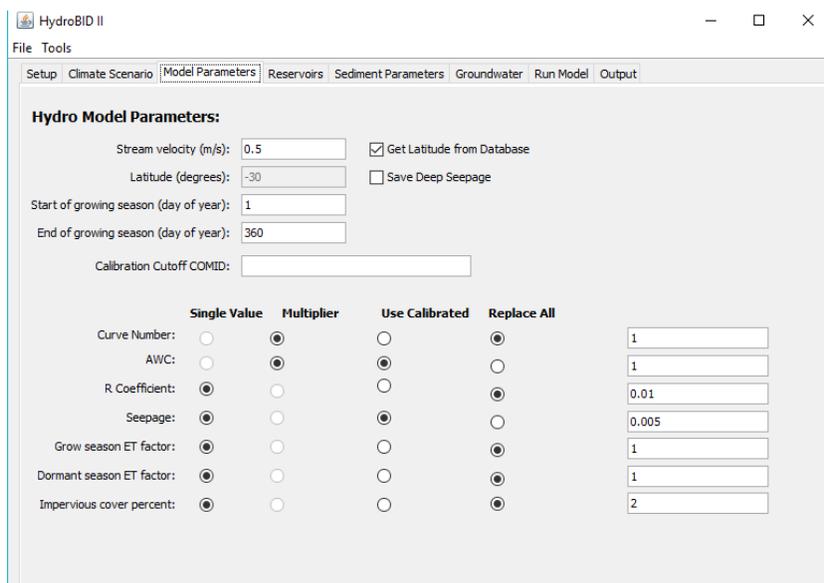


Figura 13. Interfaz de parametrización Hydro-BID.

2.4 Etapa 4: Desarrollo y Calibración del modelo Hydro-BID

Una vez realizadas las anteriores etapas, la herramienta ya se encuentra lista para el desarrollo del modelo; sin embargo, para la posterior calibración de la modelación es necesario considerar los valores definidos por defecto y que se presentan en la Figura 13, particularmente los parámetros que se mencionan en la Tabla 3.

Estos parámetros pueden ser utilizados o propuestos como un valor simple o como un factor multiplicador del mismo, que por defecto trae la herramienta ya

predeterminado. Para la calibración del modelo de la cuenca del río Coello, se utilizó un factor multiplicador para el CN y el AWC; para los parámetros restantes se utilizó un valor simple partiendo del valor por defecto proporcionado por el modelo.

Tabla 3. Parámetros para la calibración del Modelo.

Parámetro	Definición	Valor por Defecto
CN	Numero de curva	1
AWC	Representa el contenido de agua disponible	1
R Coefficient	Coefficiente de recesión	0,01
Seepage	Permeabilidad, representa el coeficiente de permeabilidad para determinar la infiltración profunda desde la capa saturada	0,005
Grow season ET Factor	Factor de evapotranspiración de la estación de cultivo	1
Dormant season ET Factor	Factor de evapotranspiración de la estación de latencia (sin cultivo)	1
Impervious cover percent	Porcentaje de cobertura impermeable	1

Previo a la modelización, se compararon los números de curva de la base de datos con los obtenidos con las coberturas de la tierra propuestas en la Figura 4, los cuales son bastante próximos a los definidos previamente en la base de datos de Hydro-BID, por lo que se decidió mantener los valores por defecto y realizar las calibraciones necesarias para el ajuste del modelo.

2.4.1 Calibración modelo Hydro-BID

Para la calibración de la herramienta, se procedió a realizar la modelación de la cuenca número 301527100, correspondiente a la estación Payande, siendo ésta la estación de caudales más próxima al punto final de salida de la cuenca total del río Coello, como se aprecia en la Figura 10. Como resultados de la primera modelación se obtuvieron los parámetros estadísticos iniciales de error y correlación, entre la información calculada por la herramienta y la tomada de la serie de datos históricos. Estos parámetros, al igual que las gráficas que arroja la herramienta de duración de caudales y caudales multianuales, juegan un papel importante para la calibración del modelo, pues el objetivo es lograr la mayor similitud entre valores observados y calculados, así como conseguir unos parámetros estadísticos ajustados a ciertos

rangos o criterios con los que se pueda determinar que un modelo se encuentra adecuadamente calibrado, dichos rangos se relacionan en la Tabla 4.

Tabla 4. Rangos de Parámetros estadísticos para calibración del Modelo.
Fuente: Adaptado de SPOC HydroBID (2019)

Parámetro Estadístico	Valor adecuado en un modelo calibrado
Volumen de Error (Overall volume error)	+/- (20-30 ó 30-40)
Numero de Correlación (Correlation, r(-))	Lo más cerca de 1 posible
Correlación del Modelo (Modified Correlation, Rmod)	Lo más cerca de 1 posible
Nash-Sutcliffe Efficiency, R ²	Cercano a 0,40 ó 0,6

Después de realizar diferentes ejecuciones de la herramienta, efectuando variaciones de los parámetros hidráulicos como el AWC, el Coeficiente R y el Seepage, se logró obtener mínimos volúmenes de error y aproximación de los coeficientes de correlación lo más cercanos a 1, siempre verificando que la curva de duración de caudales, al igual que la gráfica de registros multianuales, tuvieran la mejor correlación, especialmente en los caudales máximos y mínimos.

De manera particular, para la cuenca del río Coello, el modelo inicial arrojó una deficiencia en los caudales calculados, siendo estos marcadamente menores a los observados en la estación Payande, por lo cual se procedió a modificar el coeficiente de permeabilidad Seepage, disminuyéndolo para reducir la infiltración y aumentar la escorrentía en la cuenca. Posteriormente, se realizó un aumento del coeficiente de recesión para aumentar la repetitividad de los caudales altos y reducir los caudales mínimos.

Finalmente, se realizaron varias iteraciones modificando el parámetro de contenido de agua disponible en el suelo AWC, con el fin de ajustar lo más posible la curva de caudales calculados con los observados, y mejorar los parámetros estadísticos. Una vez realizado el proceso anterior, se consideró que el modelo estaba adecuadamente calibrado, y se procedió a obtener los resultados de volúmenes de flujo y balance hídrico de la cuenca, así como las demás modelaciones con la variación de cambio climático.

2.5 Etapa 5: Variación de Parámetros por Cambio climático

Para el proceso de variación de cambio climático, se dispone de un apartado dentro de la herramienta denominado "Climate Scenario", en esta aplicación se pueden realizar variaciones totales o mensuales de precipitación y temperatura tanto en valores reales como en factores multiplicadores. En la Figura 14 se presenta la interfaz de la herramienta para la modificación de los parámetros climáticos.

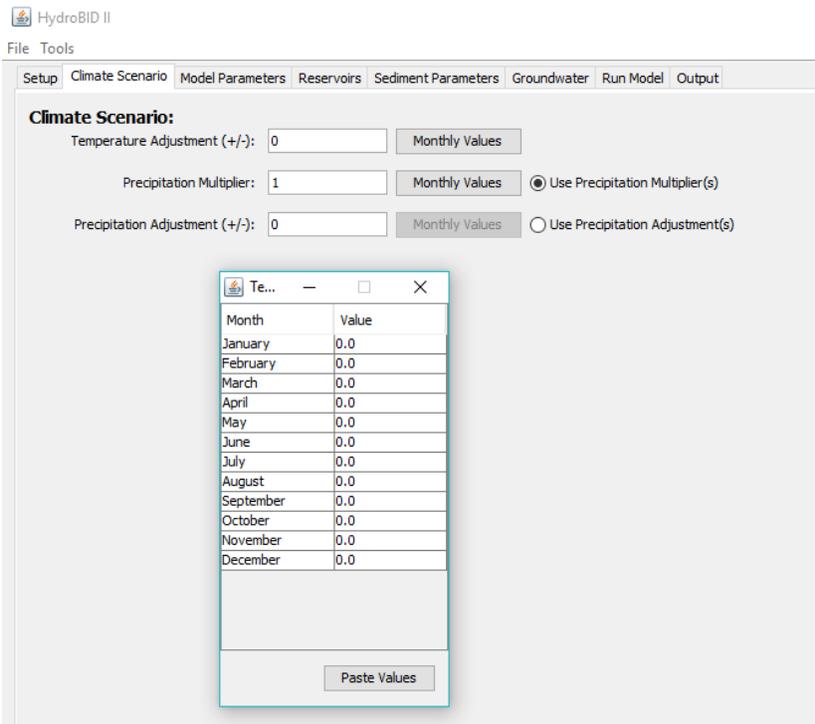


Figura 14. Interfaz de escenarios climáticos en HYDRO_BID.

Con esta herramienta se procedió a realizar una modelación de variación de temperatura y precipitación con el fin de considerar los efectos sobre los caudales de la cuenca en el futuro inmediato; verificando los análisis y escenarios evaluados por el IPCC, donde se tienen proyecciones de aumento de temperatura media global en la superficie terrestre para el periodo entre el 2016 y 2035 en un rango de 0,3°C a

0,7°C , y para el periodo entre los años 2081 y 2100, incrementos cercanos a los 2°C (IPCC, 2014). Para el presente trabajo se optó por realizar un incremento general de la temperatura en la cuenca de 2°C para los próximos 30 años. De igual manera, se tiene previsto que, para zonas de latitud media y regiones tropicales, la precipitación presente variaciones alrededor de 10 al 20% (Figura 15).

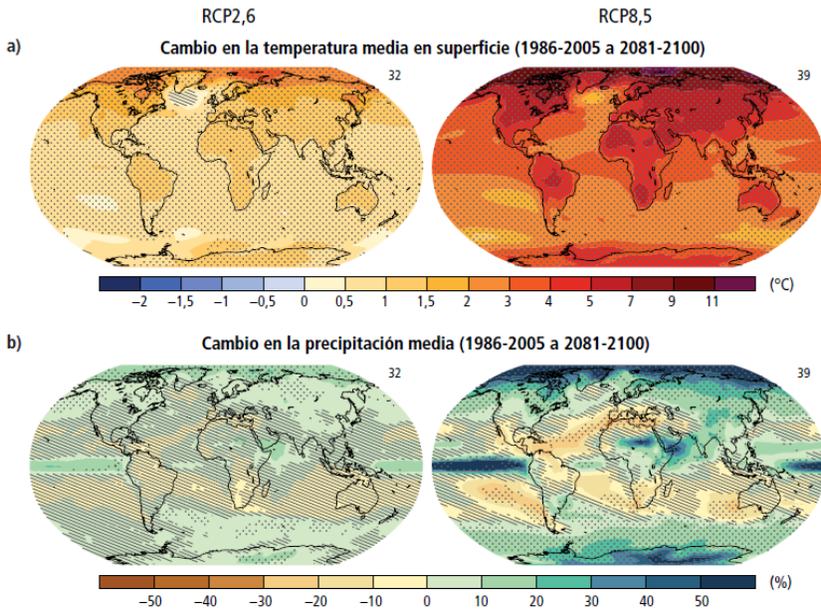


Figura 15. Proyecciones medias de cambio de temperatura y precipitación Global. Fuente: Adaptado de IPCC (2014), Figura 2.2

Teniendo en cuenta los posibles efectos del ENSO en la región ecuatorial y directamente sobre la cuenca del río Coello, se adoptaron como escenarios de estudio en el modelo Hydro-BID, un incremento del 20% de la precipitación media actual sumado a la variación de temperatura anteriormente descrita, así como también un descenso en la precipitación del 20% manteniendo el incremento de la temperatura media, para los próximos 30 años.

3 Resultados

Conforme a la metodología propuesta, a continuación, se relacionan los resultados obtenidos en las diferentes etapas, iniciando con la complementación y verificación de homogeneidad de los datos históricos recolectados de las diferentes estaciones, terminando con las diferentes modelaciones para cambio climático en la cuenca.

3.1 Tratamiento de datos hidrológicos

Organizada la información hidroclimatológica de las estaciones seleccionadas en el periodo indicado, entre el 1 de enero de 1995 y el 31 de diciembre de 2015, se verificó la cantidad de datos faltantes, de los cuales se obtuvo como resultado que, de las 9 estaciones de precipitación 5 contaban con datos faltantes menores al 10% e inclusive algunas de estas con datos faltantes menores al 5%, por lo que se complementaron con el promedio aritmético mensual de cada estación con el fin de no afectar la estacionalidad climática de la zona. Las 4 estaciones restantes, se complementaron definiendo la ecuación de correlación principalmente con la estación Cucuana y las Delicias que presentaron la menor cantidad de datos faltantes y en comparación con las demás estaciones tenían una mejor correlación con valores de R^2 por encima del 0,3.

De la misma manera, para las 6 estaciones de caudales presentes en la cuenca, se realizó la complementación aritmética de 3 de ellas con porcentajes inferiores al 10% en datos faltantes, y las otras 3 estaciones se correlacionaron con la estación El Carmen que mostró el mejor ajuste con valores de R^2 por encima del 0,50.

En las Figura 16 y Figura 17, se presentan las gráficas de correlación típicas para la serie del mes de octubre, tanto para precipitación como para caudales de la cuenca estudiada.

Una vez complementados los datos de cada estación, se aplicó la metodología de Doble Masas propuesta, graficando la serie de datos diarios acumulados de precipitación y caudales de algunas de las estaciones de la cuenca (Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 y Figura 23).

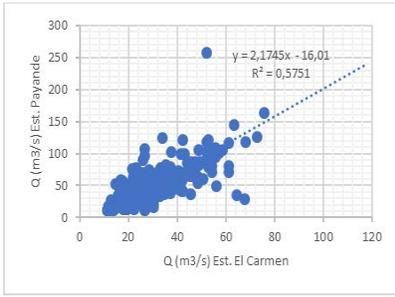


Figura 16. Correlación Estación de Caudales Payande – Estación de Caudales El Carmen.

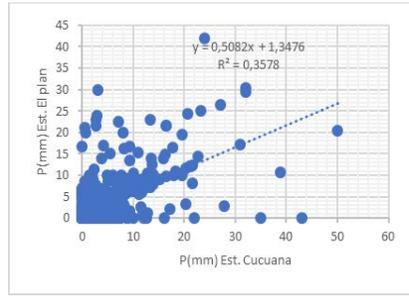


Figura 17. Correlación Estación Pluviométrica El Plan – Estación Pluviométrica Cucuana.

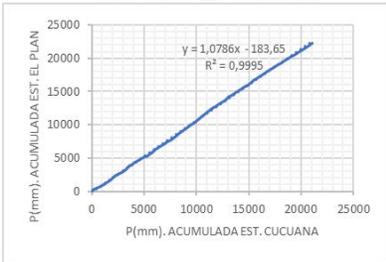


Figura 18. Grafica de Doble Masas para la Estación El Plan - Estación Cucuana.

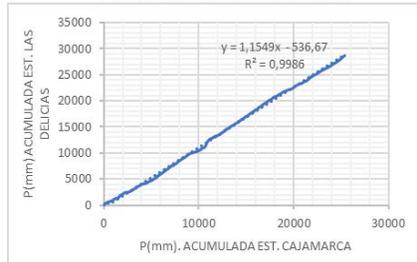


Figura 19. Grafica de Doble Masas para la Estación Las Delicias - Estación Cajamarca.

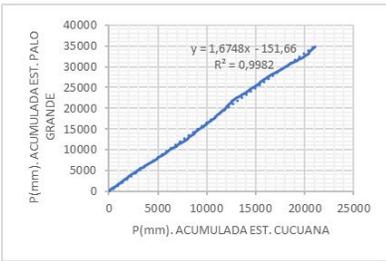


Figura 20. Grafica de Doble Masas para la Estación. Palgrande - Estación Cucuana.

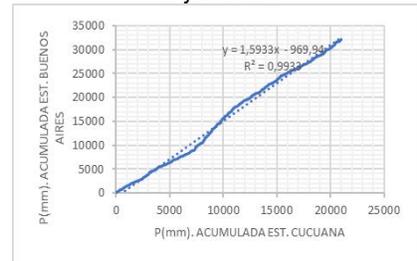


Figura 21. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Cucuana.

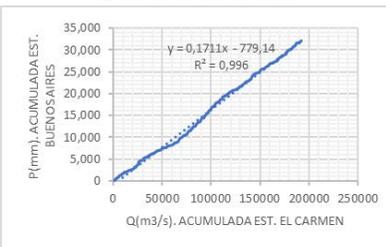


Figura 22. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación El Carmen.

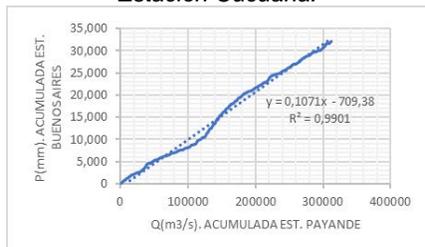


Figura 23. Grafica de Doble Masas para la Estación Buenos Aires - Estación Payande.

De acuerdo con los resultados de la metodología aplicada, se puede evidenciar que las series históricas de las estaciones de la cuenca son homogéneas y confiables para su utilización en la modelación con Hydro-BID.

En el caso de los datos de temperatura media diaria obtenidos, algunos estaban incompletos, los cuales fueron igualmente complementados con la media aritmética de la serie de cada mes considerando que la variación media mensual e incluso anual en cada estación es mínima, ya que, como se sabe el territorio colombiano está influenciado por los climas ecuatoriales, particularmente la región Andina colombiana tiene la presencia de los llamados Pisos Térmicos, donde a menor altura sobre el nivel de mar la temperatura del aire aumenta y a medida que la altitud aumenta la temperatura del aire disminuye (IDEAM, 2017). Lo anterior hace que las temperaturas medidas en las estaciones sean prácticamente constantes como se presenta en la Figura 24 de la serie histórica de la estación Cucuana.

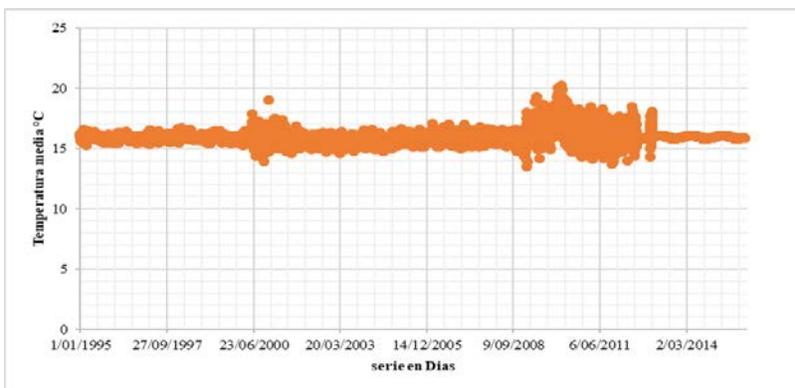


Figura 24. Serie histórica de temperatura media para la estación Cucuana.

3.2 Desarrollo y Calibración del Modelo Hydro-BID

Surtidas las etapas de complementación hidrológica, construcción de archivos y parametrización de datos requeridos por la herramienta, se realizó la primera ejecución del modelo hasta la estación de caudales Payande, donde se obtuvieron los parámetros estadísticos de la Tabla 5 en respuesta a la simulación inicial de caudales de la herramienta con respecto a los observados o registrados en la estación entre los años 1995 y 2015.

Tabla 5. Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial en HYDRO-BID.

Parámetro Estadístico	Valor obtenido
Overall volume error	-44,85
Correlation, r(-)	0,35
Modified Correlation, Rmod	0,11
Nash-Sutcliffe Efficiency, R ²	-0,13

Como se mencionó en la metodología, es esencial contar con la respuesta grafica de la herramienta para validar la calibración mediante la comparación de las gráficas de caudales modelados respecto a los observados y su respectiva curva de duración. A continuación, en las Figura 25 y Figura 26 se expone lo mencionado.

El objetivo de la calibración, además de contar con parámetros estadísticos aceptables dentro de los rangos propuesto sin pretender llevar el error a 0 o tener un perfecto empate entre las curvas, es tener una similitud coherente y responsable entre los caudales observados y los caudales modelados, con el fin de poder realizar modelaciones en otros puntos de la cuenca y realizar evaluaciones de cambios climáticos en la misma con una mayor confiabilidad.

Conforme a lo anterior, se procedió a realizar los respectivos ajustes y tanteos a los parámetros hidráulicos propuestos en la Tabla 3, con el fin de contar con un mejor ajuste de las curvas de caudales y parámetros estadísticos en los rangos establecidos. Después de múltiples iteraciones, se observó que los parámetros más relevantes o influyentes sobre la calibración del modelo, fueron el coeficiente de recesión (RC), el contenido de agua disponible (AWC) y el coeficiente de permeabilidad.

Con los cuales se logró mejorar principalmente las condiciones de escorrentía de los caudales modelados, logrando un mínimo en el parámetro estadístico de volumen de error, inclusive por debajo del rango mínimo recomendado en la Tabla 4, considerando este último como el decisivo para la calibración, ya que, de las

diferentes iteraciones, los parámetros adicionales como los números de correlación y correlación modificado, no superaban 0,4 y el 0,2 respectivamente.

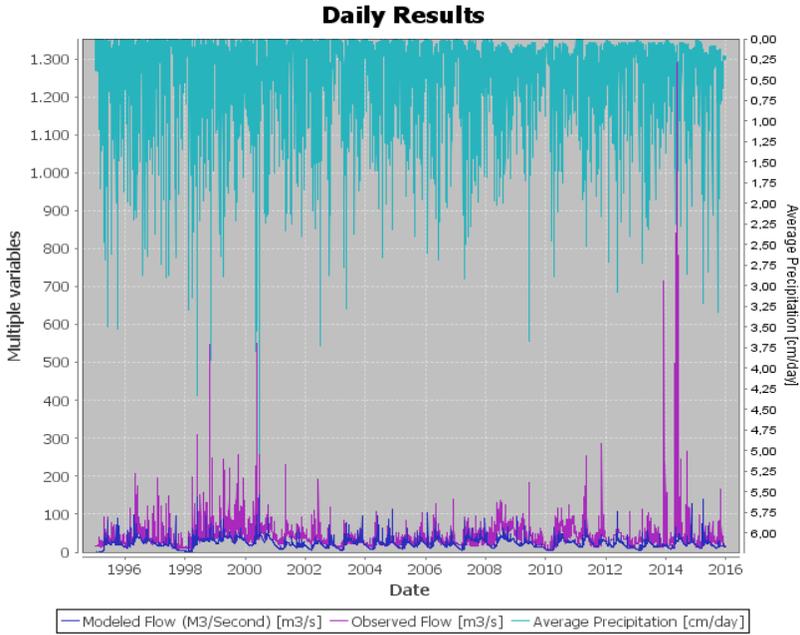


Figura 25. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados.

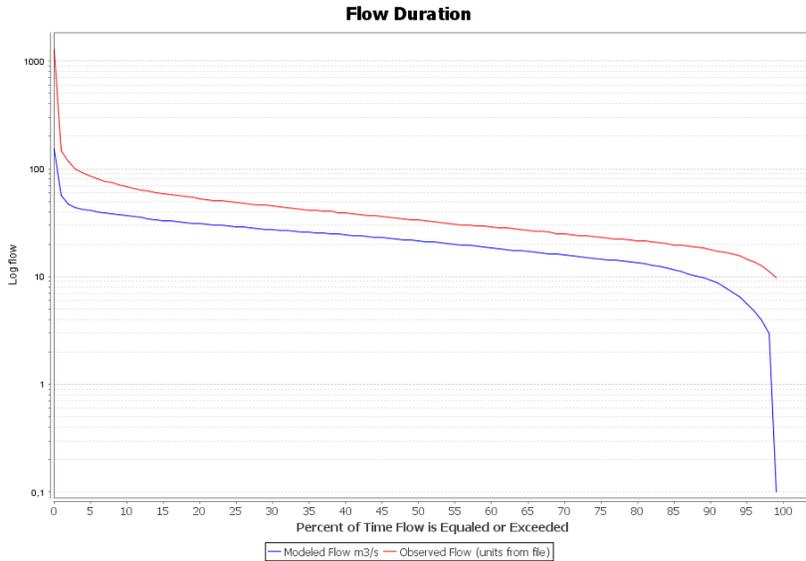


Figura 26. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados.

Se realizaron distintos ensayos que permitieran la mejor calibración del modelo y garantizar la mejor calidad de las simulaciones escenario de cambio climático. Entre esas diferentes modelaciones para calibración, se realizó la variación del CN y de los valores de evapotranspiración y porcentajes de áreas impermeables, con el fin de obtener mayores niveles de escorrentía, sin llegar a valores notables como sí era el caso cuando se realizaron variaciones del coeficiente de permeabilidad, por lo que decidió mantener los valores por defectos establecidos por la herramienta.

A continuación, se presenta en la Tabla 6 los resultados de los parámetros hidráulicos ajustados y en la Tabla 7 los parámetros estadísticos obtenidos en la calibración.

Tabla 6. Parámetros hidráulicos definidos en calibración del Modelo.

Parámetro	Valor propuesto
CN	1
AWC	0,08
R Coefficient	0,029
Seepage	0,0005
Grow season ET Factor	1
Dormant season ET Factor	1
Impervious cover percent	1

Tabla 7. Parámetros Estadísticos de la modelación Calibrada en HYDRO-BID.

Parámetro Estadístico	Valor obtenido
Overall volume error	-4,48
Correlation, r(-)	0,4
Modified Correlation, Rmod	0,21
Nash-Sutcliffe Efficiency, R ²	-0,14

En la Figura 27 se presenta la correlación de los datos de caudal observados con los de caudal modelados. En la Figura 28 y Figura 29 se observa la curva obtenida de duración de caudales ya calibrados, así como el histórico de caudales modelados y observados.

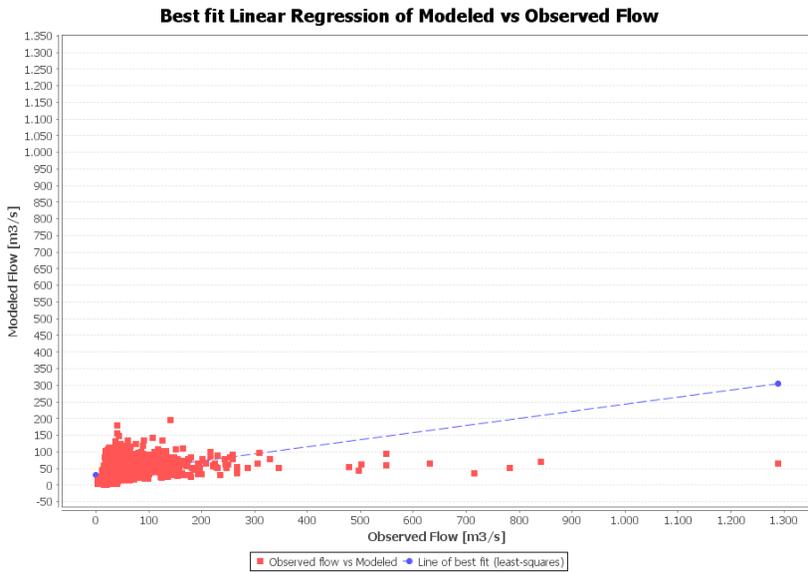


Figura 27. Correlación de Caudales Modelados Vs Observados en modo Calibrado del modelo.

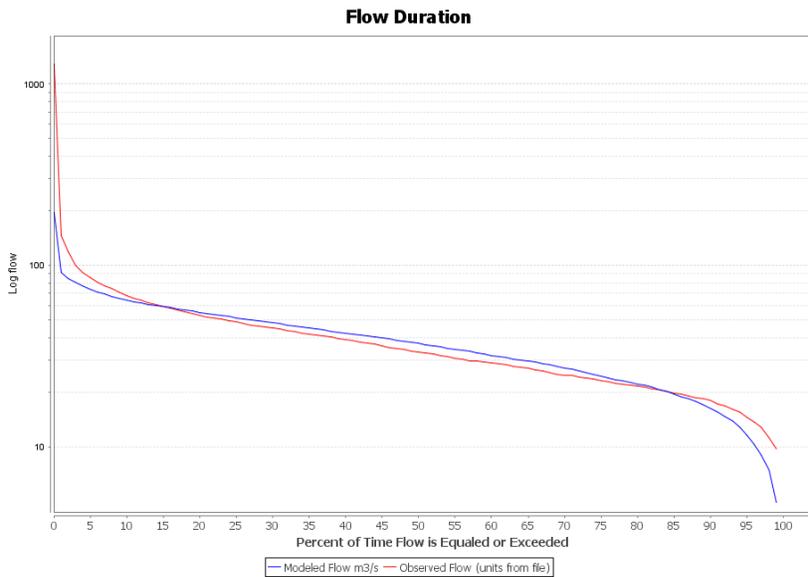


Figura 28. Curva de duración de caudales Modelados Vs Observados en modo Calibrado del modelo.

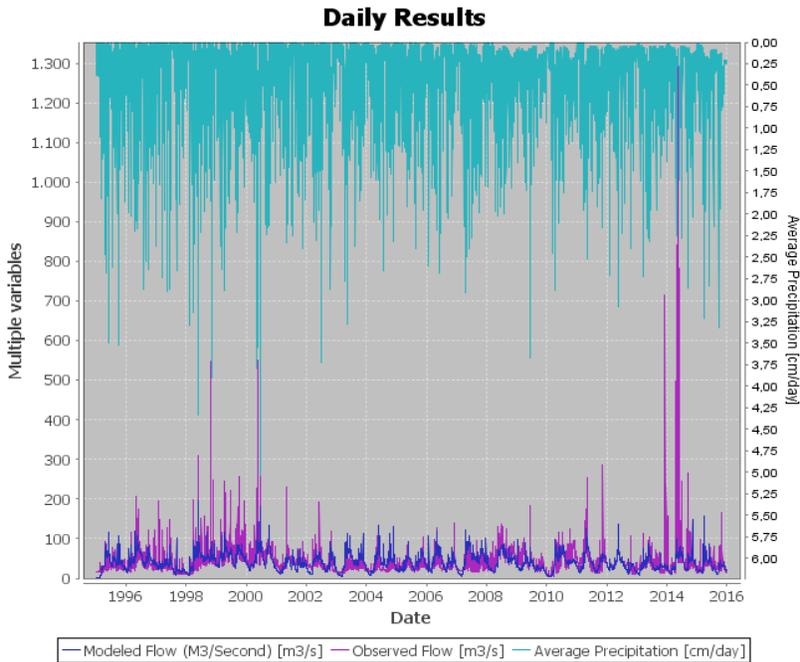


Figura 29. Grafica de Caudales Modelados Vs Observados en modo Calibrado del modelo.

3.3 Modelo: Escenario Actual

Una vez ajustados los distintos parámetros requeridos por modelo, susceptibles de un mejor ajuste por medio de los distintos ensayos establecidos en la calibración anterior, se obtuvieron los resultados de la modelación de la cuenca y se realizaron las modelaciones con pronósticos de cambio climático.

A continuación, se exponen los resultados de la condición actual de la cuenca hasta el punto de la estación Limnigráfica Payande (21217070) con la cual se realizó la calibración del modelo.

En la Figura 30 se representan las subcuencas drenantes hasta el punto de la estación de caudales mencionada y que corresponde al balance hídrico anual propuesto en la Tabla 9. Los balances hídricos de las Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 12 están compuestos por las siguientes columnas que resumen los parámetros resultantes del modelo Hydro-BID y que se describen en la Tabla 8.

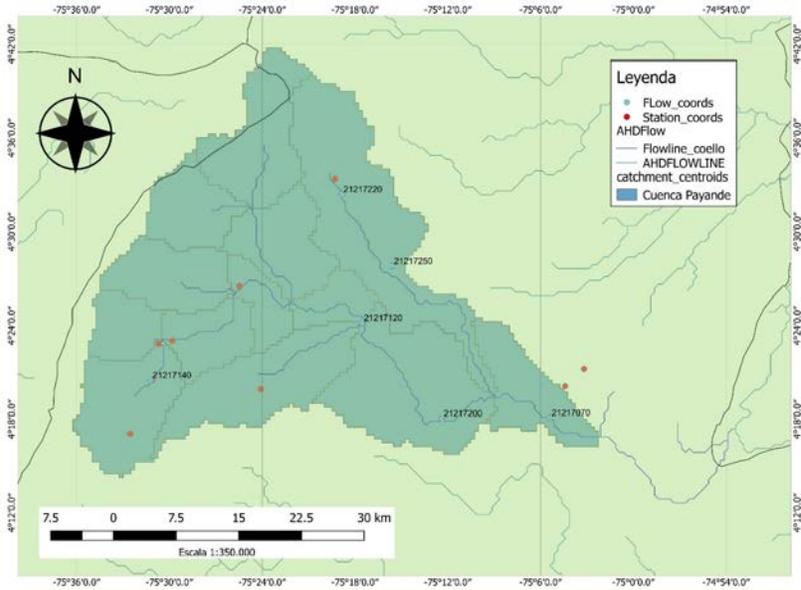


Figura 30. Delimitación de cuenca hasta la estación de caudales Payande con la base de datos LAC-AHD ,incluyendo la estaciones Hidroclimatológicas.

Tabla 8. Definición de parámetros calculados en los resultados del balance hídrico calculado por Hydro-BID.

Parámetro	Definición
Rango de Datos	Corresponden al año o mes modelado en el cual se calculó el balance hídrico
Precipitación	Corresponde a la precipitación media anual en centímetros que se presentó sobre la cuenca de estudio
Evapotranspiración	Corresponde a la evapotranspiración media ocurrida sobre la cuenca en centímetros al año
Escorrentía	Valor correspondiente a la escorrentía media en centímetros al año sobre la cuenca estudiada
Volumen de agua subterránea al cauce	Corresponde al volumen de agua subterránea que ingresa al cauce en centímetros anuales
Flujo Total	Corresponde al flujo o caudal total a la salida de la cuenca estudiada en millones de metros cúbicos al año
% almacenamiento no saturado	Corresponde al porcentaje de almacenamiento en la zona no saturada
% almacenamiento saturado	Corresponde al porcentaje de almacenamiento en la zona saturada
Contribución red de Agua Subterránea	Corresponde a la contribución de la red de agua subterránea en la cuenca.
Recarga	Corresponde al valor de recarga en el acuífero en centímetros
Volumen de Error en Balance	Corresponde al volumen de error del balance hídrico calculado en porcentaje

Tabla 9. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello hasta la estación Payande.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escoorrentía (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almacenamiento no saturado	% almacenamiento saturado	Contribución red de Agua Subterránea	Reca rga	Volumen de Error en Balance
1995	2060,60	897,22	38,21	1041,97	1080,19	0,00	65,75	0,00	17,44	-2,00E-13
1996	2584,16	1033,08	40,65	1424,51	1465,16	10,56	51,52	0,00	23,85	-1,03E-12
1997	1620,63	801,50	22,84	863,98	886,83	-6,18	-75,99	0,00	14,46	-4,18E-13
1998	2625,68	1017,31	71,65	1450,27	1521,92	0,22	61,95	0,00	24,28	-8,09E-13
1999	2840,67	1065,02	40,84	1695,65	1736,49	-1,38	12,15	0,00	28,39	-3,03E-12
2000	2626,52	1020,99	49,20	1560,84	1610,05	11,01	-41,66	0,00	26,13	-2,68E-12
2001	1959,64	924,75	35,57	966,23	1001,80	-6,47	23,38	0,00	16,18	-8,91E-13
2002	1969,36	876,66	33,59	1085,20	1118,79	-6,21	-38,05	0,00	18,17	3,73E-13
2003	2233,64	917,72	59,44	1232,28	1291,72	-0,33	3,90	0,00	20,63	-3,24E-12
2004	2137,87	935,49	55,46	1128,21	1183,68	1,59	-1,77	0,00	18,89	-1,90E-12
2005	2178,37	1000,14	36,44	1109,09	1145,52	-2,68	16,81	0,00	18,57	-1,18E-12
2006	2275,54	970,99	44,36	1247,18	1291,54	-0,91	-6,96	0,00	20,88	-1,52E-12
2007	2555,05	997,94	52,45	1436,08	1488,53	1,76	42,78	0,00	24,04	5,28E-13
2008	2460,35	1081,77	33,45	1361,06	1394,52	2,97	-41,69	0,00	22,79	-3,13E-12
2009	1989,08	1076,46	25,97	930,38	956,35	-2,12	-57,19	0,00	15,58	-4,18E-13
2010	2406,73	1079,00	36,53	1215,21	1251,74	1,76	53,88	0,00	20,34	-1,56E-12
2011	2396,31	1061,14	26,93	1275,90	1302,83	-10,79	21,77	0,00	21,36	2,33E-12
2012	1999,83	991,10	24,81	1027,39	1052,20	3,25	-63,91	0,00	17,20	-3,82E-13
2013	2079,67	1031,82	26,59	981,18	1007,77	-1,38	25,03	0,00	16,43	2,59E-13
2014	2288,56	1040,07	52,24	1189,57	1241,80	-3,64	-9,60	0,00	19,92	-7,92E-13
2015	1983,38	1003,64	47,44	932,90	980,34	5,42	-21,64	0,00	15,62	1,66E-12

Posteriormente, se realizó la modelación para la consecución de resultados hidrográficos a la salida de la cuenca en estudio, aclarando que lo ideal y aconsejable es contar con estaciones hidrográficas a la salida de esta, sin querer afirmar que la modelación sea errada, por no contar con registros como es el caso de la cuenca de salida del río Coello (Figura 31). Por lo anterior, es importante precisar que la herramienta Hydro-BID es un modelo de gestión de recursos hídricos y no de análisis hidrodinámicos, por lo que, aunque no se cuente directamente con una estación para calibración en la subcuenca estudiada o se presenten diferencias en los picos de caudales altos o bajos, si se cuenta con una buena coincidencia de la curva de duración caudales y parámetros estadísticos, con lo que se puede concluir que se está caracterizando de manera adecuada el volumen de agua que transita por la cuenca, lo cual es el resultado deseado.

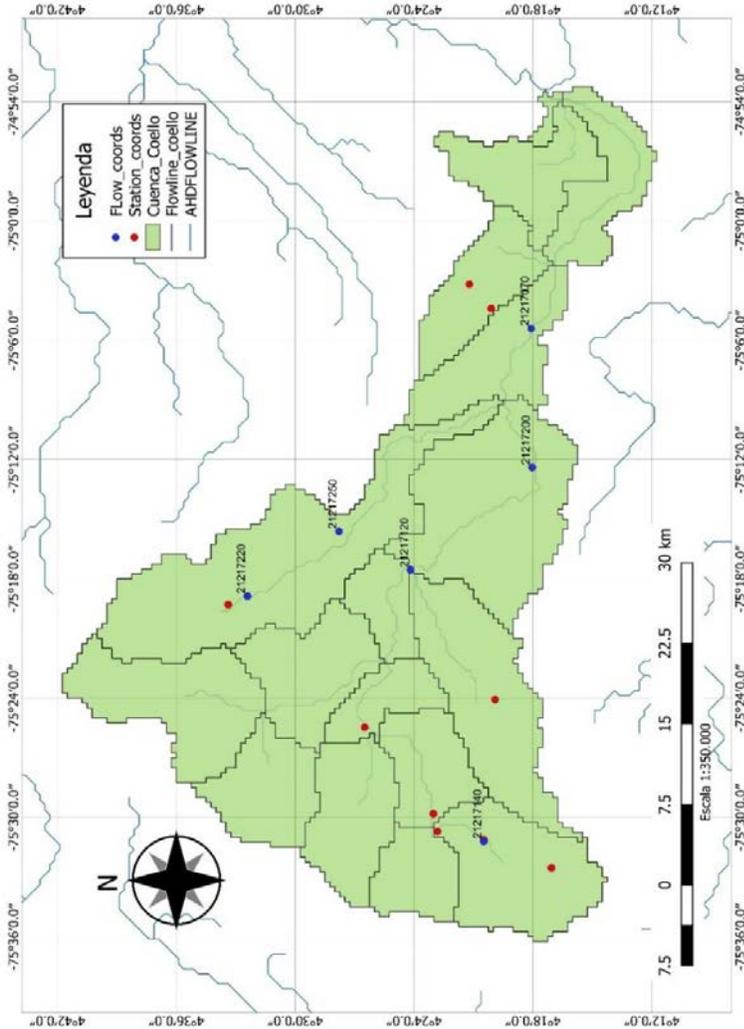


Figura 31. Delimitación de la cuenca total del río Coello hasta su salida al río Magdalena con la base de datos LAC-AHD incluyendo estaciones Hidroclimatológicas.

Por lo expuesto anteriormente, a continuación, se presentan en la Tabla 10 los resultados del balance hídrico de la cuenca total del río Coello en su salida al río Magdalena. (subcuenca codificada 301529100, ver Figura 10).

Del balance de la cuenca se puede destacar la correlación directa de la variación de precipitación con respecto al flujo total de la cuenca, tal y como se evidencia en la Figura 32, en donde se representan los años con mayores incrementos de precipitación y por tanto de flujo. Los valores de precipitación media anual en la cuenca son del orden de 2641 centímetros, con una media de flujo de 1481 Mm³.

Del mismo modo, en la Figura 33 se observa el balance de humedad de la cuenca en las décadas modeladas, indicando una tendencia similar entre la evapotranspiración y la precipitación anual, con una media anual de evapotranspiración de 1129 centímetros contra los 2641 centímetros de precipitación ya mencionados.

Tabla 10. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello hasta salida.

Rang o de dato s	Precipit ación (cm)	Evapotr anspira ción (cm)	Escorre ntia (cm)	Volumen de agua subterrá nea al cauce (cm)	Flujo total Millones m ³	% almace namient o no saturad o	% almacen amiento saturad o	Contrib ución red de Agua Subterr ánea	Recar ga	Volumen de Error en Balance
1995	2394,98	1023,45	98,95	1147,68	1246,63	0,00	102,23	0,00	22,68	7,82E-13
1996	2944,59	1173,88	100,30	1582,44	1682,74	10,56	45,75	0,00	31,67	-3,10E-12
1997	1894,96	904,11	72,14	977,37	1049,51	-4,00	-74,73	0,00	20,08	-1,23E-12
1998	3105,81	1167,55	180,66	1643,07	1823,73	-2,52	83,23	0,00	33,82	1,35E-12
1999	3276,09	1207,71	113,33	1908,56	2021,89	-1,38	8,94	0,00	38,93	2,25E-13
2000	2974,84	1147,55	109,31	1727,69	1837,01	11,01	-55,12	0,00	34,39	9,19E-13
2001	2356,19	1067,14	104,73	1113,12	1217,85	-5,86	53,62	0,00	23,45	-2,03E-12
2002	2401,41	1030,36	102,90	1287,27	1390,17	-7,82	-39,47	0,00	28,17	-2,30E-12
2003	2634,88	1041,16	143,39	1434,40	1577,79	-0,33	-14,38	0,00	30,64	-3,32E-12
2004	2529,32	1058,93	121,23	1321,19	1442,41	1,59	-2,05	0,00	28,44	-4,20E-12
2005	2580,67	1137,03	106,53	1290,80	1397,33	-2,68	21,42	0,00	27,56	-1,32E-12
2006	2691,91	1141,65	96,92	1438,05	1534,97	-0,96	-14,07	0,00	30,33	-5,23E-12
2007	2963,52	1122,36	123,42	1630,72	1754,14	3,94	49,41	0,00	33,68	2,01E-12
2008	2916,12	1240,10	114,24	1567,91	1682,15	0,48	-39,63	0,00	33,02	-1,56E-12
2009	2358,80	1215,62	77,44	1128,27	1205,70	-1,78	-86,11	0,00	25,37	-2,89E-12
2010	2840,97	1223,26	118,39	1401,07	1519,46	2,32	66,38	0,00	29,54	-4,73E-13
2011	2725,11	1206,51	69,87	1421,96	1491,83	-13,49	11,67	0,00	28,59	2,38E-12
2012	2305,00	1108,81	66,18	1169,87	1236,05	3,83	-67,94	0,00	24,25	-2,73E-14
2013	2432,92	1172,21	75,12	1137,83	1212,95	-2,51	26,09	0,00	24,18	1,14E-12
2014	2784,51	1204,36	155,23	1383,46	1538,69	-3,61	15,56	0,00	29,51	2,33E-12
2015	2364,97	1123,46	126,18	1117,31	1243,48	7,06	-33,78	0,00	24,75	4,12E-12

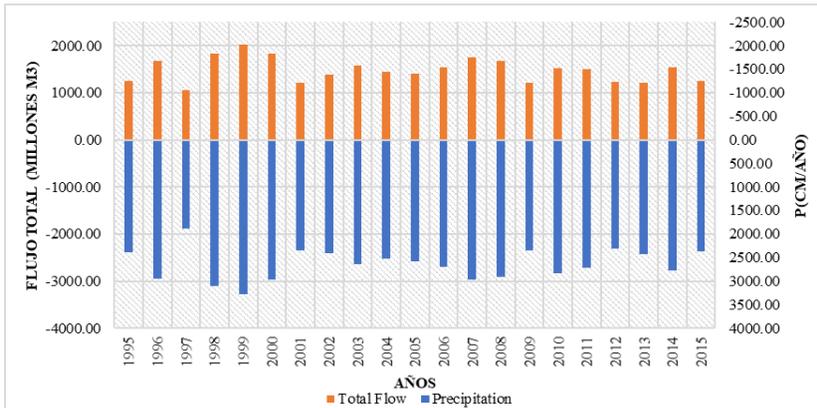


Figura 32. Relación entre Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en su Estado Actual.

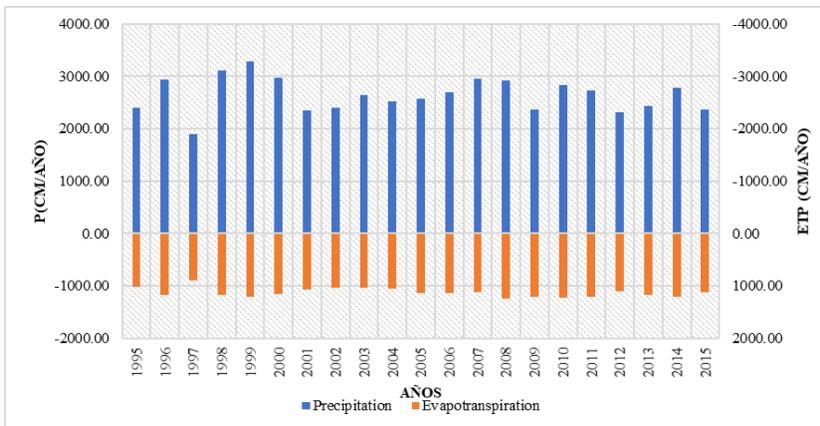


Figura 33. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en su Estado Actual.

3.4 Escenario de Cambio Climático

Para el escenario de cambio climático, se realizaron las modelaciones considerando un aumento de la temperatura en los próximos años de 2°C, junto con un aumento y disminución de la precipitación de un 20%. A continuación, se presentan los resultados de dichas modelaciones, iniciando con incremento de temperatura y precipitación (Escenario 1, Tabla 11), y posteriormente incremento de temperatura y disminución de precipitación (Escenario 2, Tabla 12).

Tabla 11. Balance Hídrico de la Cuenca del río Coello para el escenario 1 de cambio climático.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escurrentia (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total (Millones m ³)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	2873,98	1137,28	156,21	1425,36	1581,57	0,00	127,22	0,00	27,91	1,73E-12
1996	3533,51	1307,17	157,81	1961,25	2119,07	10,51	57,85	0,00	38,90	4,14E-12
1997	2273,95	1004,32	111,93	1228,86	1340,79	-4,05	-92,10	0,00	24,98	-3,46E-13
1998	3726,97	1300,56	281,43	2012,51	2293,94	-2,27	93,83	0,00	40,91	-5,37E-12
1999	3931,31	1348,62	182,46	2339,94	2522,39	-1,69	14,79	0,00	47,19	-4,76E-12
2000	3569,81	1280,73	179,43	2118,07	2297,50	11,20	-61,40	0,00	41,78	1,63E-12
2001	2827,43	1188,56	169,98	1387,69	1557,68	-6,36	58,66	0,00	28,89	6,82E-13
2002	2881,69	1149,83	166,59	1588,48	1755,06	-7,21	-50,23	0,00	34,22	1,49E-12
2003	3161,85	1164,39	225,88	1751,08	1976,96	-0,32	-15,96	0,00	36,78	-3,57E-12
2004	3035,19	1182,91	191,19	1627,19	1818,39	1,09	-1,72	0,00	34,52	-2,12E-12
2005	3096,81	1267,51	170,97	1599,45	1770,42	-2,66	27,94	0,00	33,60	-2,35E-12
2006	3230,30	1277,20	158,05	1774,83	1932,87	-0,25	-16,53	0,00	37,01	-2,88E-12
2007	3556,23	1253,50	203,61	1997,41	2201,02	3,49	57,50	0,00	40,71	-3,15E-12
2008	3499,35	1385,82	178,63	1938,58	2117,20	1,26	-45,24	0,00	40,31	3,59E-12
2009	2830,57	1363,25	125,24	1414,14	1539,38	-2,38	-100,92	0,00	31,23	-3,60E-12
2010	3409,16	1371,94	184,33	1736,73	1921,06	2,24	77,79	0,00	36,13	-1,44E-12
2011	3270,13	1345,51	118,99	1769,69	1888,68	-13,35	14,10	0,00	35,18	-7,09E-13
2012	2766,00	1241,10	108,76	1464,09	1572,85	3,52	-81,53	0,00	30,06	-2,68E-12
2013	2919,50	1308,96	121,60	1426,80	1548,40	-2,81	35,05	0,00	29,91	-5,18E-13
2014	3341,42	1353,63	231,55	1711,86	1943,41	-2,93	11,31	0,00	35,99	-1,22E-12
2015	2837,97	1264,53	192,55	1381,76	1574,30	7,28	-38,21	0,00	30,06	3,36E-12

Para el Escenario de cambio climático número 1, se observa un flujo total promedio de 1870 Mm³/año, con una precipitación media al año de 3170 centímetros. (Figura 34). La evapotranspiración presenta un promedio de 1262 centímetros al año (Figura 35). Lo anterior manteniendo sus correlaciones directas en cuanto a las variaciones de precipitación anual y las condiciones actuales de la cuenca.

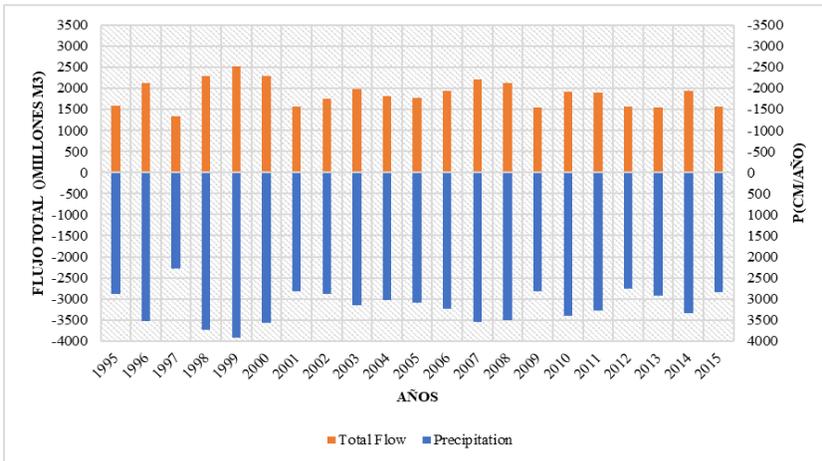


Figura 34. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en el Escenario 1.

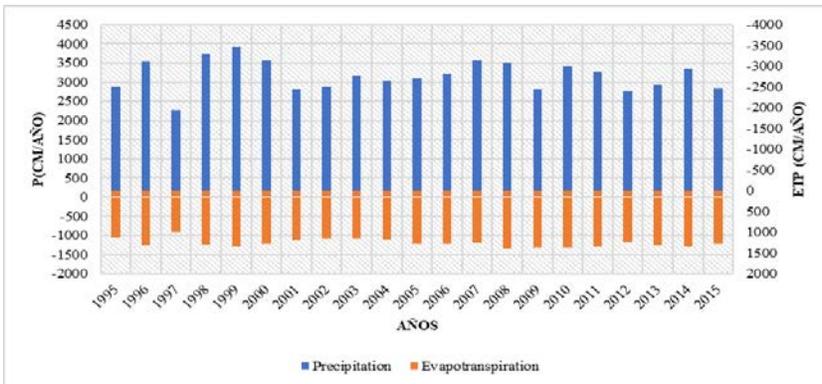


Figura 35. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en el Escenario 1.

Para el escenario 2, se observan valores totales de flujo promedio de 929 Mm³ al año, con precipitaciones anuales promedio de 2113 centímetros (Figura 36). Para la evapotranspiración calculada, se tiene un valor promedio anual 1165 centímetros.

Tabla 12. Balance Hídrico de la cuenca del río Coello para el Escenario 2 de cambio climático.

Rango de datos	Precipitación (cm)	Evapotranspiración (cm)	Escurrentia (cm)	Volumen de agua subterránea al cauce (cm)	Flujo total (Millones m ³)	Almacenamiento no saturado (%)	Almacenamiento saturado (%)	Contribución red de Agua Subterránea	Recarga	Volumen de Error en Balance
1995	1915,99	1053,60	53,77	731,60	785,37	0,00	62,30	0,00	14,72	-1,83E-12
1996	2355,67	1229,96	54,34	1009,75	1064,09	9,52	31,52	0,00	20,58	6,64E-13
1997	1515,97	905,14	43,03	608,06	651,09	-3,40	-49,61	0,00	12,75	6,46E-13
1998	2484,65	1217,02	98,66	1088,90	1187,56	-3,25	60,30	0,00	23,02	-2,73E-13
1999	2620,87	1276,61	61,01	1253,63	1314,64	-0,48	4,01	0,00	26,10	5,49E-13
2000	2379,87	1200,43	55,01	1134,24	1189,25	9,36	-42,12	0,00	22,97	1,26E-12
2001	1884,95	1078,34	54,36	699,66	754,01	-5,83	43,29	0,00	15,14	4,91E-13
2002	1921,12	1042,68	54,82	836,75	891,57	-5,50	-26,34	0,00	18,72	-8,73E-13
2003	2107,90	1073,37	78,92	948,43	1027,35	0,00	-13,61	0,00	20,79	-7,28E-14
2004	2023,46	1084,36	65,34	851,66	917,00	0,57	2,59	0,00	18,94	-5,12E-12
2005	2064,54	1176,28	55,47	809,39	864,85	-1,40	6,85	0,00	17,96	7,67E-13
2006	2153,53	1161,31	50,81	930,75	981,55	-0,05	-9,11	0,00	19,83	-2,54E-12
2007	2370,82	1187,97	61,02	1061,18	1122,20	3,05	35,22	0,00	22,37	-2,53E-12
2008	2332,90	1309,68	64,13	973,20	1037,33	-4,27	-30,98	0,00	21,14	-5,23E-13
2009	1887,04	1245,02	41,55	645,34	686,90	-0,38	-59,89	0,00	15,39	1,72E-12
2010	2272,77	1270,85	67,29	869,43	936,72	3,75	42,45	0,00	19,01	5,13E-12
2011	2180,08	1251,48	33,80	876,45	910,25	-11,90	12,21	0,00	18,03	9,69E-13
2012	1844,00	1125,38	34,57	708,17	742,74	1,07	-40,21	0,00	15,03	-2,23E-13
2013	1946,33	1200,95	39,09	684,41	723,50	-0,40	7,13	0,00	15,16	1,57E-12
2014	2227,61	1233,22	92,77	867,32	960,08	-3,62	18,82	0,00	19,11	-1,82E-12
2015	1891,98	1146,28	74,46	684,83	759,29	0,47	-29,94	0,00	15,88	2,27E-12

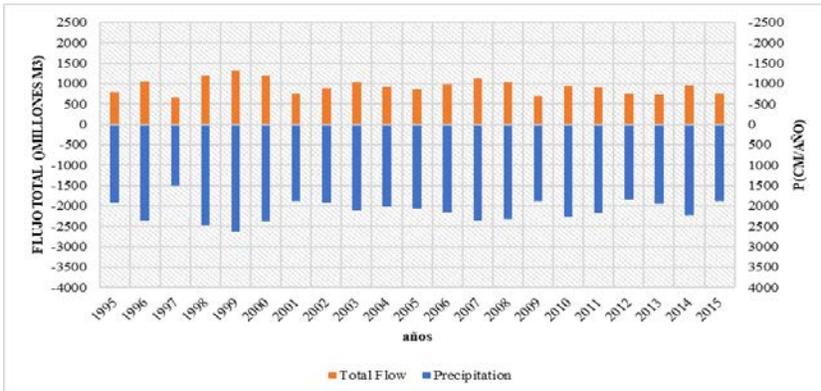


Figura 36. Balance de Caudal – Precipitación para la cuenca del río Coello en el Escenario 2.

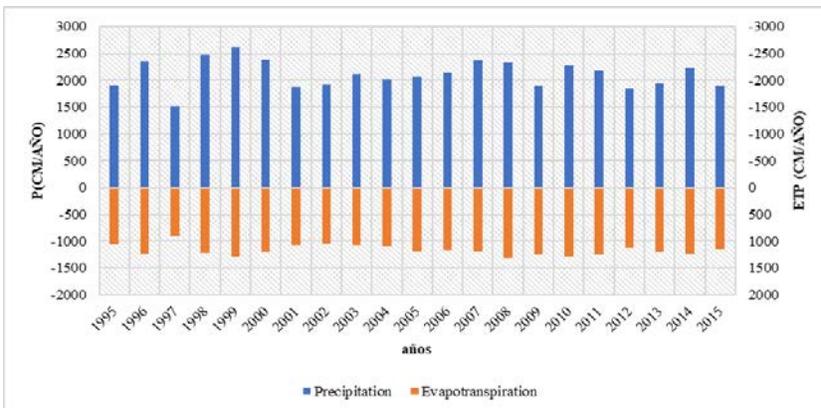


Figura 37. Balance de humedad para la cuenca del río Coello en el Escenario 2

4 Discusión

Como punto de partida para la verificación de los resultados alcanzados, se obtuvieron y analizaron diferentes estudios realizados por el IDEAM y la Corporación Autónoma Regional del Tolima, sobre el territorio colombiano y, específicamente, sobre la cuenca del río Coello, observándose que la herramienta Hydro-BID logra una adecuada caracterización hidrográfica de la cuenca, con volúmenes de flujo bastante próximos a los observados en la estación Payande, siendo esta la estación más próxima a la salida de la cuenca en el río Magdalena.

Los resultados del balance hídrico correspondientes a la modelación del estado actual, dan cuenta de una oferta hídrica media de 804.017 m³/km²/año equivalente a 25,50 l/s/ km², lo que es bastante próximo a lo definido por el ENA 2014 (IDEAM, 2015), para la cuenca alta del río Magdalena, cuenca a la que pertenece el río Coello, con un valor para año medio de 769.077 m³/ km²/año, equivalente a 24,39 l/s/km² (Figura 38).

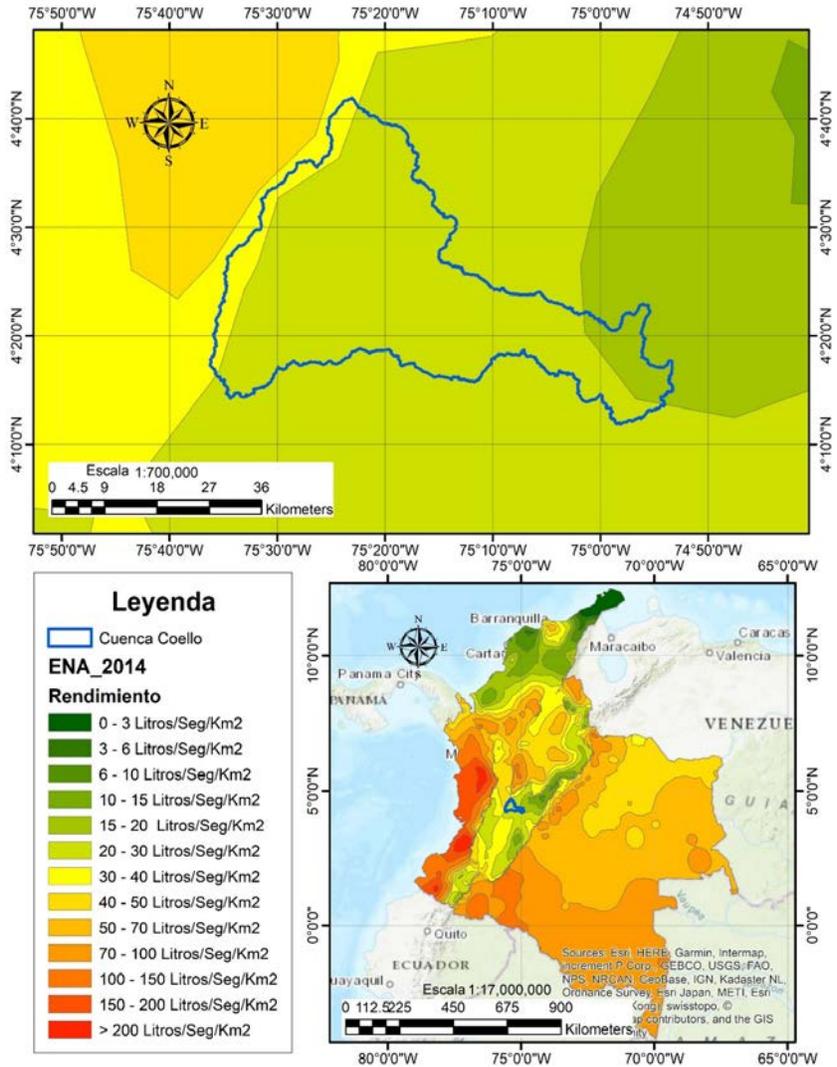


Figura 38. Rendimiento hídrico total para condiciones de año medio en

Colombia. Fuente: adaptado de IDEAM (2015).

De igual manera, en la actualización del ENA 2018 (IDEAM, ENA, 2018), se determinó, para la cuenca mayor del río Coello, una oferta hídrica para el año medio de 774.782 m³/km²/año equivalente a 24,57 l/s/km². En dicho estudio, la oferta hídrica prevista para la cuenca total del río Magdalena se encuentra en promedio para año medio en 999.693 m³/km²/año, equivalente a 31,70 l/s/km², por lo que se puede considerar que, los valores propuestos por el modelo y su respectiva calibración se encuentran acordes con la realidad hídrica de la región andina colombiana y por ende de la cuenca mayor del río Magdalena.

Por otra parte, el dato reportado por la Corporación Autónoma Regional del Tolima sobre el caudal medio de la cuenca mayor del río Coello es de 31,25 m³/s, equivalente a una oferta hídrica promedio de 16,96 l/s/km² (CORTOLIMA, 2004), bastante menor al calculado en la modelación con Hydro-BID y al definido por el IDEAM en el ENA 2014 (IDEAM, 2015). Hechos, datos o situación que puede ser objeto de discusión respecto a las fechas del estudio de CORTOLIMA, ya que fue realizado con información climatológica anterior al año 2004, por lo que la hipótesis que se consideró tiene una mayor periodicidad en los caudales extraordinarios de la última década por efectos del fenómeno ENSO en la región (ESRL, 2018), lo que generó un incremento en los promedios de caudales medios de la cuenca entre el año 2004 y 2015, y por ende una elevación en el promedio de la oferta hídrica de esta. Lo anterior, fue corroborado con los registros obtenidos para la modelación y que se pueden ver reflejados en los caudales observados de la Figura 29.

En cuanto a la escorrentía calculada por Hydro-BID, los resultados son bastante acertados, si se comparan con los valores propuestos por el ENA 2014 (IDEAM, 2015), donde los rangos para la región Andina, ubicación de la cuenca del río Coello, están entre 800 y 1500 milímetros en promedio para el año medio colombiano, contrastados con un valor promedio para las décadas analizadas en la cuenca de acuerdo con el modelo de 1084 mm (Figura 39).

Por otra parte, obtenidos los resultados del módulo de cambio climático de Hydro-BID y analizados los dos escenarios propuestos, son evidentes las afectaciones provocadas por el incremento de la temperatura global en ambos escenarios, considerada en 2°C para la región en las próximas décadas, y a las

variaciones de precipitación por efectos de los fenómenos recurrentes en la zona ecuatorial americana. Lo que conduce directamente a incrementos del flujo del cauce en el escenario de mayores precipitaciones y descensos del flujo aún más considerables en el escenario con menores precipitaciones y que se ve afectado por el aumento que sufre la evapotranspiración debido al incremento en la temperatura.

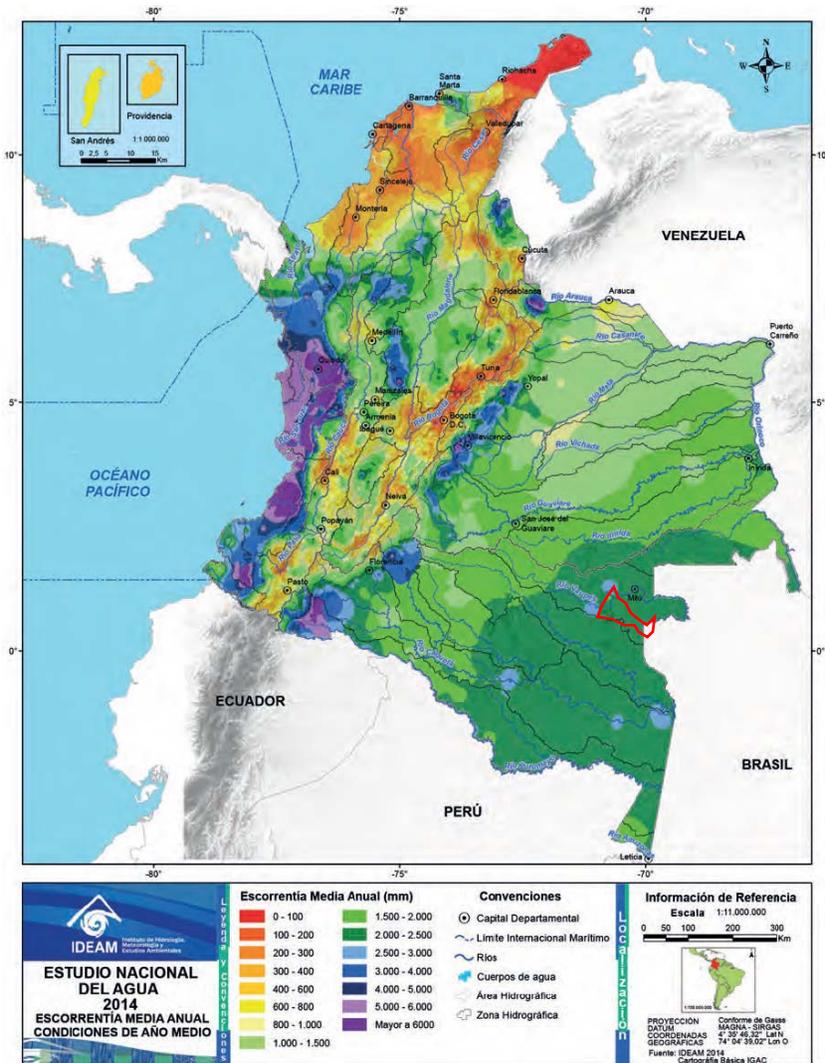


Figura 39. Escorrentía Media Anual para condiciones de año medio en Colombia. Fuente: adaptado de IDEAM (2015), figura 2.8.

En la Figura 40 se observa el comportamiento del flujo total a la salida de la cuenca comparado entre los escenarios de cambio climático y el comportamiento actual de esta, donde, además de la variabilidad climática de los escenarios propuestos, se observa una tendencia moderadamente decreciente de los flujos, lo que ya de por sí es una situación negativa considerando las posibles afectaciones a futuro, respecto al abastecimiento tanto de acueductos para las poblaciones de la cuenca como para los distritos de riego que hacen uso del recurso hídrico. Igualmente, se estiman las variaciones climáticas producto del fenómeno ENSO sobre la región, donde se observa la concordancia de incrementos de flujo en diferentes años con respecto a los registros realizados por la ESRL en la temperatura del océano pacífico (Figura 41).

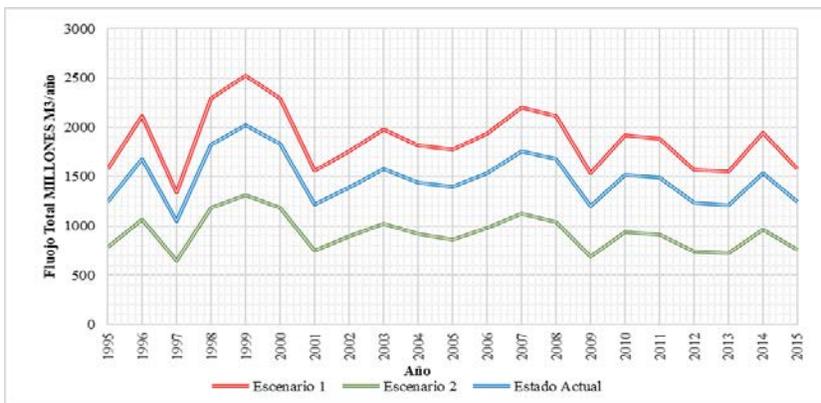


Figura 40. Comparativo de escenarios de Cambio Climático para los resultados de Flujo Total en la cuenca del río Coello

Los años más representativos para el fenómeno ENSO con descensos de temperatura del océano pacífico y por ende incrementos de precipitaciones extraordinarias en la región colombiana fueron, 1996, 1999, 2008 y 2011 (ESRL, 2018).

Por otro lado, los resultados del Escenario 1, dan cuenta de un incremento de Evapotranspiración de 12% con un aumento del flujo total de 26%, lo que indudablemente podría generar problemas en la hidrodinámica del cauce y sobre niveles tanto en caudales medios como en extraordinarios, lo que llevaría a posibles

amenazas de desbordamientos o inundaciones en zonas ribereñas (IDEAM ENA, 2018).

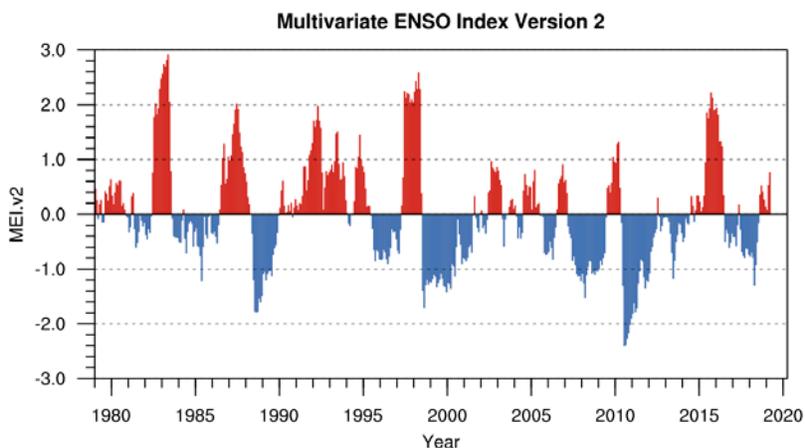


Figura 41. Total Multivariate ENSO Index Version 2 (MEI.v2)
Fuente: adaptado de: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#ElNino>.

Los resultados del Escenario 2 muestran un incremento de la evapotranspiración del 3% y descensos más considerables del flujo total de la cuenca, aproximadamente en un 38%. Lo que resulta un valor bastante relevante a la hora de medir la oferta hídrica a futuro y que servirá para las evaluaciones de aprovechamiento del recurso hídrico. Con este escenario que, a juicio del autor, se consideraría el más probable de acuerdo con la tendencia decreciente de flujo del cauce y los pronósticos de cambio climático realizados por el IPCC (IPCC, 2014), la oferta hídrica caería en las próximas décadas a un valor aproximado de 504.343 m³/km²/año.

Por otra parte, de acuerdo con IDEAM, *et al.* (2015) se tiene previsto que, para el departamento del Tolima, donde se ubica la cuenca del río Coello, se presenten incrementos de temperatura en un rango de valores de 0,9 °C y 2,3°C entre los años 2011–2100, con aumentos de la precipitación media en el mismo periodo de 10,54% a 17,24%, con un pronóstico de mayor aumento de precipitación en la zona de Nivales entre el 30% y 40%, dándole mayor fuerza a la hipótesis del Escenario 1. Por lo anterior, se podrían reflejar efectos de mayores escorrentías y aumento de zonas

erosionables, al presentarse afectaciones en las coberturas de tierra actual causadas por incrementos de precipitaciones y temperatura.

Considerando los resultados analizados, es natural pensar que se requerirá una intervención, en un corto plazo, de las autoridades ambientales colombianas para considerar un plan de gestión y manejo integral de la cuenca, realizando programas socio ambientales ante el cuidado y preservación del recurso hídrico en las comunidades de toda la cuenca, particularmente sobre los principales actores que se benefician y cuentan con procesos de explotación hídrica y minera en esta.

De igual manera, dentro de los programas de gestión de la cuenca se pueden tomar medidas de control como zonas de embalses, con el fin de laminar los efectos de crecientes extraordinarias que se podrían presentar ante el Escenario 1 modelado, y contar con una regulación y reserva de caudales medios para zonas aguas abajo de los embalses o represas, lo que ayudaría en gran medida a la minimización de desabastecimiento para los beneficiarios del río.

5 Conclusiones

La construcción y calibración del modelo Hydro-BID para la cuenca hidrográfica seleccionada con base en la información hidroclimatológica disponible fue favorable, logrando una calibración eficaz con volúmenes de error mínimos y aproximaciones altas en la correlación de los valores observados y los calculados por el modelo, dando así una confiabilidad alta en la respuesta del modelo respecto a la metodología de lluvia-escorrentía utilizada, a los parámetros de cobertura terrestre y tipo de suelo predefinidos y a la practicidad en su calibración, fundada en la modificación de parámetros hidrológicos e hidráulicos básicos.

Una vez analizados y discutidos los resultados del modelo Hydro-BID para la cuenca Coello, se puede establecer que dicha herramienta arroja resultados aceptables y concordantes para la caracterización actual de una cuenca hidrográfica colombiana, con márgenes de variación menores al 5% con respecto a estudios realizados para la cuenca y para la región hidrográfica del río Magdalena.

Respecto a los resultados de los escenarios de cambio climático sobre la cuenca, se puede comprender las fortalezas de la herramienta Hydro-BID para la toma de decisiones inmediatas sobre la gestión de los recursos hídricos de una región, encaminados a la mitigación de impactos sobre las necesidades de poblaciones y territorios aferentes a las cuencas modeladas.

De igual manera, la ventaja de la disponibilidad de variación de valores como la temperatura y la precipitación, tanto de manera anual como mensual, que se encuentran ampliamente estudiados y analizados en los diferentes estudios de cambio climático a nivel regional y global, dan una confiabilidad importante de los resultados que se obtienen de la herramienta para así proponer medidas particulares de control.

Bibliografía

- Breña, A., Jacobo M., 2006: Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana, 289.
- Chow V., Maidment, D., Mays, L., 1994. Hidrología Aplicada, 584.
- CORTOLIMA, 2004: Proyecto Plan de Ordenación y manejo de la Cuenca hidrográfica mayor del río Coello – Convenio CORTOLIMA – CORPOICA – SENA. UNI. TOLIMA.
<https://www.cortolima.gov.co/contenido/ii-fase-diagnostico-r%C3%ADo-coello-0>
- DANE, 2018: Censo Nacional de población y Vivienda 2018, Colombia.
<https://sitios.dane.gov.co/cnpv-presentacion/src/#donde00>
- ESRL, 2018: El Niño/*Southern Oscillation* (ENSO),
<https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#ElNino>
- Haith, D.A., R. Mandel, R. y R.S. Wu. 1996. *Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0 User's Manual*. 64.
<http://sp.hydrobidlac.org/>
<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- IDEAM, 2013: Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. 47.
- IDEAM, 2015: Estudio Nacional del Agua 2014. Bogotá, D.C. 496.
- IDEAM, 2017: Atlas Climatológico de Colombia. Bogotá, D.C. 266.
- IDEAM, 2018. Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica, Bogotá, D.C. 59.

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coello con Hydro-BID / 55

- IDEAM, ENA 2018: Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, D.C. 452.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLEA, 2015: Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones–Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Bogotá, D.C. 60.
- IDEAM, Tomo 1, 2015: Colombia afectada por El Niño y la Niña en el periodo 2012 a 2014 y proyecciones climáticas a 90 años. Bogotá, D. C. 100.
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157.
- Montealegre J. E.: (1990) Técnicas Estadísticas aplicadas en el manejo de datos Hidrológicos y Meteorológicos, 45.
- Ochoa, T., 2011. Hidraulica de Ríos y Procesos Morfológicos, 704.
- Pascual, J., Díaz, M., 2016. Guía práctica sobre la modelación hidrológica y el modelo HEC – HMS, 155.
- Pizarro, R., González, P., Witterssheim, M., Saavedra, J., Soto, C., 1993. Elementos técnicos de hidrología III. Proyecto regional mayor sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América latina y el caribe. Universidad de Talca, 135.
- SPOC HydroBID. (2019) Curso HydroBID: Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe
- UNDP. 2018: *Human Development Indices and Indicators 2018 Statistical Update. United Nations Development Programme*, New York, USA. 123.

Desarrollo de un modelo de balance hídrico en la cuenca alta del Río Negro (Uruguay): Análisis de la disponibilidad de agua en diferentes escenarios

M. Sadres Blanco^{a,b}, J.A. Pascual-Aguilar^{c,d}

^aUniversidad de Alcalá. Campus externo Universidad de Alcalá.

^bUniversidad de la República, Facultad de Ingeniería.

^cCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^dInstituto IMDEA-AGUA.

Resumen

El agua constituye un recurso escaso, y existe una competencia por su uso, debido al aumento poblacional, el desarrollo socioeconómico, los modos de consumo y los efectos del cambio climático. Los modelos hidrológicos son una herramienta valiosa en la gestión de los recursos, utilizándose para elaborar estrategias adecuadas en la asignación del agua, analizar la viabilidad de proyectos y evaluar situaciones medioambientales. Hydro-BID es un modelo de simulación continua para la región de América Latina y el Caribe, a partir del desarrollo de una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), y un modelo de precipitación escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados.

El objetivo específico de este trabajo desarrollar con Hydro-BID un modelo que permita determinar las aportaciones de agua en la Cuenca Alta del Río Negro (Uruguay), considerando distintos escenarios futuros. El proceso de calibración-validación se ha realizado utilizando series temporales de caudal en cuatro estaciones de aforo del período 1995-2018.

Los resultados muestran que el parámetro obtenido para el Número de Curva, que determina la escorrentía inicial, es más bajo de lo esperado. Los valores observados para la infiltración, escorrentía superficial y percolación profunda se explican a partir de las características hidrogeológicas de cada una de las cuencas de captación. Los efectos en el cambio climático se estiman en el intervalo -4.2 a -7.1% (dependiendo de la subcuenca) para un escenario en que la temperatura media aumenta 1.3 °C. La incorporación de nuevas hectáreas de eucaliptus significará cambios en el ciclo hidrológico, siendo perceptibles en la evapotranspiración total. Ha de indicarse que no se pondrá en riesgo el cumplimiento de los caudales ambientales en los escenarios futuros, aunque es de esperarse una mayor presión sobre el recurso hídrico, que puede significar condicionamiento para otros usos.

Palabras clave: Modelos Hidrológicos, Hydro-BID, Río Negro Uruguay, Cambio Climático.

Development of a water balance model in the upper Rio Negro basin (Uruguay): Analysis of water availability in different scenarios

M. Sadres Blanco^{a,b}, J.A. Pascual-Aguilar^{c,d}

^aUniversidad de Alcalá. Campus externo Universidad de Alcalá.

^bUniversidad de la República, Facultad de Ingeniería.

^cCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^dInstituto IMDEA-AGUA.

Abstract

Water constitutes a scarce resource, and there is a global competition for its use, as a result of the population increase, socioeconomic development, consumption models and the effects of climate change. Hydrological models must be a valuable tool in resource management, and are used to develop appropriate strategies in water allocation, to analyze water related projects viability and to evaluate environmental situations. Hydro-BID has developed a continuous simulation model for the Latin American and Caribbean region from the development of an Analytical Hydrology Database (AHD) and software that incorporates a runoff precipitation model.

The specific objective of this work is, by using Hydro-BID tools, to develop a model that allows to determine the contributions of water in the Upper Watershed of Río Negro (Uruguay) considering different future scenarios. The calibration-validation process was carried out using water flow time series of four capacity stations in the 1995-2018 year time period. In general, it must be indicated that the parameter obtained for the Curve Number which determines direct runoff after a precipitation event is lower than expected. The values observed for infiltration, surface runoff and deep percolation are explained from the hydrogeological characteristics of each of the catchment watershed.

The effects of climate change on surface water supply are estimated in the range -4.2 to -7.1% (depending on the subwatershed) for a scenario in which the average temperature increases 1.3° C. The incorporation of new eucalyptus hectares will determine changes in the hydrological cycle, mainly in total evapotranspiration, as well as intercepted water which does not reach the ground. Initially it should be noted that compliance with regulated environmental flows in future scenarios will not be jeopardized, although an incremental pressure on the resource is expected which may mean conditioning for other uses.

Keywords: Hydrological Models, Hydro-BID, Río Negro Uruguay, Climate Change.

1 Introducción

1.1 El agua como recurso escaso

El uso de agua ha aumentado un 1% anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por una combinación del aumento poblacional, desarrollo socioeconómico y cambio en los modelos de consumo. La demanda de agua se espera siga creciendo a un ritmo parecido hasta el año 2050, lo que ha de significar un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso (ONU, 2019). Actualmente más de 2.000 millones de personas viven en países que sufren fuerte escasez de agua, y se espera que la presión sobre el recurso se intensifique, como consecuencia, además, de los efectos del cambio climático.

Uruguay tiene uno de los índices de acceso de agua potable más altos de América Latina, alcanzando el 97% (WHO/UNICEF, 2006). Los principales desafíos significan asegurar las adecuadas condiciones de saneamiento para el entorno semi-urbano, y los asentamientos urbanos en situación de vulnerabilidad, así como el adecuado tratamiento de los efluentes domiciliarios. Considerando la disponibilidad de recursos no es de esperar que Uruguay sufra de estrés hídrico en los próximos decenios. Sin embargo, la incorporación de nuevas tecnologías agrícolas, y en particular el regadío, así como nuevas cadenas agroindustriales en los últimos 15 años, con alto consumo, han puesto el tema del agua sobre la mesa en la opinión pública. Al mismo tiempo se ha constatado en los últimos 20 años un deterioro permanente en la calidad de los cursos de agua, con situaciones de eutrofización y necesidad de mayores inversiones en los procesos de potabilización (RAPAL Uruguay, 2010).

1.2 Introducción a los modelos hidrológicos

Un modelo se desarrolla a efectos de representar de manera simplificada la realidad que se quiere estudiar, y así facilitar su comprensión. Un modelo hidrológico constituye la representación simplificada de determinados procesos del ciclo hidrológico, por medio de un conjunto de conceptos hidrológicos expresados en forma matemática y ligados por una secuencia espaciotemporal (Arias Lastre, 2015).

Los modelos hidrológicos se utilizan para variados propósitos en proyectos de planificación, diseño y operación de las infraestructuras del agua. Los modelos de cuencas son fundamentales para la evaluación de los recursos hídricos disponibles permitiendo analizar la cantidad y calidad del flujo de agua, gestionar las reservas del recurso, proteger las aguas subterráneas, diseñar sistemas de distribución y elaborar estrategias adecuadas de manejo conjunto de los recursos de agua superficiales y subterráneas (Singh y Woolhiser, 2002).

El realizar un modelo, consiste bien en poder predecir la escorrentía que producirá una precipitación determinada sobre una cuenca (modelos de flujo), o bien en poder determinar de qué manera se ha de alterar las características de un curso de agua y su cuenca por un suceso determinado (modelos de transporte). De igual manera los modelos hidrogeológicos se clasifican de acuerdo con la extensión temporal que analizan. Así podremos distinguir entre modelos que simulan un suceso puntual, y modelos de simulación continua.

Existen múltiples modelos hidrológicos que han de utilizarse en el mundo. Según Singh y Woolhiser (2002), *“el modelo HEC-HMS es considerado el estándar para el diseño de sistemas de drenaje en el sector privado de los Estados Unidos, para cuantificar los efectos por el uso de la tierra en las inundaciones”*. Este mismo trabajo menciona el modelo NWS como el estándar para el pronóstico de inundaciones en ese mismo país, los modelos UBC y WATFLOOD para simulación hidrológica en Canadá, y los modelos RORB y WBN para pronóstico de inundaciones, diseño de drenajes y evaluación del efecto del cambio en el uso del suelo en Australia. Por último, los modelos TOPMODEL y SHE son los utilizados en muchos países europeos, mientras que el ARNO, LCS y TOPIKAPI son populares en Italia.

1.3 Modelos de flujo: Relación precipitación-escorrentía

En la actualidad los modelos distribuidos o semi-distribuidos abordan el proceso de modelado a través de una arquitectura modular, dividiendo el modelo, en distintos submodelos interconectados entre sí, como ha de ser la entrada de precipitación, el almacenamiento y pérdidas en la fase área del ciclo hidrológico, los procesos de generación de escorrentía y transmisión de flujos en la zona del suelo y capas

profundas más profundas. Sin embargo, aun concibiendo el modelado de manera que separa los principales componentes, en ocasiones cuando se dispone de escasas mediciones reales, puede ser más conveniente y realista recurrir a modelos que los integra, como ha de ser el caso por ejemplo del HEC-HMS, a través del parámetro denominado Número de Curva (CN) y la posterior obtención del almacenamiento máximo de la cuenca ante circunstancias de humedad antecedente dadas y la precipitación neta (Pascual Aguilar y Díaz, 2016).

El CN, que también es utilizado como parámetro por Hydro-BID es una función de la abstracción inicial, y para su evaluación se utilizan tablas en función del tipo del suelo, uso del suelo, y pendiente, y ha de adaptarse al grado de humedad previo en el suelo. Por ejemplo, ha de indicarse que, si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones serán menores, y en sentido contrario, si los días anteriores no ha llovido, el suelo estará seco y las abstracciones serán mayores. Esta corrección ha de realizarse a través de relaciones matemáticas empíricas (BID, 2014a; Sánchez San Román, 2017).

HMS o Hydro-BID, como modelos continuos, intentan simular todo el proceso hidrológico, consideran la humedad del suelo, y tienen en cuenta los distintos mecanismos por lo que la precipitación puede ser retenida, vegetación, retenciones superficiales, suelo y acuífero.

Un concepto que se introduce es el de intercepción, que representa la parte de la precipitación que no alcanza la superficie y es retenida por las plantas, y que por tanto afecta la dinámica hidrológica. La sustitución de pasturas naturales por plantaciones forestales interfiere de manera significativa en la intercepción (Belmonte y Romero, 1999; Díaz y Rébori, 2003; Martínez Fernández, 2014). Díaz y Rébori (2003) indican que: los resultados de 94 estudios de cuencas comparativas demostraron que los bosques de eucalipto ocasionan en promedio una reducción de 40 mm en el escurrimiento anual por cada 10% de cambio en cobertura respecto de los pastos naturales. Además, un monte adulto de Eucaliptus puede interceptar más del 13% de la lluvia total (Sacramento Neto, 2001).

Para evaluar el consumo de agua por plantaciones de eucaliptus en cuencas del Uruguay ha de mencionarse el trabajo de maestría realizado por Martínez (2013). A

partir del mismo en el periodo comprendido entre octubre de 2006 y setiembre de 2009 se obtuvieron registros de precipitación total, precipitación directa, escurrimiento superficial y contenido del agua en el suelo. Los valores promedios diarios de evapotranspiración se han calculado en 3,9 y 3,6 mm, para el periodo estival (octubre-marzo), para la cobertura forestal y de pastura respectivamente; en los meses de invierno (abril-setiembre) alcanzaron 1,7 y 1,5 mm. La diferencia en el consumo de agua entre coberturas se debió a la intercepción del dosel, que varió entre 19 y 24 % de la precipitación anual, mientras que ésta se asumió despreciable en la pastura.

La sustitución progresiva de pasturas naturales por montes de eucalipto significó, por tanto, un cambio en el ciclo hidrológico de la cuenca por considerar un porcentaje del agua que nunca alcanzará la superficie del suelo representando así cambios en las dinámicas de almacenamiento y flujo que se establecen en el suelo e infiltración profunda.

1.4 Introducción al Sistema Hydro-BID

Hydro-BID se ha desarrollado como un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos en la región de América Latina y el Caribe, bajo escenarios de cambio (por ejemplo, clima, uso de suelo, población), que permite evaluar la disponibilidad de agua, las necesidades de infraestructura, y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación a estos cambios. El objetivo que se propuso el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) fue ofrecer una plataforma que permita interactuar con otras herramientas (por ejemplo, los sistemas de información geográfica), accesible en la región, propiciando un marco para la parametrización de modelos, utilizando una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD), cuyas características se definen a continuación:

- Una estructura de cuencas de polígono con un esquema único de identificación de cuencas, en adelante COMID.
- Una estructura para los segmentos fluviales contenidos en cada cuenca.
- Atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo entre cuencas.

- Una estructura de base de datos en SQLite, para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo.

“La AHD utiliza un modelo de base de datos vectorial en las que los atributos están representados como puntos, líneas y polígonos e incluye las relaciones entre caudales aguas arriba y aguas abajo como atributos, estando la conectividad del sistema hidrográfico codificado en la data, y los datos se derivan principalmente de un único conjunto de datos de elevaciones. Los segmentos fluviales y los correspondientes cauces contenidos en la AHD se desarrollan a través de un algoritmo automatizado utilizando solamente estos datos de elevaciones (BID, 2014a)”. Esto significa que los segmentos fluviales son derivados y no están necesariamente ubicados en los sitios o con la magnitud espacial real, tal como ocurrirían en un mapa o imagen satelital, hecho que se pone en manifiesto cuando ha de existir intervenciones del hombre, por ejemplo, mediante la construcción de urbanizaciones, presas y embalses.

Los segmentos fluviales y cuencas hidrográficas ya incorporadas constituyen una de las principales características diferenciadoras de Hydro-BID, pues proveen una base inicial del modelado sobre la que es necesario incluir otros atributos (más dinámicos) de corrientes o cuencas, como podrán ser datos climáticos, usos de la tierra, propiedades del suelo, calidad de agua, y carga de sedimentos.

Además de la AHD el Sistema Hydro-BID incluye lo siguiente:

- Una herramienta de navegación basada en un sistema de información geográfica para seleccionar cuencas y corrientes de la AHD aguas arriba y aguas abajo;
- Una interfaz de usuario para determinar específicamente el área y el periodo de tiempo a ser simulado y la ubicación donde la disponibilidad de agua será simulada;
- Una interfaz de datos climáticos para generar y aplicar entradas de precipitación y temperatura para el área y el período de interés;
- Un modelo de precipitación - escorrentía basado en el Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF, por sus siglas en inglés); y
- Un esquema de cálculo hidráulico (routing) para cuantificar el tiempo de tránsito y los estimados de flujos a través de las cuencas aguas abajo.

Hydro-BID genera salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogido.

1.5 El caso de estudio

El propósito de este Trabajo de Fin de Máster es ilustrar sobre la aplicación del modelo Hydro-BID a un reto específico de manejo de recursos hídricos en el Uruguay, con la intención de mostrar el proceso de aplicación del modelo, incluyendo lo siguiente:

- Formulación de los objetivos de la aplicación
- Características del área del caso de estudio
- Hidrología superficial
- Clima actual y futuro
- Demanda de agua actual y futura
- Parametrización y calibración del modelo
- Evaluación de situación actual y futura de la disponibilidad de agua

A la hora de generar escenarios se considerará:

- La instalación en los próximos años de una planta de producción de pasta de celulosa con capacidad 2.000.000 de toneladas por año.
- Cambios en el uso del suelo en la cuenca, por la plantación de eucaliptus para su abastecimiento.
- Los efectos producidos por la variabilidad introducida como consecuencia en el cambio climático.

1.6 Descripción general de la cuenca

La extensión de la cuenca del Río Negro se ha calculado en 75.000 km². Este curso fluvial tiene la particularidad de dividir al Uruguay en dos regiones, definiendo típicamente el Norte y el Sur del país. La longitud del cauce principal es de 750 km, naciendo en territorio brasilero, para posteriormente recorrer el Uruguay de este a oeste y, finalmente, desembocar en el Río Uruguay. En su recorrido el río se caracteriza por numerosos meandros, y sus principales afluentes son el Río Tacuarembó y Río Yi.

La subcuenca en estudio, que se muestra en la Figura 1 pertenece a la denominada cuenca alta del Río Negro, y se distingue del resto de la cuenca por ser el área de captación que vierte sus aguas a cabecera del embalse Gabriel Terra. Esto sucede donde desemboca el Río Tacuarembó en el Río Negro, con un área total de drenaje que ha de estimarse en 30.000 km².

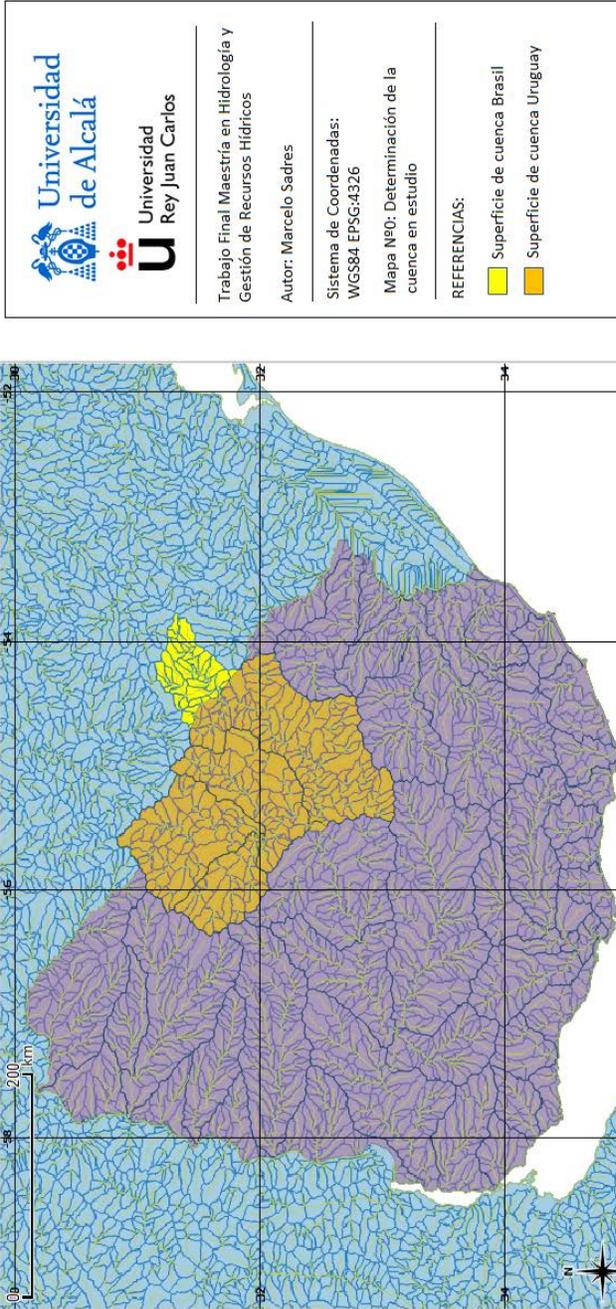


Figura 1. Delimitación de la cuenca en estudio.

1.6.1 Características topográficas y geológicas

El territorio uruguayo se caracteriza por ser una penillanura suavemente ondulada, cuya altitud media es de 116,7 m. En ningún caso las elevaciones superan los 520 metros sobre el nivel del mar. Al norte, la Cuchilla de Haedo hace de divisoria entre los cursos de agua que drenan hacia el Río Uruguay y los que lo hacen hacia la cuenca del Río Tacuarembó. La Cuchilla Grande localizada al sureste, también define cauces de agua que drenan hacia el Río Negro.

Como se aprecia en la Figura 2, deben considerarse también aportes que suceden en el nacimiento del Río Negro que se encuentran en territorio brasilero, más precisamente en el Estado de Río Grande del Sur, en el denominado nudo orográfico de Santa Tecla. A la porción del río que sucede del lado brasilero se le suele denominar Río Negro Oriental. En esta región también nacen el Río Yaguarón y el Río Santa María que drenan hacia la Laguna Merín y el Río Ibicuí (este es un afluente del Río Uruguay en su nacimiento). Por tanto, a pesar de ser una zona de mayor altitud, la extensión de la cuenca asociada al Río Negro en el territorio brasilero no es tan significativa considerando el desarrollo posterior del cauce.



Figura 2: Alturas topográficas en la región de la cuenca.
Adaptado de <http://es-es.topographic-map.com>

Con respecto a la geología, teniendo en cuenta los aspectos geológicos y de paisaje como rasgos principales, históricamente se ha reconocido en el Uruguay

nueve regiones (Figura 3), de la cuales en la parte la parte alta de la cuenca del Río Negro podemos encontrar las siguientes:

- Región 2: Corresponde al precámbrico moderno, siendo un relieve ondulado fuerte, con elevada pedregosidad y abundancia de suelos superficiales.
- Región 4: Abarca las rocas sedimentarias vinculadas a los depósitos continentales y de borde marino acumuladas desde el devónico anterior hasta el Jurásico. Dominan las areniscas y pelitas, pero existen también otros tipos de rocas sedimentarias.
- Región 5: Estas unidades contienen rocas basálticas del Cretácico tardío y el Paleógeno. Incluye basaltos de grano finos y gruesos, suelos profundos, litosoles, brunosoles, y vertisoles.



*Figura 3: Mapa esquemático de regiones geológicas del Uruguay.
Tomado de Bossi (2007)*

En lo que refiere a la hidrogeología ha de distinguirse en el área de estudio zonas acuíferas en rocas con porosidad por fracturas, acuíferos en sedimentos

consolidados y no consolidados, con porosidad intersticial y buena posibilidad para extraer agua subterránea, y unidades acuíferas improductivas o con baja posibilidad, relacionadas con formaciones ígneas, metamórficas y sedimentarias con escasa capacidad de transmitir agua. Se destaca al oeste de la región analizada la presencia de una zona aflorante del Acuífero Guaraní. (Heinzen et al., 2003).

1.6.2 Usos del suelo

La Figura 4 muestra EL mapa de uso de suelo Del país, donde se puede visualizar e interpretar las actividades fundamentales que ocurren en la cuenca en estudio. Predomina como paisaje la pradera natural para pastoreo de ganado vacuno, con leve presencia de zonas empleadas para el cultivo del arroz (se visualizan en el mapa como cultivos en regadío), forestación, y monte natural o nativo. Las zonas urbanas e industriales, si bien no son de extensión considerable deben tenerse en cuenta al ser zonas de particular presión antrópica. Las únicas ciudades cuya población es mayor a 10.000 personas y que se encuentran en la cuenca en estudio son Tacuarembó y Rivera.

1.6.3 Climatología

La temperatura media anual en la región en estudio se sitúa entre los 17 y 18 °C, con un gradiente incremental de sureste hacia noroeste. Las temperaturas más altas se presentan en enero y febrero pudiendo alcanzar valores de hasta 36°C, y las más bajas ocurren en junio y julio, donde pueden ocurrir temperaturas de algún grado bajo cero. De forma general las precipitaciones anuales varían entre los 1000 y 1500 mm. En términos interanuales el régimen de precipitaciones es muy variable, con cierta alternancia de años húmedos y secos. La evapotranspiración se estima con valores anuales medios que se sitúan en el entorno de 1000 a 1200 mm. Presenta marcada variación estacional, con valores más altos durante el verano, situados entre 160 y 185 mm/mes, y más bajos en invierno, entre 25 y 35 mm/mes (MVOTMA, 2017).

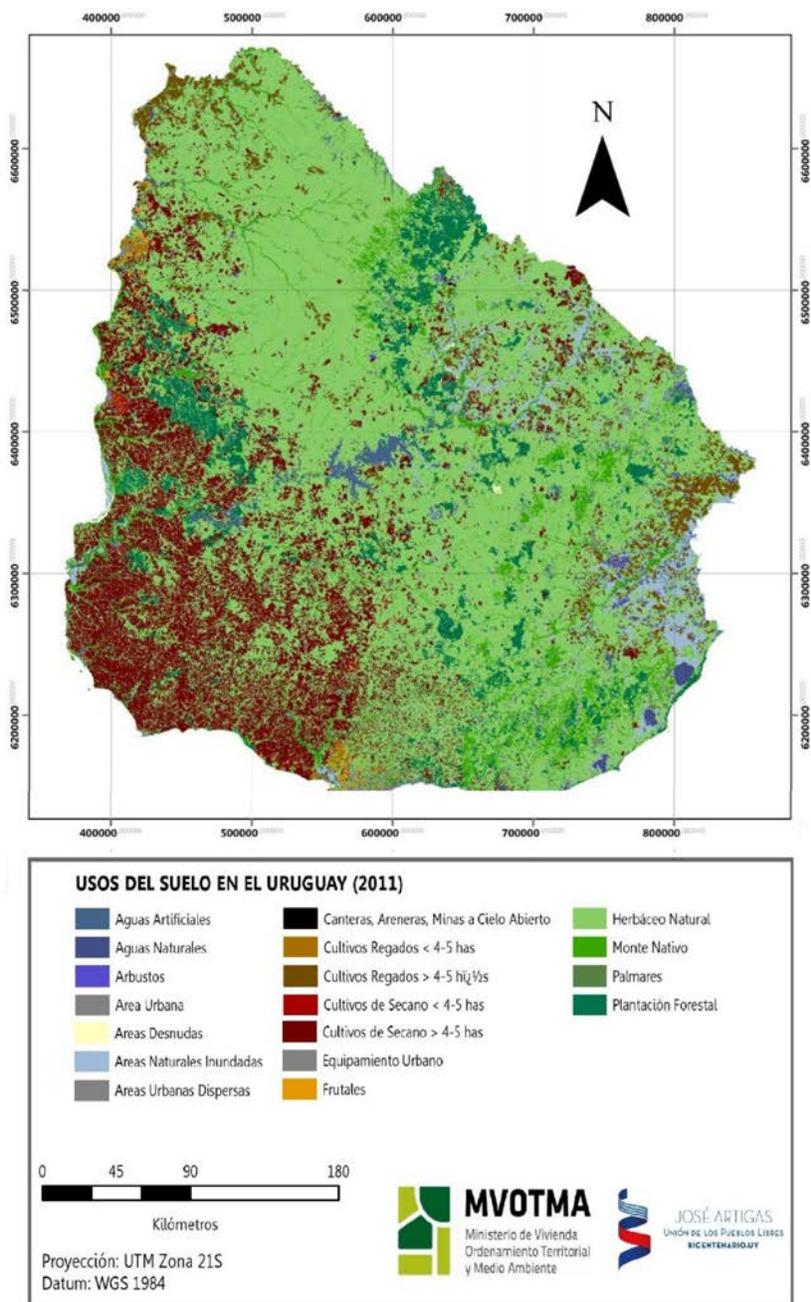


Figura 4: Cobertura del suelo en Uruguay.
Tomado de MVOTMA (2016)

1.6.3 Toma de aguas superficiales

A continuación, se muestran las tomas de aguas superficiales en el área de estudio, considerando la superficie de la cuenca dentro del territorio uruguayo. La Figura 5 señala aquellas que son utilizadas para el suministro de agua potable por la empresa estatal, mientras que la Figura 6 muestra tomas y pequeños embalses empleados para la producción agrícola ganadera, fundamentalmente para el regadío de arroz, y cereales.

1.6.4 Efectos en el ciclo del agua por la implantación de la planta de celulosa

Los efectos en el ciclo hidrológico por la implantación de una planta de producción de pasta de celulosa pueden manifestarse al menos por lo siguiente:

- La propia demanda de agua del emprendimiento productivo, así como la calidad del retorno de sus efluentes.
- El consumo adicional de agua por las nuevas plantaciones de eucaliptus en las adyacencias de la planta, para abastecerla de materia prima.

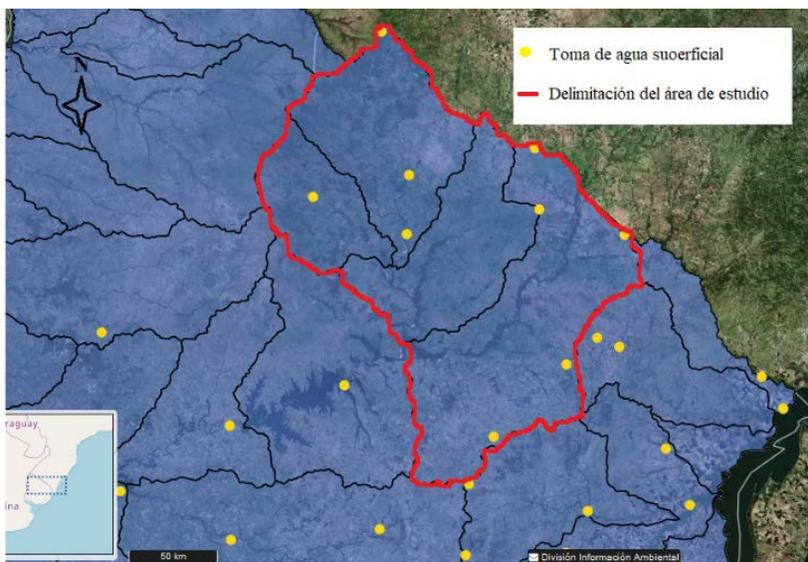


Figura 5: Toma de aguas superficiales para el abastecimiento de agua potable. Adaptado de Sistema de Información Ambiental: <https://www.dinama.gub.uy>

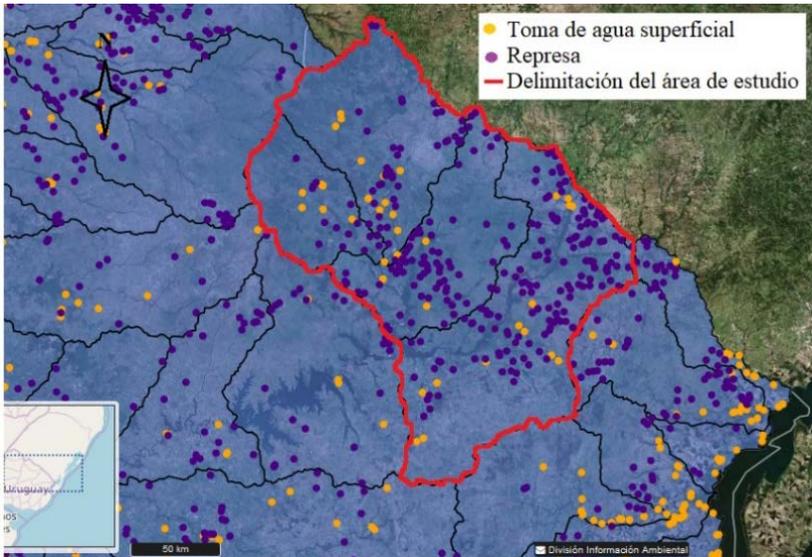


Figura 6: Toma de aguas superficiales para usos distintos al suministro de agua potable. Adaptado de Sistema de Información Ambiental: <https://www.dinama.gub.uy>

En lo que refiere al primer punto en el Documento de Viabilidad Ambiental de Localización presentado por la empresa y de carácter público, se menciona que la planta tomará en promedio 125.000 m³/día de agua bruta. Así mismo mencionan que la planta se instalará aguas debajo del embalse Gabriel Tierra, y a través del efecto regulador del mismo se le asegura a la industria el caudal requerido para los procesos industriales.

En lo que refiere a las plantaciones de eucaliptus este mismo documento indica, que como consecuencia del proyecto se ha de aumentar el área forestada en el entorno de 60.000 a 90.000 hectáreas en sus cercanías.

1.7 Marco Reglamentario sobre caudales ambientales

A través del Decreto 368/018 del 13 de noviembre de 2018 (Diario Oficial, 2018) se reglamenta el caudal ambiental que los distintos usos de las aguas deben observar, estableciendo la cantidad y calidad de las aguas necesarias para sostener

los valores del ecosistema y el bienestar humano, siendo prioritario asegurar el adecuado abastecimiento de agua potable a poblaciones.

El decreto en su artículo tercero indica que se entenderá por caudal ambiental, el régimen hidrológico de un cuerpo o curso de agua o sus tramos, necesario para sostener la estructura y funcionamiento de los ecosistemas correspondientes y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos asociados en la cuenca. Sobre cómo se determinarán estos caudales, el Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente indica que se debe determinar los caudales ambientales por cuenca hidrográfica a partir de estudios, para lo cual tendrá el plazo de un año a partir de la publicación del decreto, así como establecer las guías metodológicas para la determinación, aplicación, control y monitoreo de caudales ambientales en las distintas cuencas.

Mientras esa determinación no sea realizada y de acuerdo al artículo 5, para los cursos o cuerpos de aguas superficiales y permanentes o para tramos de estos, se determinará provisoriamente un caudal ambiental para cada mes del año, según una estadística hidrológica de al menos 20 años de observaciones, considerando:

a) Para las obras de embalse, el caudal con 60% de probabilidad de excedencia (frecuencia absoluta acumulada) en el mes correspondiente.

b) Para las tomas de agua, el caudal con 80% de probabilidad de excedencia (frecuencia absoluta acumulada) en el mes correspondiente.

Asimismo, cuando para un curso o cuerpo de agua superficial determinado no se disponga de información suficiente para aplicar la estadística hidrológica referida, el caudal ambiental se calculará utilizando un modelo de balance hídrico de precipitación-escorrentía.

2 Materiales y Métodos

2.1 Funcionamiento del Sistema Hydro-BID

La Figura 7 muestra una representación esquemática del Sistema integrado Hydro-BID para una simulación cuantitativa de hidrología y cambio climático. El

Sistema se construye sobre la Base de datos de Hidrología Analítica (AHD) para las regiones de América Latina y el Caribe.

El Sistema aplica el modelo standard Factor de Carga de Cauces Generalizados - (GWLF, por sus siglas en inglés) en conjunto con una metodología de tiempo de retardo-enrutamiento (lag-routing). La salida se genera como una serie de tiempo de proyecciones de flujos de agua, en escala diaria o mensual.

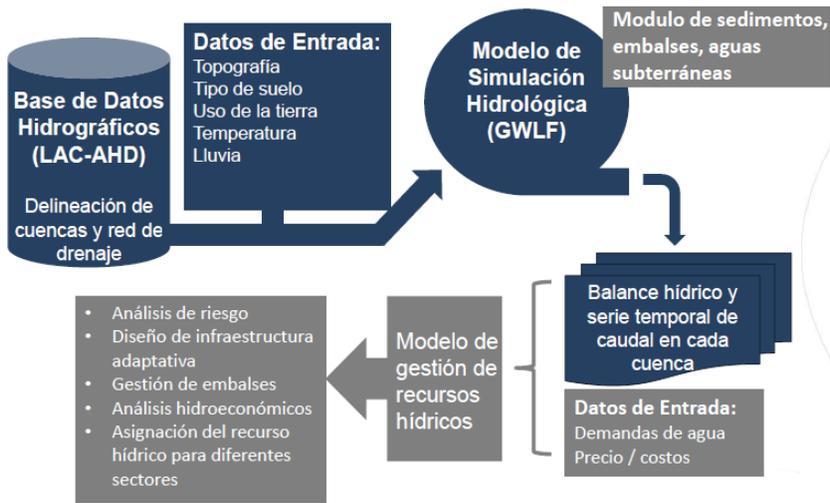


Figura 7: Representación esquemática del funcionamiento de Hydro-BID. Tomado de BID (2014a)

El modelo de precipitación-escorrentía componente de GWLF toma en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca. La respuesta a cada uso de tierra en una cuenca dada es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD. Los impactos del cambio climático en recursos hídricos pueden ser simulados en escalas tan pequeñas como una cuenca individual AHD o a través de todas las áreas de captación de una cuenca entera. La Figura 8 es una representación conceptual de una cuenca de captación con capas de suelo saturadas y no saturadas tal como se utiliza en GWLF.

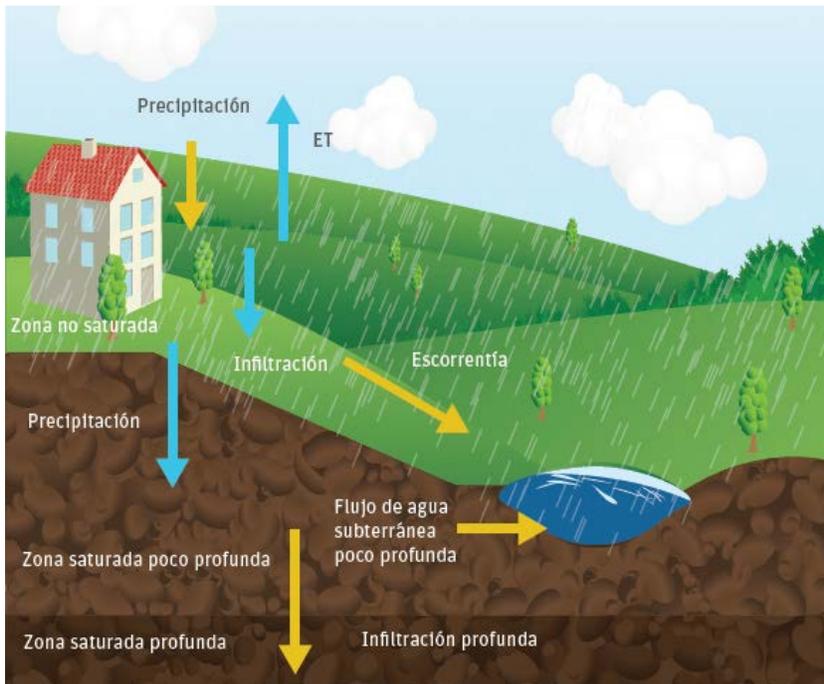


Figura 8: Representación conceptual del modelo que utiliza el GWLF. Tomado de BID (2014b)

El modelo calcula la escurrentía y los flujos base por cuenca de captación. La escurrentía se produce cuando se da exceso de infiltración debido a la saturación del suelo con existencia suficiente de precipitación.

Tras tomar en cuenta la escurrentía proveniente de las precipitaciones, toda agua que excede un volumen calculado de evaporación se infiltra a la capa no saturada. Con el tiempo, el agua infiltrada pasa desde la capa no saturada hacia abajo para reponer el volumen almacenado de la capa saturada. El agua de la capa saturada entra en el canal de corriente como flujo de base donde se combina con la escurrentía de la cuenca y otros flujos de entrada tanto los sub-superficiales como provenientes de las cuencas de aguas arriba para proporcionar el volumen de flujo de corriente para el día. Cabe destacar que la capa saturada, o agua disponible como flujo de base, puede agotarse por medio de la filtración a un acuífero subterráneo más profundo.

2.2 Cálculos del Modelo del GWLF

Esta sección describe las ecuaciones que se utilizan para calcular cada componente del modelo; evapotranspiración potencial, escorrentía, percolación, flujo y tránsito.

2.2.1 Evapotranspiración potencial

El GWLF utiliza el método de estimación de la evapotranspiración potencial (PET) desarrollado por Hamon (1963), que utiliza la temperatura media y el número de horas de luz diaria, de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$PET_t = \frac{0.021 H_t^2 e_t}{T_t + 273}$$

Donde H_t es el número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día t , e_t es la presión de vapor de agua en saturación en milibares en el día t y T_t es la temperatura en el día t expresada en grados Celsius. La presión de vapor de agua y el número total de horas de luz solar se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$e_t = 33.8639 [(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316]$$

$$H_t = \frac{2 * \cos^{-1}[-\tan \delta + \tan \Phi]}{\omega}$$

Aquí δ es la declinación solar en radianes Φ es la latitud geográfica en radianes ω es la rotación angular de la tierra.

La PET se ajusta entonces en base al uso de tierras/suelos y condiciones de la cobertura utilizando un factor de cobertura.

$$PET_{adj,t} = CV * PET_t$$

Siendo CV el factor de cobertura que dependen de la cobertura vegetal y de cultivos. La evapotranspiración real es calculada de la PET de cobertura ajustada, pero está limitada por la disponibilidad de agua en la humedad del suelo.

2.2.2 Escorrentía

La escorrentía superficial generada por la lluvia se calcula usando la ecuación del número de curva del U. S. Soil Conservation Service:

$$RO_t = \left(\frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$$

Donde RO_t es la escorrentía en cm, R_t es la lluvia y D_t el parámetro de detención calculado como sigue:

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$$

CN_t es el número de curva asignado por uso de suelo y ajustado cada día. Los números de curva son asignados a cada categoría individual de uso de suelos y al grupo hidrológico del suelo correspondiente considerado en el modelo. Por ejemplo, los usos de las tierras de áreas de bosques que están sobre suelos de buen drenaje tendrán un número de curva diferente que el mismo uso de tierras que las que lo hacen sobre suelos de pobre drenaje. Aunque los números de curva están pre-establecidos dentro del modelo antes de su ejecución, cada día el número de curva para un uso de tierras y grupo de suelos es modificado en base a la condición de humedad antecedente del suelo.

2.2.2 Percolación

Se calculan los balances diarios de agua dentro de ambos compartimientos del suelo. La ecuación para la capa no saturada es como sigue:

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$$

En forma similar, el balance de agua para el área saturada se calcula como:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$$

En la ecuación anterior, U_t y S_t son las humedades del suelo de las zonas no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día t , y Q_t , E_t , P_t , G_t y D_t son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el arroyo (i.e., flujo base), y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo U^* (cm):

$$P_t = \text{Max} (0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*))$$

La capacidad de agua del suelo U^* tiene que ser definida como una característica de la capa de suelo no saturada. Este parámetro puede estimarse a partir de esta propiedad del suelo.

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada:

$$E_t = \text{Min} (CV_t * PET_t, (U_t + R_t + M_t - Q_t))$$

La zona saturada poca profunda es simulada como un embalse lineal simple. El flujo/volumen de agua subterránea y la infiltración profunda se calculan de la manera siguiente:

$$G_t = rS_t$$

$$D_t = sS_t$$

donde r y s son las constantes de recesión de agua subterránea y de percolación, respectivamente (día^{-1}).

2.2.3 Flujo

El flujo total generado por la cuenca de captación, F_t , es la suma de la escorrentía (RO_t) y del flujo de agua subterránea (G_t).

$$F_t = RO_t + G_t$$

2.3 Recopilación de los datos

2.3.1 Número de Curva

Se requieren dos conjuntos de datos para establecer el Número de Curva: el uso del suelo y los datos de las propiedades hidrológicas de los suelos.

2.3.2 Datos de cobertura del suelo

Los datos de la cobertura terrestre dividen la superficie en diferentes tipos de coberturas. La cobertura terrestre en cada celda (grid) se indexa a las cuencas de la AHD para proveer el área, de acuerdo a los 24 tipos en que se clasifican. Los datos

usados se obtienen del United States Geological Survey (USGS) caracterización Global de tierras, y vienen en la base de datos proporcionada por Hydro-BID.

2.3.3 Datos de tipo de suelo

Los datos que se utilizan se obtienen de la Base de Datos Mundial de Suelos Armonizada (HWSD), por sus siglas en inglés. Esta contiene información actualizada de suelos, con la escala 1:5.000.000 del Mapa Digital Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación- Organización de la Naciones Unidas para la educación la ciencia y la cultura). La capa de los datos del suelo se sobrepone a las cuencas de la AHD para determinar el tipo de suelo dominante en la cuenca. Entonces, el tipo de suelo dominante se clasifica con un grupo hidrológico de suelo basado en la clasificación del United States Department of Agriculture (USDA) lo que determina la propiedad de drenaje del suelo. Hay cuatro tipos de grupos hidrológicos de suelos: A, B, C y D. El tipo A corresponde al suelo con alta filtración y el tipo D corresponde a suelos con pobre filtración y por lo tanto con tasas de filtración bajas. Los tipos B y C son clases intermedias. Esta información también se incorpora en la base de datos que ofrece Hydro-BID.

2.3.4 Datos de Precipitaciones y Temperaturas

El proceso de calibración y validación del modelo requiere de una serie temporal y completa de precipitaciones y temperaturas media diarias para cada subcuenca en la que se va a correr el modelo. Esto se consigue a través de la herramienta que incorpora el software y que se denomina "*Climate Data Interpolation*". Con la misma y a partir de un número de mediciones, en estaciones situadas en la cuenca o en su cercanía, se determina la temperatura y precipitación en cada subcuenca lo que permite calcular el aporte por precipitación y la evapotranspiración.

La Tabla 1, a continuación, resume los datos climatológicos empleados y su fuente.

2.3.5 Datos de caudales

El proceso de calibración y validación del modelo requiere de una serie temporal y completa de caudales, lo que permitirá comparar los resultados obtenidos con el

modelo con los observados. Los datos fueron facilitados por la empresa pública que gestiona las represas de generación hidroeléctrica en el río (www.ute.com.uy).

Considerando que existen intervalos temporales o días en que no existe la medida se ha adoptado el siguiente el criterio para los procesos de calibración y validación:

- Considerar la serie temporal en la que se cuenta con mayor cantidad de datos, de manera continua, para calibrar el modelo.
- Utilizar otros intervalos temporales en los que se cuenta con datos, a efectos de validar los resultados de la calibración.

La tabla 2 que se presenta a continuación resume las estaciones que se han utilizado, así como las series continuadas disponibles en cada caso.

Tabla 1: Datos meteorológicos utilizados en el estudio.

Estación	Latitud	Longitud	Tipos de dato	Serie de datos	Fuente
Treinta y Tres	-33.2750	-54.1722	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/06/2009 a 31/12/2018 P:01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Tacuarembó	-31.7089	-55.8267	Temperatura/ Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Salto	-31.2728	-57.8908	Temperatura/ Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	www.inia.uy
Bagé	-30.8424	-55.6131	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/01/1995 a 31/12/2018 P: 01/01/1995 a 31/12/2000 y 01/01/2002 a 31/12/2018	www.inmet.gov.br
Santa Ana	-31.3478	-54.0133	Temperatura/ Precipitaciones	T: 01/01/2003 a 16/12/2013 P: 01/01/2006 a 31/12/2012	www.inmet.gov.br
Tacuarembó	-31.7194	-55.9847	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Rivera	-30.9056	-55.5350	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Melo	-32.3669	-54.1850	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET
Durazno	-33.3503	-56.5003	Precipitaciones	01/01/1995 a 31/12/2018	Informe inédito INUMET

Tabla 2: Estaciones de medición de caudal consideradas en los procesos de calibración y validación del modelo.

Estación	Latitud	Longitud	Intervalos completos mayores a 1 año					
Aguiar	-32.2850	-54.8410	01/10/1995	27/12/1997	08/12/2007	09/02/2011	20/11/2013	26/10/2017
			a	a	a	a	a	a
Laguna I	-32.2504	-55.4221	01/10/1997	21/05/2007	08/03/2010	09/11/2013	05/12/2015	31/12/2018
			01/01/1995	14/04/1998	10/02/2004	29/09/2015	13/10/2017	
M. Díaz	-31.5280	-55.6843	a	a	a	a	a	
			25/01/1998	11/05/2002	25/06/2015	27/11/2016	31/12/2018	
Pereira	-32.4434	-55.2262	05/02/1995	26/10/1998	20/12/2006	31/05/2009		
			a	a	a	a		
			16/10/1998	06/01/2005	16/12/2007	31/12/2014		
			01/01/1995	07/02/1997	05/12/1998	14/01/2002		
			a	a	a	a		
			04/10/1996	22/10/1998	11/12/2000	02/08/2013		

2.4 Calibración del modelo

La calibración de un modelo es el proceso por medio del cual se identifican los valores de los parámetros de este para los cuales la serie de datos simulada se ajusta de mejor manera a la serie de datos observados. Dicho ajuste de los parámetros requeridos por el modelo se basa en un proceso de calibración basado en algún tipo de criterio de exactitud el cual se apoya en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo y puede llevarse a cabo manual o automáticamente. El proceso de calibrar un modelo manualmente, como ha de ser en el caso del uso de Hydro-BID, se realiza por medio de la técnica de ensayo y error, lo cual implica la variación de los parámetros de manera manual y basándose en el criterio y experiencia del modelador.

2.4.1 Parámetros del modelo

La tabla 3 que se muestra a continuación indica los parámetros que utiliza Hydro-BID y que han de tener que ser ajustados en el proceso de calibración del modelo para cada subcuenca considerada. Así mismo se indica el significado de cada uno de ellos, y los valores sugeridos para comenzar el proceso iterativo de prueba y error hasta lograr el ajuste. El objetivo final perseguido con estos ajustes es el de ajustar lo más precisamente los distintos procesos que intervienen en la formación de escorrentía como la evapotranspiración, el almacenamiento de agua del suelo e,

incluso la impermeabilización de manera que simulen adecuadamente la escorrentía final.

Tabla 3: Parámetros utilizado por el software y valores sugeridos para el comienzo del proceso de calibración.

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
Número de Curva	Número de Curva, caracteriza el tipo de suelo y la hidrología	1
AWC	Contenido de Agua Disponible (AWC, por sus siglas en inglés), estima la cantidad de agua que puede almacenar un suelo para ser utilizado por las plantas.	1
Coefficiente R	Coefficiente de Recesión, caracteriza como el agua subterránea cerca de la superficie, contribuye a los caudales de los ríos después de un evento de grandes caudales.	0.01 día ⁻¹
Permeabilidad	Coefficiente de permeabilidad para determinar la infiltración profunda.	0.005 día ⁻¹
Factor de ET de la estación de cultivo	Factor de evapotranspiración durante la estación que se está cultivando. El periodo de cultivo ha de indicarse con anterioridad, en el setup del programa. Indica aumento adicional de las pérdidas por Evapotranspiración.	1
Factor de ET de la estación de latencia	Factor de evapotranspiración cuando no se está cultivando. Indica una disminución adicional de las pérdidas por Evapotranspiración.	1
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable en % de la cuenca.	2%

2.4.2 Medidas de bondad del ajuste

Coefficiente de Calibración (r): Expresa la dependencia lineal entre dos variables, en este caso los caudales observados y simulados. Se formula como:

$$r = \frac{S_{obs, sim}}{\sqrt{S_{obs} S_{sim}}}$$

Donde $S_{obs, sim}$ es la covarianza sin sesgo entre los caudales observados y simulados:

$$S_{obs, sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})$$

S_{obs} y S_{sim} son las varianzas sin sesgo de los caudales observados y simulados respectivamente:

$$s_{obs} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2$$

$$s_{sim} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2$$

Los valores con barras representan valores medios y n es el número de datos simulados. El coeficiente de correlación toma valores entre 0 y 1, siendo a mayor valor mejor el ajuste.

Eficiencia de Nash-Sutcliffe: Se define de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la tabla 4.

Tabla 4: Valores de referencia para el criterio de Nash-Sutcliffe

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2 - 0.4	Satisfactorio
0.4 - 0.6	Bueno
0.6 - 0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Volumen del error (%): Al correr el modelo en el output se indica el porcentaje de error, entre el volumen total calculado por el modelo, y el observado en el periodo considerado. De manera general ha de aceptarse el modelo cuando este se encuentre en el rango +/- 20-40 %.

De igual manera el observar y analizar el porcentaje de error en el volumen total que se muestra en el output tanto anual como mensual, permite conocer si la incidencia de los errores se da de mayor manera en años secos o húmedos, durante la temporada del cultivo o el periodo de latencia, por ejemplo.

Análisis de las herramientas gráficas del output: El software incorpora herramientas gráficas útiles, que permiten ir determinando si nos estamos acercando

a un buen ajuste durante el proceso de calibración. Mediante el gráfico de series temporales se visualiza el caudal diario total para la simulación y los datos observados a lo largo del tiempo. La curva de duración de caudales ilustra el porcentaje de tiempo en que un determinado caudal es excedido para el modelo y los datos observados, lo que indica si las mayores diferencias se están dando en caudales altos o bajos. Por último, el programa grafica en un par de ejes el dato observado versus el dato que proporciona el modelo, e indica el mejor ajuste lineal que se puede obtener mediante el método de los mínimos cuadrados.

2.5 Validación del modelo

Hydro-BID no cuenta con una metodología propia capaz de dar solución a la validación del modelo, sino que debe ser el usuario siguiendo una secuencia lógica quien compare los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo, con los observados en la estación de aforo, en un periodo diferente al empleado en la calibración. La validación de los resultados del modelo se hace a través de la simulación del programa, utilizando para los parámetros, los valores obtenidos en la calibración, para lo cual se introduce un registro de precipitación y temperatura de verificación y se compara el hidrograma de salida calculado con el observado para el mismo evento.

2.6 Escenarios climáticos

En la actualidad, se vienen desarrollando modelos de escenario climáticos globales y regionales, en base a suposiciones de emisiones futuras, tasas de deforestación, etc. En relación con las temperaturas la mayoría de los modelos coinciden con una tendencia a que se incremente. En el caso de la lluvia el nivel de incertidumbre es mayor, existen regiones en el mundo que, si bien la mayoría de los modelos coinciden en cuanto a la dirección del cambio esperado, los mismos presentan mucha divergencia en cuanto a la magnitud del fenómeno. En el caso de Uruguay la mayoría de los escenarios sostienen un incremento en las lluvias, fundamentalmente en los meses de primavera y verano.

La información utilizada en este análisis ha sido obtenida del documento elaborado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria del Uruguay, denominado "Cambio Climático del Uruguay, posibles impactos y medidas de adaptación en el sector agropecuario" (INIA, 2009). Se indica que las estimaciones se han realizado en base al ensamble de cuatro modelos climáticos globales (HADCM3, ECHAM4, CSIRO-mk2 y GFDL-R30), forzados con los escenarios socioeconómicos alto y medio, fijados por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático para los escenarios 2020 y 2050, y que se denominan A y B respectivamente. La siguiente tabla resume los resultados a los que llega el análisis para la cuenca en estudio.

Tabla 5: Escenario climáticos en la cuenca de estudio. Elaborado a partir de datos de INIA (2009)

Escenario	A		B	
Año	2020	2050	2020	2050
Temperatura °C	+0.4	+1.3	+0.3	+1.2
Precipitación	+3%	+ 6%	+2%	+5%

A la hora de evaluar cómo se afectará la disponibilidad del recurso como consecuencia del cambio climáticos se considerarán en este trabajo dos escenarios, buscando ser conservador en el análisis y teniendo en cuenta la incertidumbre en las estimaciones, sobre todo cuando se refiere a precipitaciones:

1. Escenario 1: Coincide con el escenario B considerando un incremento en la temperatura media de 1,2 °C y un incremento en las precipitaciones del 5%.
2. Escenario 2; más restrictivo: Considera un incremento en la temperatura media de 1,3 °C, sin que ocurra un incremento de las precipitaciones observadas en la cuenca. Con este escenario se busca conocer la vulnerabilidad de la cuenca a la variabilidad climática.

3 Resultados

3.1 Subcuenca Estación Aguiar

La estación de medición de caudal Aguiar se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Negro, en territorio uruguayo, en la cuenca que se identifica con el COMID 316556000. El área de captación es de 8.044 km². La Figura 9 muestra el área

implicada de captación, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

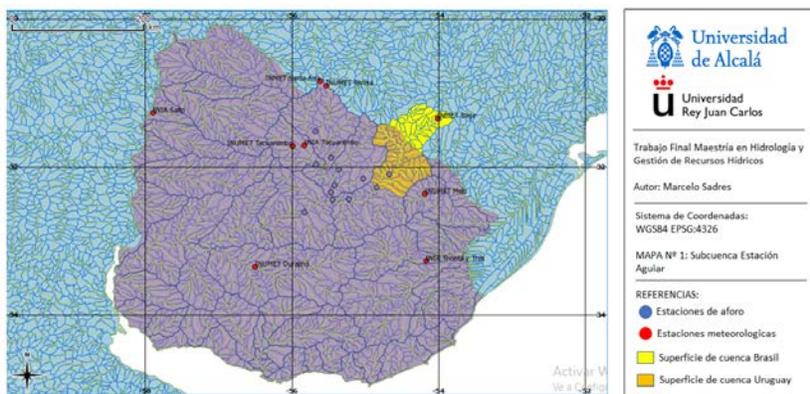


Figura 9: Área de captación subcuenca Estación Aguilar.

3.1.1 Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 27/12/1997 a 21/05/2007, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores:

- Número de Curva: 0.47
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.95
- Infiltración: 0.0635
- Infiltración profunda: 0.0235
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.0
- Evapotranspiración en la fase de latencia: 1.0
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): 3.4
- Correlación r: 0.75
- Correlación del modelo: 0.65
- Nash Efficiency: 0.54

A continuación, en la Figura 10 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 11 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo.

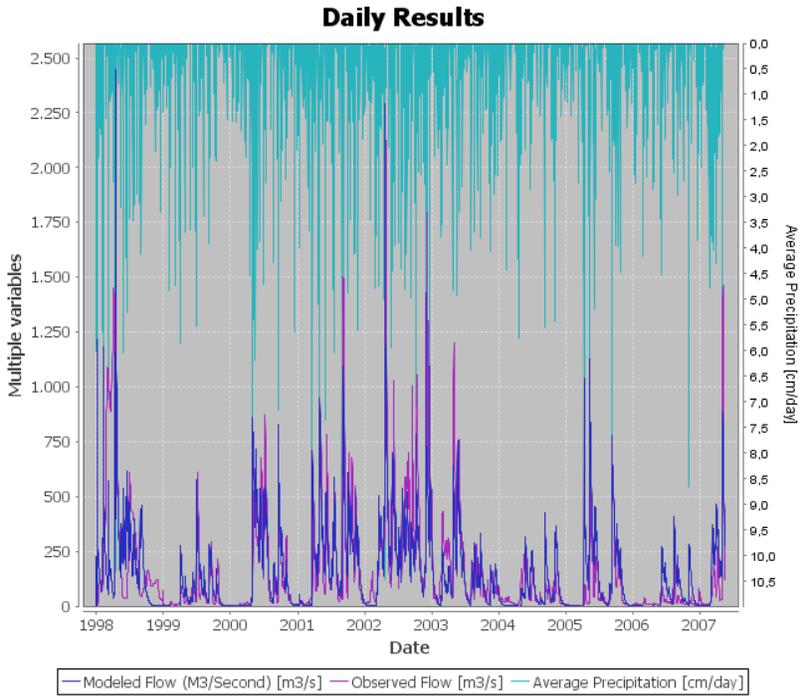


Figura 10: Series temporales de caudales para la calibración de Subcuenca Estación Aguilar.

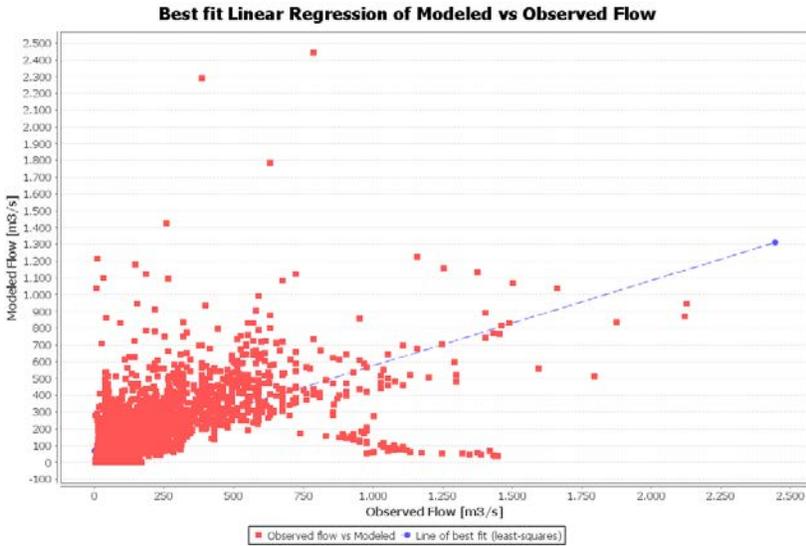


Figura 11: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Aguilar.

3.1.2 Validación

La validación se realizó utilizando los periodos 08/12/2007 a 08/03/2010 y 20/11/2013 a 05/12/2015 (validación 1 y 2 respectivamente), empleando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración (Tabla 6).

Tabla 6: Estadísticos obtenidos en el proceso de validación de la subcuenca Aguiar

Estadístico	Validación 1	Validación 2
Volumen de error %	-0.15	-35.68
Correlación r	0.79	0.73
Correlación del modelo	0.68	0.54
Nash Efficiency	0.63	0.47

La Figura 12 muestra los gráficos de series temporales de caudales y la 13 los de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para ambas validaciones.

3.2 Subcuenca Estación Pereira

La estación de medición de caudal Pereira (11.621 km²) se ubica en la cuenca del Río Negro próximo a cabecera del embalse Gabriel Terra. Está en la subcuenca que se identifica con el COMID 316589800. Pertenece a ella la subcuenca que vierte a la Estación Aguiar. La Figura 14 muestra el área implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

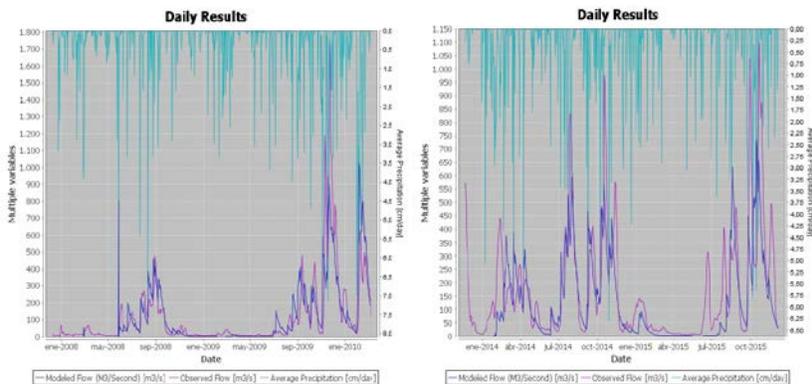


Figura 12: Gráfico de series temporales de caudales para la validación de subcuenca Estación Aguiar (Izq. Validación 1, Der. Validación 2).

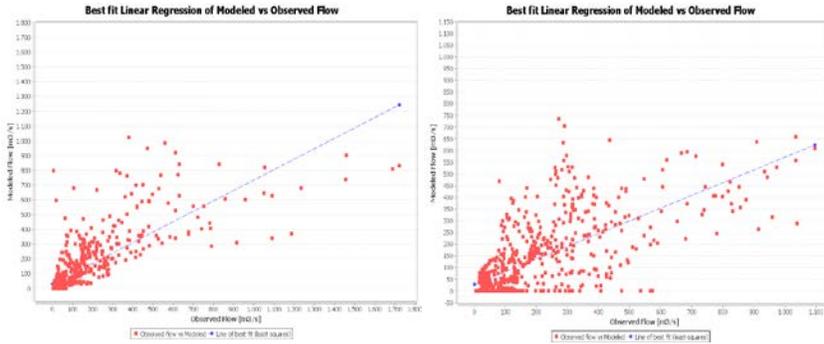


Figura 13: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal validación de la subcuenca Estación Aguiar (Izq. Validación 1, Der. Validación 2).

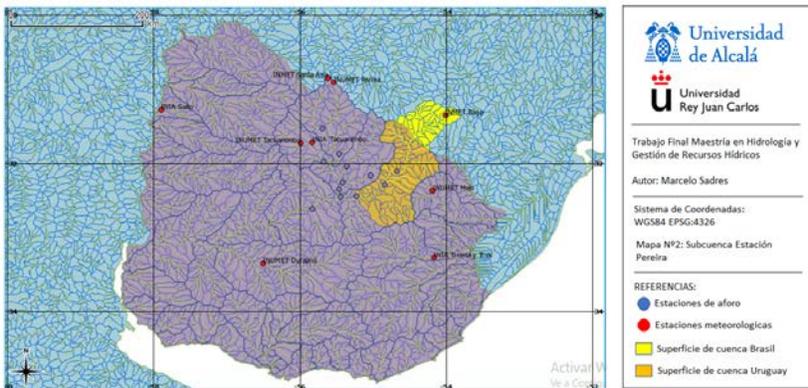


Figura 14: Área de captación subcuenca Estación Pereira.

3.2.1 Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 14/01/2002 a 01/08/2013, obteniéndose los siguientes valores:

- Número de curva: 0.35
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.84
- Infiltración: 0.0900
- Infiltración profunda: 0.0580
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.7
- Evapotranspiración en la fase de latencia: 1.0
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): 1.77

- Correlación r: 0.70
- Correlación del modelo: 0.56
- Nash Efficiency: 0.48

En la figura 15 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 16 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados.

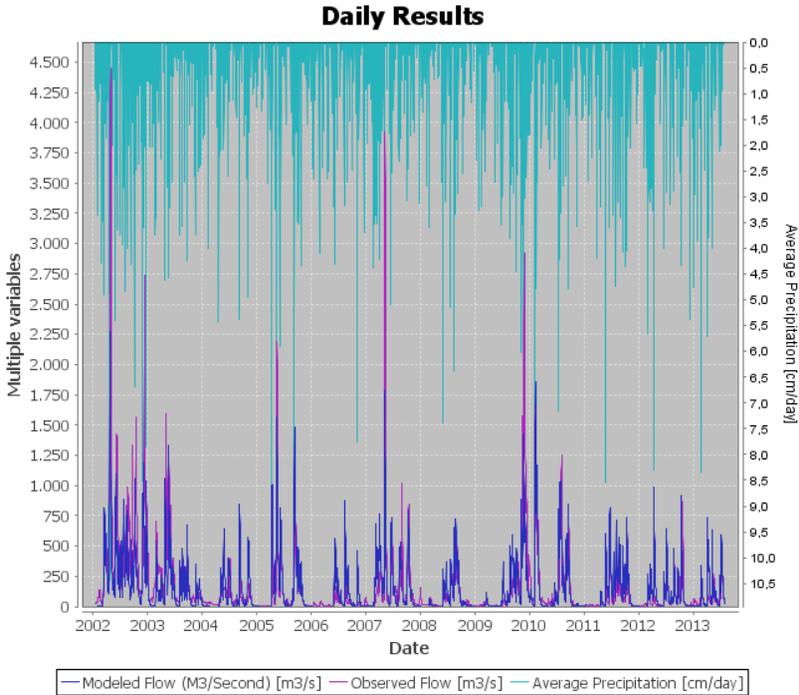


Figura 15: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Pereira

3.2.2 Validación

La validación se realizó para el período 05/12/1998 a 11/12/2000, utilizando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Volumen de error (%): -14.14
- Correlación r: 0.80
- Correlación del modelo: 0.69
- Nash Efficiency: 0.63

La Figura 17 muestra las series temporales de caudales y el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para la validación.

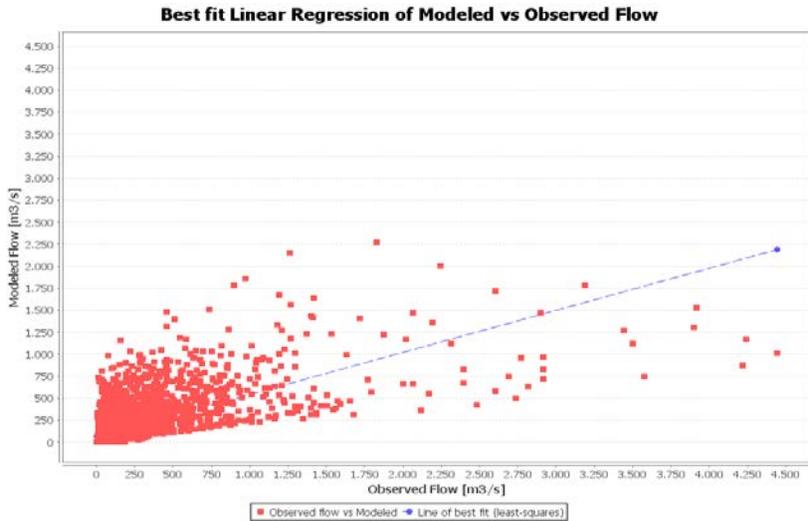


Figura 16: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración la subcuenca Estación Pereira.

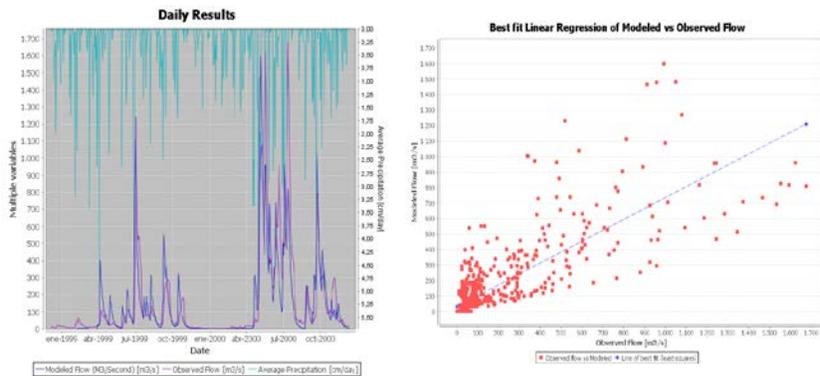


Figura 17: Gráfico de serie temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de la subcuenca Estación Pereira.

3.3 Subcuenca Estación Manuel Díaz

La estación de medición de caudal Manuel Díaz se muestra en la Figura 18 indicando el área de captación implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas.

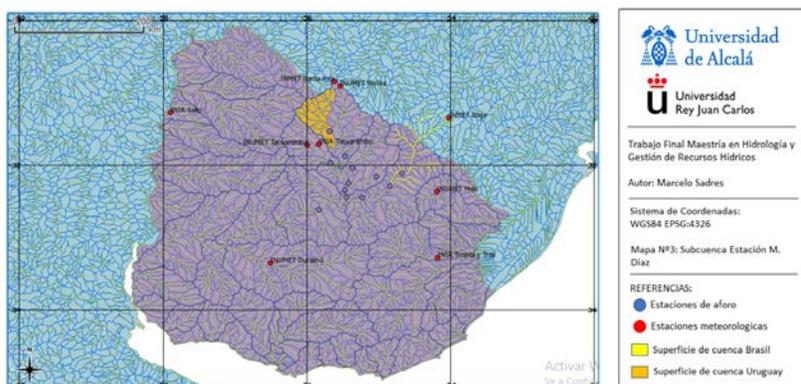


Figura 18: Área de captación subcuenca Estación Manuel Díaz.

La subcuenca se ubica en la parte alta de la cuenca del Río Tacuarembó en la subcuenca que se identifica con el COMID 316414100. El área de captación es de 2.546 km², ubicados por completo en territorio uruguayo.

3.3.1 Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 26/10/1998 a 06/01/2005, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de curva: 0.70
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.60
- Infiltración: 0.0950
- Infiltración profunda: 0.0380
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.3
- Evapotranspiración en la fase de la latencia: 1.1
- Porcentaje de superficie impermeable: 1.0

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): -3.53
- Correlación r: 0.76
- Correlación del modelo: 0.62
- Nash Efficiency: 0.57

A continuación, en la Figura 19 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 20 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados.

Daily Results

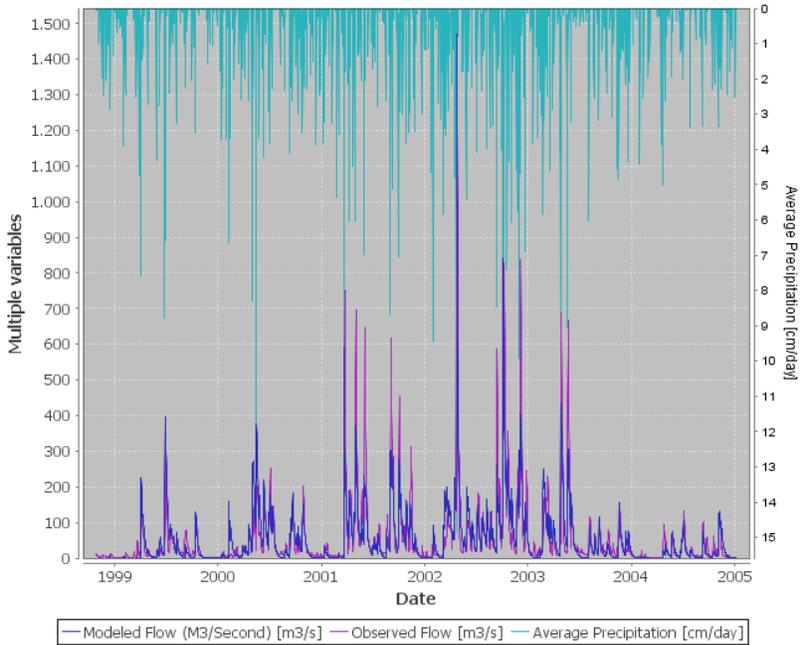


Figura 19: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Manuel Díaz.

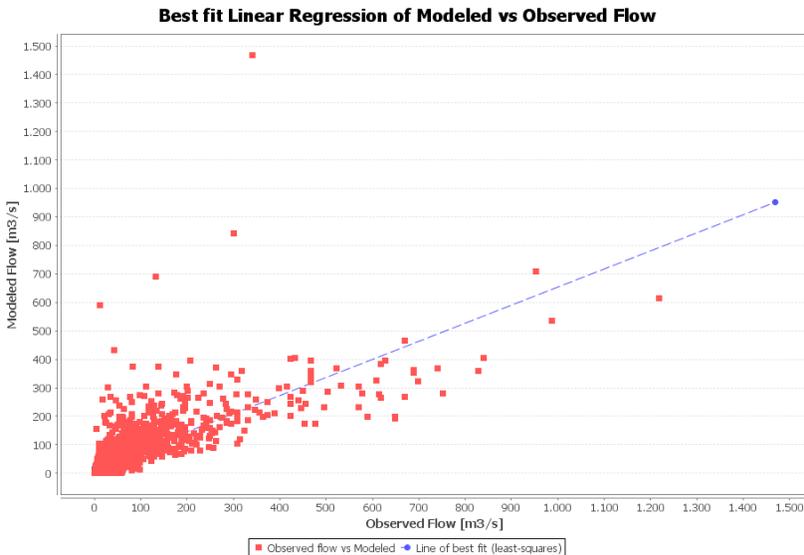


Figura 20: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Manuel Díaz.

3.3.2 Validación

La validación se realizó para el período 31/05/2009 a 3/12/2014, utilizando como valor de los parámetros los hallados en el proceso de calibración. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- Volumen de error (%): 33.48
- Correlación r: 0.76
- Correlación del modelo: 0.70
- Nash Efficiency: 0.54

A continuación, en la Figura 21 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para la validación.

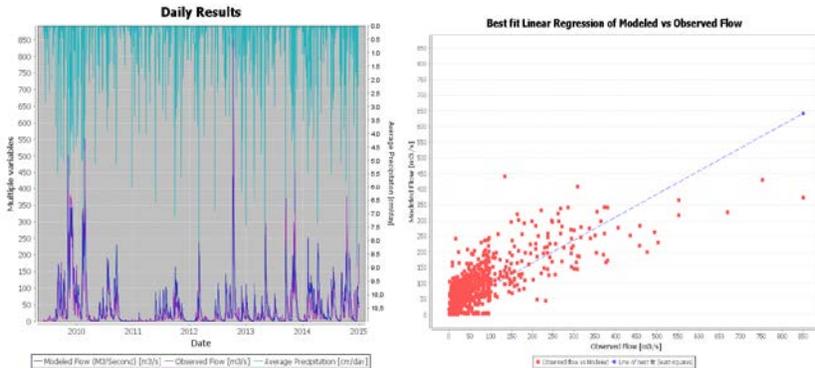


Figura 21: Gráfico de serie temporales de caudales y de mejor ajuste de regresión lineal para la validación de la subcuenca Estación Manuel Díaz.

3.4 Subcuenca Estación Laguna I

La estación de medición de caudal Laguna I se ubica en la cuenca del Tacuarembó, luego de que desemboca en este el Río Yaguarí, y próximo a su desembocadura en el Río Negro. Está en la cuenca de drenaje que se identifica con el COMID 316541900. El área de captación de la subcuenca es de 13.867 km², perteneciendo a esta también la subcuenca que vierte a la Estación Manuel Díaz. La Figura 22 muestra el área implicada, así como las estaciones meteorológicas consideradas en la calibración-validación.

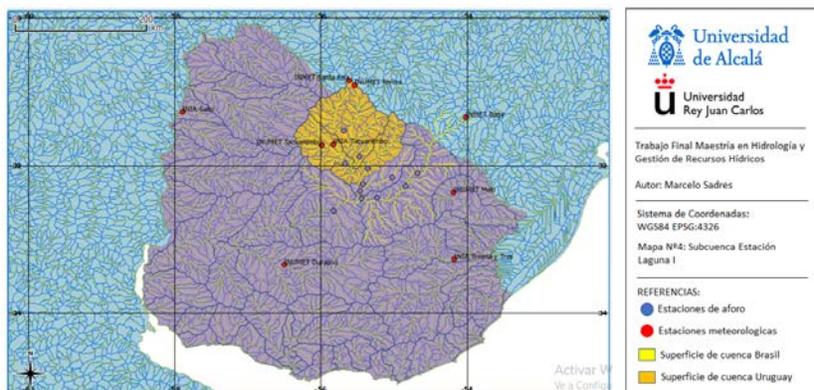


Figura 22: Área de captación subcuenca Estación Laguna I.

3.4.1 Calibración

La calibración se realizó considerando el intervalo 10/02/2004 a 25/06/2015, por ser la serie temporal de la que se cuenta con mayor continuidad de datos de medidas de caudal, obteniéndose los siguientes valores

- Número de curva: 0.30
- Contenido de agua disponible en el suelo: 0.20
- Infiltración: 0.0720
- Infiltración profunda: 0.0630
- Evapotranspiración en la fase del cultivo: 1.3
- Evapotranspiración en la fase de la latencia: 1.2
- Porcentaje de superficie impermeable: 0.5

y los siguientes estadísticos:

- Volumen de error (%): -0.7
- Correlación r: 0.74
- Correlación del modelo: 0.65
- Nash Efficiency: 0.53

A continuación, en la Figura 23 se muestra el gráfico de series temporales de caudales y en la 24 el de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados.

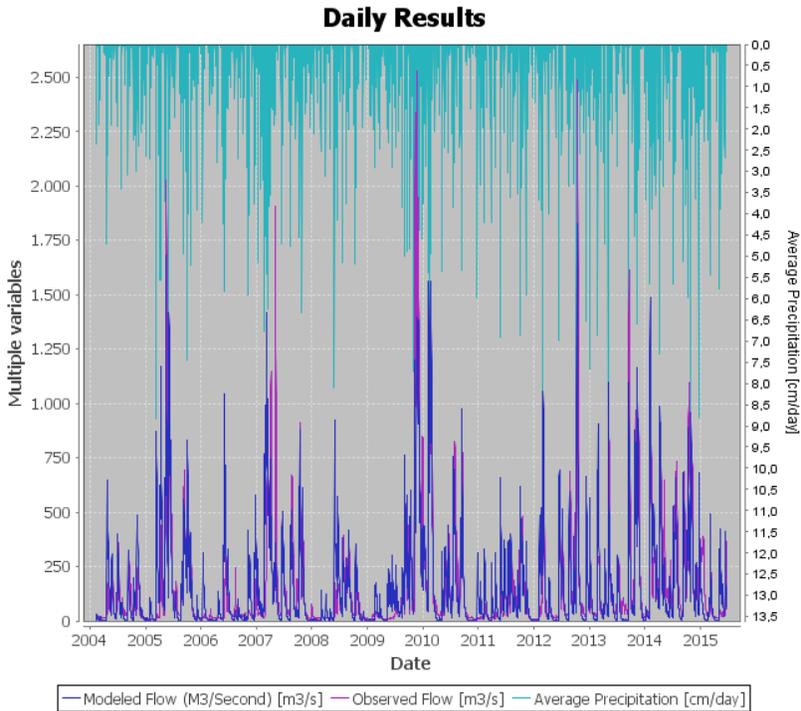


Figura 23: Gráfico de series temporales de caudales para la calibración de subcuenca Estación Laguna I.

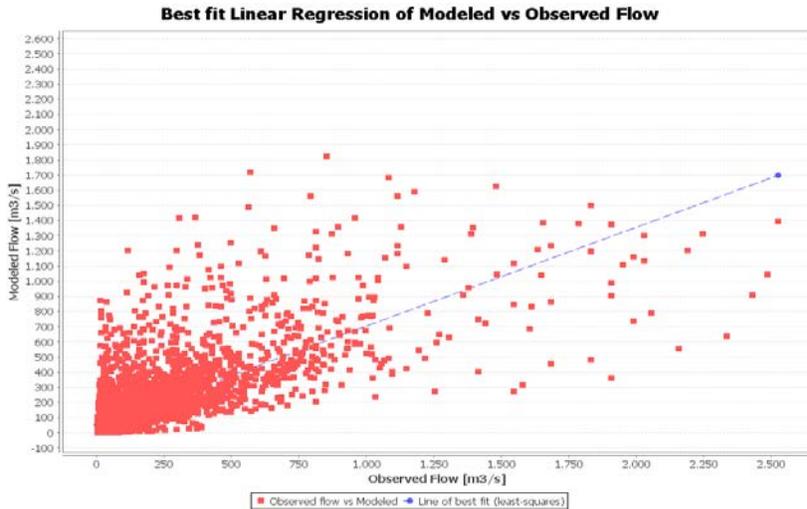


Figura 24: Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal para la calibración de subcuenca Estación Laguna I.

3.4.2 Validación

La validación, realizada para los periodos 14/04/1998 a 11/05/2002 y 01/01/1995 a 24/01/1998 (se identificarán como validación 1 y 2 respectivamente). Los resultados se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Estadísticos obtenidos en el proceso de validación de la subcuenca Laguna I.

Estadístico	Validación 1	Validación 2
Volumen de error %	-18.5	-25.24
Correlación r	0.73	0.67
Correlación del modelo	0.50	0.44
Nash Efficiency	0.52	0.43

En la Figura 25 se muestra los gráficos de series temporales de caudales y en la 26 los de mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para ambas validaciones.

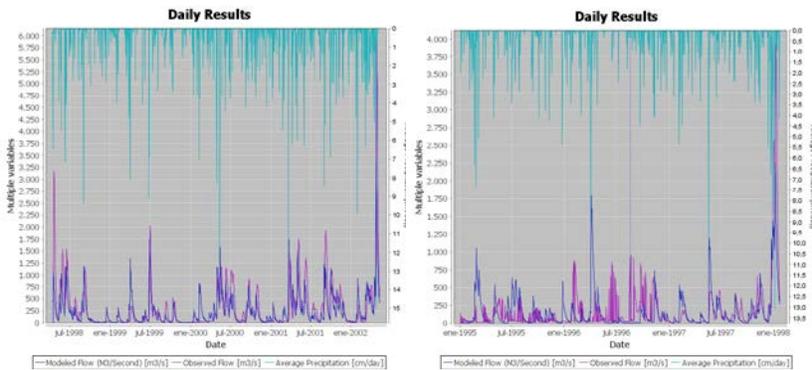


Figura 25: Gráfico de series temporales de caudales para la validación de subcuenca Estación Laguna I (Izq. Validación 1, Der. Validación 2)

3.5 Cálculo de agua no disponible por conservación de caudales ecológicos

El organismo competente aún no ha publicado los caudales ambientales para los cursos de agua estudiados en el trabajo, sin embargo, se cuenta con series históricas de datos en un intervalo mayor a 20 años, por lo que ha de calcularse los mismos de acuerdo con la sugerencia que indica la legislación, es decir teniendo en

cuenta el caudal cuya probabilidad de excedencia es mayor al 60% para cada mes (situación más restrictiva en cuanto a la disponibilidad de agua).

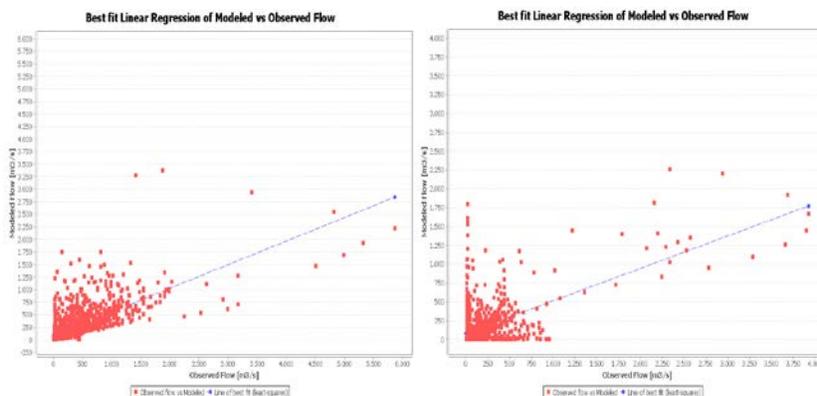


Figura 26: Gráfico mejor ajuste de regresión lineal validación de la subcuenca Estación Laguna I (Izq. Validación 1, Der. Validación 2).

El cálculo se realizó para las estaciones Pereira y Laguna I. Se contabilizó como agua no disponible, al no poder ser utilizada para eventuales captaciones superficiales. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 8.

Tabla 8: Cálculo de agua no disponible por conservación de caudales ecológicos.

Mes	Estación Laguna I			Estación Pereira		
	caudal con 60% de probabilidad de excedencia (m³/s)	m³/d	caudal ambiental m³/mes	caudal con 60% de probabilidad de excedencia (m³/s)	m³/d	caudal ambiental m³/mes
enero	17	1,468,800	45,532,800	7	604,800	18,748,800
febrero	22	1,900,800	53,222,400	14	1,209,600	33,868,800
marzo	22	1,900,800	58,924,800	19	1,641,600	50,889,600
abril	28	2,419,200	72,576,000	19	1,641,600	49,248,000
mayo	48	4,147,200	128,563,200	32	2,764,800	85,708,800
junio	100	8,640,000	259,200,000	63	5,443,200	163,296,000
julio	95	8,208,000	254,448,000	85	7,344,000	227,664,000
agosto	68	5,875,200	182,131,200	73	6,307,200	195,523,200
septiembre	163	14,083,200	422,496,000	99	8,553,600	256,608,000
octubre	100	8,640,000	267,840,000	72	6,220,800	192,844,800
noviembre	48	4,147,200	124,416,000	37	3,196,800	95,904,000
diciembre	19	1,641,600	50,889,600	10	864,000	26,784,000
		Total	1,920.24		Total	1,397.09
		Hm³/año			Hm³/año	

3.6 Simulación de aportes utilizando los escenarios climáticos

Una vez desarrollado el modelo se evalúa como ha de afectar el efecto del cambio climático, en las aportaciones en las estaciones de aforo consideradas. Los escenarios planteados corresponden a los indicados en el apartado de materiales y métodos. La serie climática que se consideró como referencia en la simulación corresponde al período 2004 a 2013, por ser en esta la serie de diez años, donde se contaba con datos meteorológicos de más estaciones.

Los resultados obtenidos en las simulaciones para las cuatro estaciones de aforo se muestran en las Figuras 27 y 28.

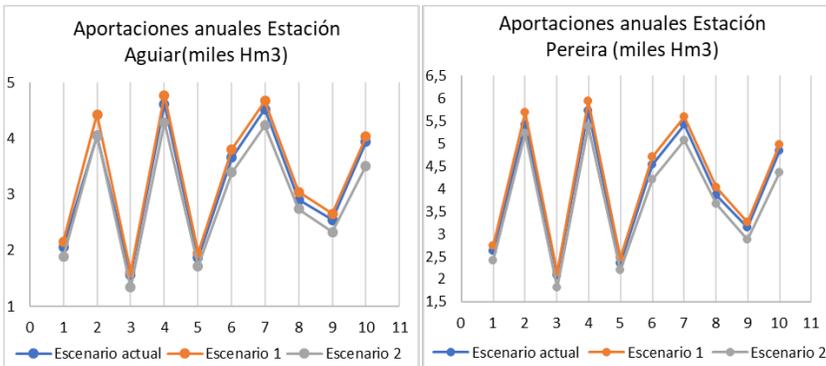


Figura 27: Aportaciones anuales en Estaciones Pereira y Aguiar para los escenarios climáticos.

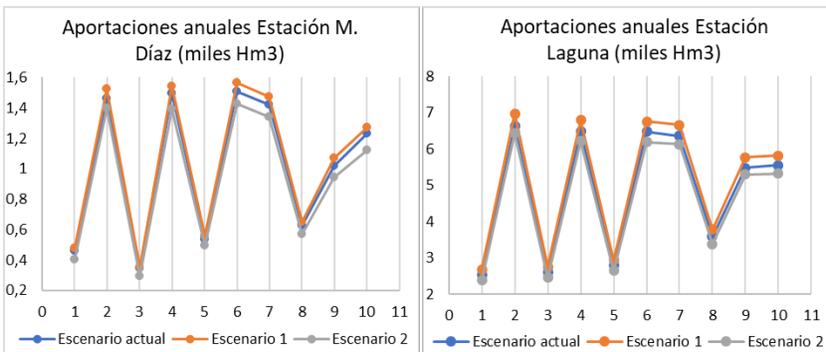


Figura 28: Aportaciones anuales en Estaciones M. Díaz y Laguna I para los escenarios climáticos.

Como se observa, la variabilidad en lo que refiere al rango de caudales máximos y mínimos registrados, está relacionada con el tamaño de la cuenca de captación, siendo mayor cuanto mayor sea esta. La forma de los gráficos que se obtienen son similares entre sí para los casos de las estaciones Aguiar-Pereira, y M. Díaz-Laguna, lo que se puede explicar porque en cada caso el área de drenaje de la segunda estación contiene a la primera, y por tener mayor similitud en las condiciones meteorológicas y características hidrogeológicas.

En la tabla 9 se muestra la variación porcentual en la aportación calculada para un periodo de 10 años en cada una de las estaciones de aforo, respecto al escenario actual.

Tabla 9: Variación en las aportaciones en las estaciones de aforo para los escenarios climáticos.

Estación	Variación en el Escenario 1	Variación en el escenario 2
Aguiar	4.4 %	-7.0 %
Pereira	3.8 %	-7.1 %
M. Díaz	3.8 %	-7.1 %
Laguna	5.0 %	-4.2 %

3.7 Requerimientos de agua para nuevas plantaciones

De acuerdo con Martínez (2013) y luego de tres años de monitoreo (octubre 2006 a setiembre de 2009), donde se hicieron análisis comparativos en Paysandú-Uruguay a nivel de parcela, la evapotranspiración total promedio de la cobertura forestal fue de 1053 mm/año, un 12% más que el correspondiente valor de 940 mm/año en la microcuenca control con pasturas naturales. La precipitación media en este período fue de 1552 mm con alternancia de años húmedos y secos. Vale mencionar que debido a la escasa información que hay en la materia estos datos han sido utilizados por la DINAMA para la toma de decisiones en proyectos de este tipo.

De esta forma se considera el agua incremental que se demandará en las subcuencas Pereira, y Laguna de acuerdo con lo siguiente:

$$\text{Agua adicional requerida} = 1053 \frac{\text{mm}}{\text{año}} - 940 \frac{\text{mm}}{\text{año}} = 113 \frac{\text{mm}}{\text{año}}$$

Considerando como aproximación que en cada subcuenca se emplazarán 45.000 nuevas hectáreas de plantaciones forestales, se obtiene así un valor de agua adicional requerida de 508.500 Hm³/año para cada una de ellas.

4 Discusión de los resultados

4.1 Sobre la calibración del modelo y los parámetros obtenidos

El ajuste de los parámetros se ha realizado con el objetivo de mejorar los indicadores estadísticos, así como mediante la observación de los gráficos que se obtienen, y se dio por completo cuando se entendió que no era posible lograr mejorar las condiciones en que el modelo podría reproducir los valores observados. Hydro-BID utiliza relativamente pocos parámetros para realizar el ajuste del modelo. Por ejemplo, a diferencia de HEC-HMS no tiene un módulo por el cual puedan ingresarse condiciones iniciales en lo que hace a flujo base del río, contenido de agua en el suelo y características del acuífero. Además, desde un comienzo ha sido concebido para que se pueda aplicar en la totalidad del continente americano, más allá de lo heterogéneo de sus características en lo que refiere a condiciones climatológicas, geología, caudales de los ríos, topografía, tipo y uso de suelos, dimensiones de las cuencas. Todo lo anterior ha de indicar que, aun siendo una herramienta potente, ha de tener sus limitaciones que tienen que ser consideradas en un análisis.

Como resultado de la indeterminación en las condiciones iniciales de la cuenca, el programa no considera el primer año de la serie temporal que se modeliza para la determinación de los estadísticos; del mismo modo los valores observados para este año deberíamos considerarlos con cautela en la visualización de los gráficos.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es la sensibilidad en las mediciones del caudal observado. En el caso de los datos de aforo que han de disponerse, la sensibilidad de las medidas está en el orden de 1 m³/s, y esto significará que los errores de las medidas puedan ser considerables cuando se están midiendo caudales menores a 10 m³/s. Este hecho se ha puesto de manifiesto en las curvas de duración de caudales, que indican en escala logarítmica el caudal versus el porcentaje de tiempo que este es excedido. Por debajo de 1 (es decir caudales

menores a $10 \text{ m}^3/\text{s}$), no han de resultar similares las curvas de caudales observados, y la del modelo, y se ha centrado el proceso de calibración en lograr el mejor ajuste de los valores en los caudales mayores.

Habiendo mencionado lo anterior, mediante la calibración en todas las estaciones de aforo se ha conseguido un ajuste de los parámetros, a través de cuya combinación los estadísticos resultan aceptables de acuerdo con los criterios recomendados, y un buen ajuste si se observa el gráfico de series temporales de caudales observados e indicados por el modelo. Se realiza a continuación un análisis sobre el ajuste en cada situación particular:

Estación Aguiar: Se observan algunos valores anómalos que indican caudales considerablemente altos en el modelo con respecto al observado. Así mismo un grupo de valores que habiéndose observado valores de caudal mayores a $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, el modelo calcula caudales bajos. A pesar de lo anterior el ajuste observado en las curvas de serie temporales y los estadísticos obtenidos están significando un buen ajuste.

Estación Pereira: Si bien surge del análisis que el ajuste es bueno, se observa que el modelo en cierta forma subestima los caudales máximos que se obtienen en los períodos de máximas aportaciones. Este efecto se manifiesta cuando los caudales observados superan los $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Al querer corregir esto, por ejemplo, incrementando la escorrentía superficial directa, el porcentaje volumétrico de error se incrementa y se obtienen peores valores en los estadísticos.

Estación Manuel Díaz: Se observan buenos resultados en lo que refiere a los valores estadísticos obtenidos. De la observación de los gráficos surge que la serie de caudales observados tiene mayor cantidad de picos. También se observa un valor de caudal obtenido en el modelo muy por encima de lo observado.

Estación Laguna: En este caso se observa que se ha conseguido el mejor ajuste, a través del valor de los estadísticos, y el análisis del gráfico de series temporales de caudales. A pesar de esto se observa algún desfase menor en la ocurrencia de los picos. En la tabla 10 y para realizar una discusión comparativa de los resultados obtenidos en los distintos puntos de aforo se indican los valores que se obtuvieron de los parámetros.

Tabla 10: Resumen de parámetros obtenidos en la calibración

Parámetro	E. Aguiar	E. Pereira	E. M. Díaz	E. Laguna
Número de Curva	0.47	0.35	0.70	0.30
Contenido de agua disponible en el suelo	0.95	0.84	0.60	0.20
Infiltración	0.0635	0.0900	0.0950	0.0720
Infiltración profunda	0.0235	0.0580	0.0380	0.0630
Evapotranspiración en la fase del cultivo	1.0	1.7	1.3	1.3
Evapotranspiración en la fase de latencia	1.0	1.0	1.1	1.2
Porcentaje de sup. impermeable	1.0	1.0	1.0	0.5

El número de Curva es un parámetro empírico que varía entre 0 y 100 y que se utiliza para estimar la escorrentía superficial luego de un evento de lluvias, considerando las propiedades de drenaje de la cuenca, en función del tipo de suelo, grado de humedad y el uso de este. El ajuste de este parámetro considera un factor multiplicador que corrige el número asignado por Hydro-BID a partir de los datos que incorpora la base de datos. El método ha sido desarrollado para cuencas agrícolas pequeñas de los Estados Unidos, por lo que es de esperar que no sea del todo adecuado en otras circunstancias. De manera general, se observa que se ha tenido que minorar este parámetro. En todo caso, para la Estación de aforo M. Díaz, cuya cuenca de drenaje tiene dimensiones menores el efecto ha sido menos importante. Ha de considerarse además que, de acuerdo con el mapa de usos de suelos, esta región se caracteriza por la producción de arroz. Como se observa en la Figura 7 existen múltiples captaciones de agua superficial, que se derivan a pequeños embalses, o tajamares y que servirán para la inundación de los campos en el período de desarrollo del cultivo. El efecto de esta situación en la escorrentía directa puede ser notable. Como es de esperar esto será más notorio en las estaciones de aforo Pereira y Laguna que tienen un alto nivel de regulación.

El AWC o cantidad de agua disponible en el suelo, representa el volumen de agua que se encuentra en la capa superior del suelo o en la zona de aireación cerca de la superficie del terreno, de forma que puede ser transferida a la atmósfera por evapotranspiración. Esto afectará además a la cantidad de agua que percola a la zona saturada. Es de esperar entonces mayores valores para suelos más

desarrollados. Ha de observarse que los valores obtenidos para las cuencas que drenan a la Estación Pereira y Aguiar, representan valores más altos de este parámetro y así mismo se aprecia un valor especialmente bajo para la Estación Laguna, hecho que intentará explicarse a continuación.

A partir del análisis del mapa de suelos del Uruguay ha de indicarse que las subcuencas Pereira y Aguiar se sitúan fundamentalmente sobre el área de afloramiento del Grupo Gondwana, que corresponde a un conjunto de depósitos sedimentarios de tillitas, lutitas, limolitas y areniscas feldespáticas. Son suelos bien desarrollados, de importancia agronómica capaces de almacenar agua.

Si nos referimos ahora a los suelos de la cuenca que drena a la Estación M. Díaz ha de indicarse que podemos situarlos sobre el Grupo Gondwana y el Batoví Dorado. Los tipos de roca predominante en este último grupo son las areniscas de diferentes granulometrías. En particular si se refiere a la formación Rivera encontraremos arenas eólicas. Por último, en los suelos correspondientes a la Estación de aforo Laguna, además de los Grupos anteriormente mencionados, podemos encontrar correspondientes al Arapey. Son suelos basálticos y superficiales, por lo que es de esperar una menor capacidad de retención de agua (Bossi et al., 2011).

El "R Coefficient" o infiltración significa la aportación de agua subterránea a los cauces, la que dependerá a su vez de la infiltración de agua en el terreno, la evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Es esperable que el valor más alto de este parámetro ocurra en la cuenca de la Estación M. Díaz ya que si observamos el mapa hidrológico esta subyace sobre una unidad acuífera. Así mismo era esperable valores más bajos en las Estaciones Laguna y Pereira ya que un porcentaje importante de la superficie se establece sobre unidades con baja posibilidad de aguas subterráneas.

El "Seepage" o infiltración profunda representa el aporte de agua a acuíferos regionales y que por tanto no contribuye a generar aportación en las estaciones de aforo consideradas. La aportación de agua al Acuífero Guaraní hace considerar que este valor sea mayor en el caso de la Estación de Laguna, lo que se ha verificado.

Por último, la evapotranspiración se ha utilizado como parámetro de ajuste, lo que dependerá en buena medida del uso productivo de los suelos. A partir del

análisis del mapa de usos de suelos se aprecia que, si bien es importante en la región, el cultivo de arroz, y forestación, el mayor porcentaje de superficie se destina a pasturas por lo que se ha tenido en cuenta como fase de crecimiento los meses de primavera. Los principales ajustes que han de realizarse entonces pueden corresponder al cambio relativo interanual de áreas destinadas al cultivo del arroz y ganadería extensiva, y la incorporación en los últimos años de cereales, cultivos de oleaginosas y forestación en la región.

4.2 Sobre la validación del modelo

El proceso de validación se realiza a través del análisis de los estadísticos considerando las recomendaciones que en sus documentos técnicos Hydro-BID (BID, 2014a) indica como criterio para aceptar los resultados obtenidos. Se puede indicar entonces que:

- El porcentaje de error en el volumen total en todos los casos es menor al +/- 40%.
- En todos los casos el valor de correlación r es en el orden o mayor a 0.7 lo que indica un buen ajuste.
- Aplicando como criterio el Estadístico de Nash-Sutcliffe en todos los casos el ajuste es bueno.

Así mismo, a través del análisis de los gráficos de las series temporales de caudales se ha verificado que el modelo, reproduce de manera razonable los períodos donde se incrementa el caudal por eventos de precipitación, nuevamente considerando las limitaciones en lo que refiere al primer año de cada simulación. Sin embargo, ha de indicarse que en la Validación 2 para la Estación Aguiar se observan diferencias importantes, subestimando el flujo total para el modelo. Esto podría explicarse considerando que solo se cuenta con dos años de mediciones, lo que hace difícil poder concluir al respecto. Diferencias importantes también se han registrado cuando se ejecutó la validación para la estación de aforo Laguna I. Los hidrogramas aquí arrojan mayor cantidad de picos, y picos más elevados para los caudales observados.

4.3 Sobre los efectos del cambio climático

La ejecución del modelo teniendo en cuenta escenarios climáticos ha considerado variaciones en la temperatura y precipitación media en la cuenca. Supone que los cambios ocurrirán de manera homogénea a lo largo del año, sin considerar factores como la estacionalidad, el incremento en la variabilidad climática y el incremento en los fenómenos extremos (temporales y sequías). Los resultados así obtenidos servirán para tener una aproximación sobre cómo ha de poder variar los aportes de los ríos frente a posibles situaciones futuras.

Del análisis de los gráficos puede decirse que la variabilidad debido a eventuales efectos del cambio climático es poco significativa respecto a las variaciones propias de caudal interanual, por el efecto de la alternancia de años más húmedos o secos.

Si se considera el escenario probable, que espera además de un aumento de la temperatura el aumento de las precipitaciones en un 5%, el modelo indica que se incrementa la aportación de agua en los ríos. El ingreso de más agua al sistema por efecto de la precipitación prevalece por sobre el incremento de la evapotranspiración por el aumento de temperatura. El incremento en el volumen para un período de 10 años, dependiendo el caso, se sitúa entre el 3,8 y 5,0%. El incremento más importante se ha dado en las Estaciones Aguiar y Laguna, lo que puede explicarse por tener una menor infiltración, lo que significará también un menor aporte de agua a los acuíferos profundos, así como por la incidencia en cada caso de la evapotranspiración, teniendo esto que ver con la capacidad de almacenamiento y uso del suelo.

Si consideramos un escenario más restrictivo, que toma en cuenta únicamente un incremento en la temperatura, como era de esperar, como consecuencia de una mayor evapotranspiración disminuyen las aportaciones en los cauces. Las variaciones según el caso se han estimado en el entorno de -4,2 a -7,1%. Llama la atención en la comparación el valor significativamente más bajo que se obtuvo para la Estación Laguna, lo que puede explicarse a través del modelo por la más baja capacidad de suelo para absorber agua (que podrá ser luego evapotranspirada), y el valor relativamente alto de aportación subsuperficial a los cauces determinado por el coeficiente de recesión.

4.4 Sobre la disponibilidad de agua en la cuenca

4.4.1 Incremento en el consumo de agua por las nuevas plantaciones de eucaliptus

Según Poor y Fries (1985), no hay una respuesta general a la pregunta de si las plantaciones de eucaliptus consumen aguas en excesivas cantidades, porque las características del sitio, el clima y de la especie influyen en el uso de agua, lo que determina la necesidad de estudiar el impacto hidrológico de los mismos bajo condiciones locales. Las relaciones entre las plantaciones forestales y sus efectos sobre el agua han sido estudiadas a través de diferentes modalidades y enfoques de investigación, tanto a nivel de árboles aislados, como de parcelas, o microcuencas experimentales (Martínez, 2013). Identificar cual es la mejor estrategia para estimar los efectos por la sustitución de praderas naturales ha de resultar un aspecto por lo pronto difícil de resolver.

Dos aspectos por citar como claves a la hora de intentar comprender la variación en el ciclo hidrológico: como primer lugar una disminución en la cantidad de agua que llega al suelo como consecuencia de la interceptación en la cobertura vegetal. Los agrónomos suelen distinguir este término indicando que la evapotranspiración total se calculara como la evapotranspiración del cultivo, más el agua que es interceptada por las hojas y se evapora sin nunca alcanzar el suelo. En segundo lugar, algunas investigaciones han determinado que, si la lluvia es menor que el uso potencial de agua de la plantación, y no hay barreras que impidan el desarrollo de las raíces, las plantaciones de *Eucalyptus Globulus* eventualmente usarán toda el agua almacenada en el suelo, incluso hasta 20 m de profundidad en el perfil (Smettam et al., 1999). Las variaciones en el ciclo hidrológico suceden como una interacción de fenómenos secuenciales que ocurren a nivel de la planta y el suelo, y el resultado obtenido para la cuenca surge de integrar esos efectos locales.

Desde el punto de vista del desarrollo del modelo, un camino que ha de poderse considerar es a partir del área en estudio modificar desde la base de datos el uso del suelo, lo que también hará modificar el número de curva en cada "grid" y la evapotranspiración cuando se ejecute el mismo. Esto tiene como principal desventaja

que se debe modificar la base de datos, además de que de todos modos la tierra a sustituir se estaría seleccionando de manera arbitraria.

Como principal ventaja podemos mencionar que de este modo podríamos prever para ese escenario en concreto y a través del modelo, la variación de los distintos componentes del ciclo hidrológico, y en particular la aportación a los ríos. Un camino similar, por ejemplo, es el utilizado por Burke y Sugg (2006), quienes desarrollaron tres mapas de cambio en la cobertura terrestre desde 2005 al 2025.

Como un camino alternativo, los efectos por el incremento de la evapotranspiración total servirán para indicar un consumo de agua adicional que no podrá considerarse en la aportación a los ríos por escorrentía superficial o subterránea, así como en la percolación profunda. Este fue el procedimiento realizado, por el cual se ha estimado la cantidad de agua que de manera incremental se demanda en la cuenca, lo que, si bien no se traduce de manera directa como disminución en las aportaciones de los ríos, sí establece una situación límite que podrá concluir sobre el orden de magnitud de los efectos esperados y en todo caso ampliar en análisis particulares considerando el emplazamiento de los bosques en un futuro.

4.4.2 Disponibilidad de agua en la cuenca

Los gráficos que se muestran en las Figuras 29 y 30 muestran para las cuencas consideradas la disponibilidad de agua en los distintos escenarios climáticos. Consideran los caudales ambientales definidos de manera preliminar de acuerdo con lo indicado en el capítulo de resultados. En lo que refiere a la eventual instalación de una planta de celulosa, no toma en cuenta el consumo de los procesos industriales, considerando que la misma se instalaría aguas abajo de la presa de generación hidroeléctrica quien regularía el caudal para asegurarle el suministro. En los gráficos se ha indicado el consumo esperado por nuevas plantaciones forestales en cada una de las cuencas, lo que hará reducir la aportación a los ríos y a los acuíferos profundos. El caudal disponible se calculó como el caudal anual que propicia el modelo, para los escenarios climáticos, menos el caudal ecológico.

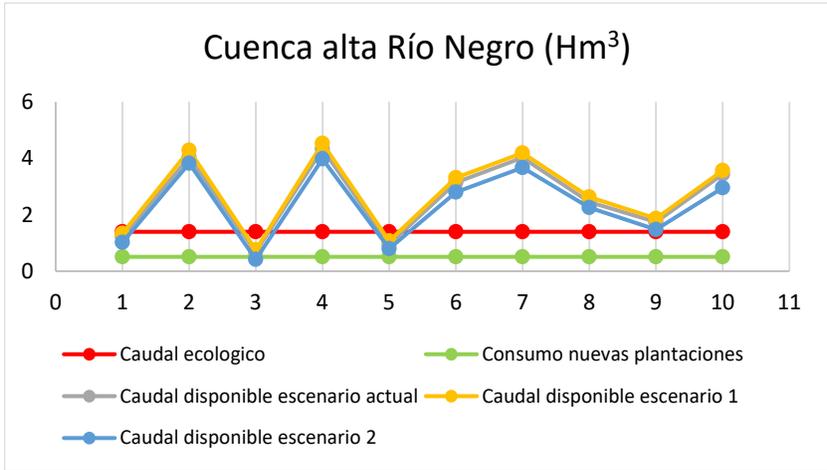


Figura 29: Disponibilidad de agua en la Cuenca Alta del Río Negro

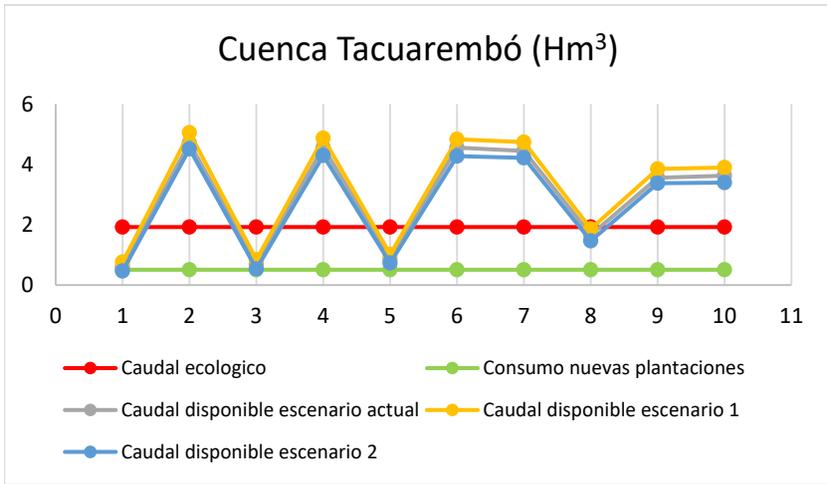


Figura 30: Disponibilidad de agua en la Cuenca Tacuarembó

En la Cuenca Alta del Río Negro podemos observar que en los escenarios planteados el agua disponible por escorrentía superficial es mayor a la demandada por las plantaciones, a excepción del año 3 si se considera el escenario de cambio climático donde solo se incrementa la temperatura. Esta misma situación sucede en la Cuenca Tacuarembó a excepción del primer año de la serie en el Escenario 2.

Dado que el consumo por las plantaciones no solo hará disminuir la escorrentía superficial, sino que parte del agua se corresponde con la recarga de acuíferos profundos, es de esperar que aún en los peores escenarios pueda cumplirse con los caudales ecológicos tal como se han definido de manera preliminar.

Sin embargo, en períodos de sequía, si se incorporan las hectáreas de eucalipto previstas, la presión sobre el recurso hídrico en la región ha de poder ser significativa, pudiendo limitar la posibilidad de asignar otros usos, como, por ejemplo, nuevos regadíos para cultivos.

5 Conclusiones

- Utilizando el programa Hydro-BID se ha podido desarrollar un modelo hidrológico para la cuenca alta del Río Negro, Uruguay.
- En el proceso de calibración se debe tener en cuenta los errores que se pueden ocasionar por la sensibilidad en las medidas de caudal de los aforos, en particular cuando el caudal observado es menor a 10 m³/s.
- Hydro-BID utiliza el método del Número de Curva para determinar la abstracción inicial, y la escorrentía superficial; habiendo sido desarrollado este para pequeñas cuencas destinadas a la producción agrícola en Estados Unidos, puede significar que los valores considerados no sean siempre lo más adecuados, siendo necesario el ajuste.
- El área en estudio se caracteriza por tener plantaciones de arroz, que han de abastecerse con agua superficial para el riego del cultivo, a través de la captación y su derivación a pequeños embalses o tajamares. Este hecho ha de tener incidencia en el ciclo hidrológico, y puede explicar en parte, que se haya tenido que considerar Número de Curva inferiores a los esperados.
- Si se comparan los valores obtenidos para cada una de las subcuencas, en lo que refiere a los parámetros que caracterizan el almacenamiento de agua en el suelo, la escorrentía subsuperficial, y la percolación profunda, se observa una fuerte correlación con las características geológicas e hidrogeológicas.

- A través del modelo se ha podido simular los efectos en la aportación de agua superficial por efecto del cambio climático en distintos escenarios.
- De manera inicial ha de indicarse que la incorporación de nuevas plantaciones de eucaliptus no pone en riesgo el cumplimiento de los caudales ambientales, tal como los define la normativa vigente. Sin embargo, en caso de que se manifieste un escenario climático por el que se incremente la temperatura media, sin que lo hagan las precipitaciones, la presión sobre el recurso puede ser importante, lo que puede condicionar otros usos.
- El modelo desarrollado, se puede utilizar en un futuro en la asignación de caudales, para la planificación de los recursos hídricos, así como insumo para la ejecución de modelos de transporte, y análisis de las propiedades cualitativas de las masas de agua.

Bibliografía

- Arias Lastre, P (2015). Guía de Aplicaciones del HEC-HMS en cuencas cubanas. Trabajo de Diploma Título de Ingeniero Hidráulico. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
- Belmonte, F., Romero, A. (2009). Balance hídrico y trascolación bajo cobertura de pino. Departamento de Geografía Física, Universidad de Murcia.
- BID (2014a). Base de Datos de Hidrología para América Latina y el Caribe, 2014. Hydro-BID.
- BID (2014b). Nota Técnica 2: Un sistema integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos, 2014. Hydro-BID.
- Bossi, J., Caggiano R., Ortiz, A (2011). Manual de Geología para estudiantes de Agronomía. Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Bossi, J. (2007). Regiones Geológicas del Uruguay. Apuntes Facultad de Agronomía, UDELAR.
- Burke, L., Sugg, Z. (2006). Modelamiento Hidrológico de la Descarga de las Cuencas Hidrológicas en el Arrecife Mesoamericano. World Resources Institute.
- Diario Oficial (2018). Decreto 368/018 del 13 de noviembre de 2018. Diario Oficial Número 30.068 de 13 de noviembre de 2018, página 3-5.

Modelo de balance hídrico en la cuenca alta del Río Negro (Uruguay) / 111

- Díaz, R., Rébori, M. (2003). Intercepción de la lluvia en un monte de *Eucalyptus dunnii*. Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias INTA, Buenos Aires.
- Heinzen, W., Carrión, R., Massa, E., Pena, S., Stapff, M. (2003). Mapa Hidrológico del Uruguay. Escala 1:100.000. Dirección Nacional de Minería y Geología, MIEM.
- Hamon, W. R. (1963). Computation of Direct Runoff Amounts From Storm Rainfall. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub. 63:52-62.
- INIA (2009). Cambio Climático en Uruguay, posible impactos y medidas de adaptación en el Sector Agropecuario. Serie Técnica 178, 11-17. Montevideo.
- Martínez, L. (2013). Estimación del consumo de agua en una plantación adulta de *eucalyptus*. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias, UDELAR, Uruguay.
- Martínez Fernández, J. (2014). Cambios en la cubierta vegetal y recurso hídricos: un análisis de la intercepción en la cuenca del Duero. Departamento de Geografía, Universidad de Salamanca.
- MVOTMA (2016). Cambios de uso de suelo y degradación de ecosistemas en Uruguay. Abril 2016, Bogotá, Colombia.
- MVOTMA (2017). Plan Nacional de Aguas. Diciembre 2017, Montevideo.
- ONU (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO. París, UNESCO.
- Pascual Aguilar J.A., Díaz, M. (2016). Guía Práctica sobre modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS. Centro para el conocimiento del Paisaje, Instituto IMDEA Agua, Alcalá de Henares.
- Poor M., Fries, C. 1985. The ecological effects of *Eucalyptus*. Rome, Italia. FAO Forestry Paper N° 59. Pág. 87.
- RAPAL Uruguay (2010). Contaminación y eutrofización del agua: Impactos del modelo de agricultura industrial.
- Sacramento Neto, O. B. (2001). Balanço hídrico em plantios jovens de eucalipto na região de Belo Oriente–Minas Gerais. M.Sc. thesis, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brazil. 77 p.
- Sánchez San Román F. J. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea. Salamanca (pp. 107-156).
- Singh, V., Woolhiser, D., (2002). Mathematical Modeling of Watershed Hydrology. Journal of hydrologic engineering, July-August 2002, 270-292.

Smettam K, P Farrington, R Harper, DS Crombie, D Williamson. 1999. Soils constraints to tree water use. Land and Water Research and Development Corporation Grant UWA 15 Final Report.

WHO/UNICEF (2006). Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation). Coverage Estimates Improved Drinking Water.

Información consultada en INTERNET

Sistema de Información Ambiental. <https://www.dinama.gub.uy/visualizador/index.php?vis=sig>.
Accedido el 17 de marzo de 2017.

INIA: Banco de datos Agroclimáticos, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. <http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>. Accedido el 15 de marzo de 2019.

Banco de datos Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento. Brasil. <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?f=bdmep/bdmep>.
Accedido el 15 de marzo de 2019.

Mapas topográficos. <http://en-ca.topographic-map.com/places/Uruguay-4077415/>.
Accedido el 17 de marzo de 2019.

CONTRATO ROU – UPM. CONTRATO Entre la República Oriental del Uruguay y UPM. https://medios.presidencia.gub.uy/tav_portal/2017/noticias/NO_Y823/contrato_final.pdf.
Accedido el 17 de marzo de 2019.

Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE). www.ute.com.uy.
Accedido el 01 de febrero de 2019.

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha en Colombia, con el programa Hydro-BID

P. Rincon Lara^a, J.A. Pascual-Aguilar^{b,c}

^aUniversidad de Alcalá. Campus externo Universidad de Alcalá.

^bCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^cInstituto IMDEA-AGUA.

Resumen

La caracterización de la cuenca Alta del Río Chicamocha, bajo escenarios de cambio climático se puede realizar por medio de diferentes plataformas, la escogida para este estudio es Hydro-BID que proporciona una herramienta que con base en los datos recogidos a través de instrumentos especializados permite visualizar las proyecciones de futuro que se deseen establecer dando a conocer datos que tienen que ver con temperatura, precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del mismo río.

Se plantearon tres escenarios de cambio climático, el primero un aumento de temperatura y precipitación, el segundo un aumento de temperatura sin alterar la precipitación y el tercero un aumento de la temperatura con disminución de la precipitación, dando como resultado que el aumento de la precipitación, más que los cambios de temperatura, impulsa la escorrentía y la evapotranspiración, viéndose afectada la cuenca a nivel de caudal entre 2 y 5 millones de metros cúbicos, dependiendo del escenario.

Se puede establecer que la herramienta es muy útil, aunque para que los resultados dados puedan generar mayor confiabilidad, es necesaria la recolección de un mayor número de información, que atiendan a las exigencias de la plataforma.

Palabras clave: cambio climático, Hydro-BID, Cuenca Chicamocha, simulación hidrológica.

Hydrological characterization of the Chicamocha river basin in Colombia, with the Hydro-BID software

P. Rincon Lara^a, J.A. Pascual-Aguilar^{b,c}

^aUniversidad de Alcalá. Campus externo Universidad de Alcalá.

^bCentro para el Conocimiento del Paisaje.

^cInstituto IMDEA-AGUA.

Abstract

The characterization of the Upper Chicamocha river basin, under scenarios of climate change can be done through different platforms, the one chosen for this study is Hydro-BID, which provides a tool based on the data collected through specialized instruments, allows to visualize the future projections that we wish to establish by disclosing data that have to do with temperature, precipitation, runoff and evapotranspiration in the basin of the same river.

Three scenarios of climate change were proposed, the first an increase in temperature and precipitation, the second an increase in temperature without altering the precipitation and the third an increase in temperature with decrease in precipitation. Results show that the increase in precipitation, more than changes in temperature, drives runoff and evapotranspiration, the basin being affected at a flow rate between 2 and 5 million cubic meters, depending on the scenario.

It can be established that the tool is very useful, although for the given results to generate greater reliability, it is necessary to collect a greater number of information that meets the demands of the platform.

Keywords: Climate change, Hydro-BID, Chicamocha river basin, hydrological simulation.

1 Introducción

La crisis del agua es un problema global y no se centra únicamente en su disponibilidad, ésta involucra tres aspectos: distribución, accesibilidad y calidad; la distribución porque existen regiones muy húmedas y otras muy secas; la accesibilidad ya que existen comunidades que no poseen acceso al recurso y la calidad que ahora enfrenta la dualidad de para qué situaciones es necesaria y medible (Berestovoy, 2018).

El cambio climático ha hecho que todos los países dirijan sus esfuerzos al desarrollo de alternativas para afrontar los retos a los cuales estarán expuestos y por lo tanto a la capacidad de adaptación y la reducción a la vulnerabilidad.

En Colombia, el panorama no es diferente, según el Departamento Nacional de Planeación, en el caso de no implementar medidas para lograr esa adaptación, puede llegar a causar pérdidas económicas de promedio anual del Producto Interno Bruto (PIB) de 0,5% durante los años 2011-2100, las cuales equivalen a 3,8 billones de pesos por año. "Si Colombia no se adapta al cambio climático perderá \$3,8 billones anuales hasta el 2100" (Gaviria Muñoz (s.f.).

Debido a esto, es de vital importancia tener claro el comportamiento del cambio climático y como podría afectar a la zona en razón de explicar cómo es el dinamismo de la capacidad del recurso agua, dirigiéndolos de forma directa a los modelos hidrológicos con el fin de entender y confrontar dichos episodios.

Los modelos hidrológicos son unas de las opciones que se han tomado como instrumentos para el análisis de información de primera mano, brindando una percepción de la alteración climática global, por medio de componentes específicos o en conjunto dando una idea clara del comportamiento del espacio territorial a estudiar. Hydro-BID como herramienta de modelación hidrológica, útil para América Latina y El Caribe, permite aclarar el comportamiento del agua y el clima. Los resultados obtenidos de esta herramienta pueden ser utilizados como soporte para la planificación de recursos hídricos por medio del balance de la oferta de agua con la demanda de esta (Berestovoy, 2018).

2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es Simular bajo condiciones de cambio climático escenarios de sequías e inundaciones por medio de la plataforma Hydro-BID.

Como objetivos específicos se destacan los siguientes:

-Evaluar el comportamiento de la cuenca del río Chicamocha, con base a los escenarios de cambio climático.

-Establecer a nivel de importancia, los diferentes escenarios de cambio climático establecidos bajo su severidad.

-Determinar la importancia de la herramienta de Hydro-BID frente a los cambios climáticos que la cuenca alta del río Chicamocha enfrenta.

3 Metodología

3.1 Área de estudio

Colombia se encuentra ubicada al Noroccidente de América del Sur (Figura 1), limitando al Norte con Panamá y el Océano Atlántico, al Sur con Perú y Ecuador, al Oriente con Venezuela y Brasil y al Occidente limita con el Océano Pacífico. Se localiza en un lugar estratégico, ya que se encuentra cercano a la línea del Ecuador con un clima característico del trópico, el cual no se ve afectado por el cambio de las estaciones, y se caracteriza por un comportamiento climático monomodal, bimodal y de lluvias continuadas. (Jaramillo-Robledo y Chaves-Córdoba, 2000)

La cuenca alta del Río Chicamocha se encuentra ubicada en el centro del país, formada en medio de un altiplano, llamado altiplano Cundiboyacense, hace parte de la jurisdicción de la corporación autónoma de Boyacá, CORPOBOYACA. El río Chicamocha nace a la altura del municipio de Tuta, discurre por los Municipios de Paipa, Duitama, Nobsa, Sogamoso, Belencito, Topaga, Corrales, Beteitiva, Tasco, finalizando a la altura de Paz del Río, se caracteriza por tener pendientes poco pronunciadas (Rincón y Camargo, 2017).

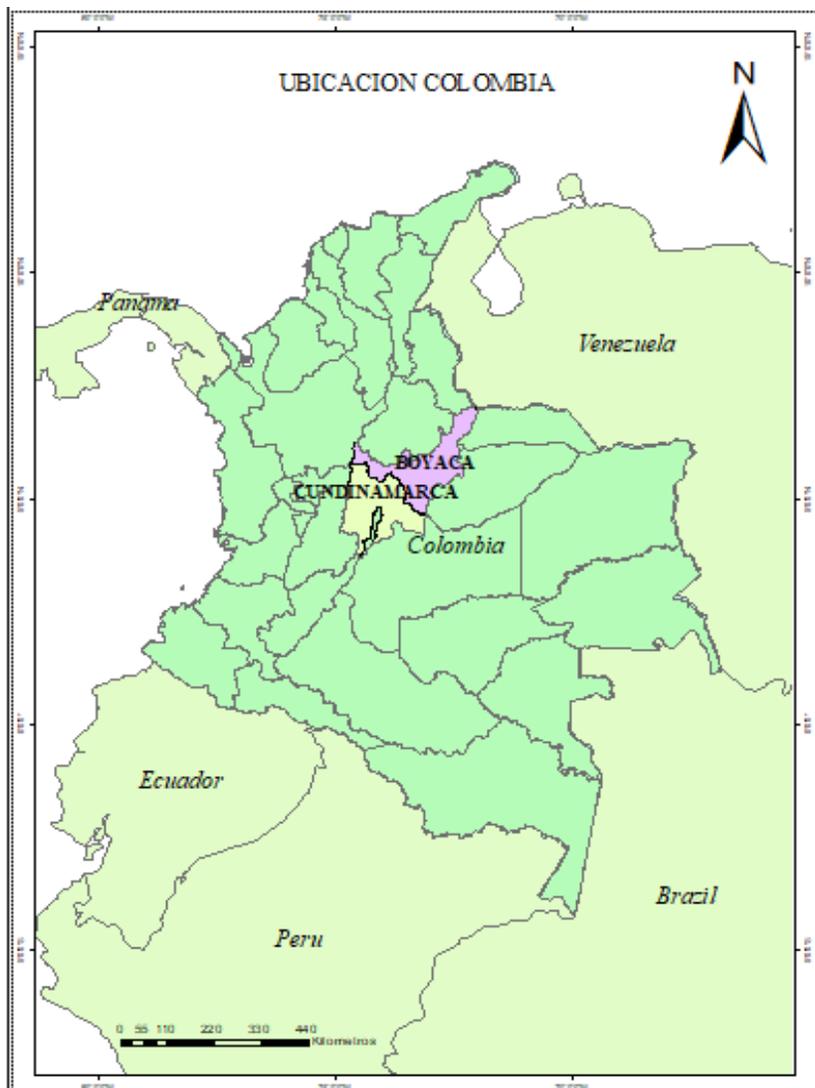


Figura 1: Ubicación Cundinamarca y Boyacá en Colombia.

La precipitación en el área Cundiboyacense es bastante variable, ésta no alcanza los 1000 milímetros anuales; pero en sus cercanías las precipitaciones son diversas, principalmente en la Sabana de Bogotá donde su precipitación es mayor alrededor de 1500 milímetros, y al sur occidente desciende a los 1000 milímetros, al occidente del altiplano alcanzan 2500 milímetros y en la cercanía de Santander departamento vecino en sentido nororiental, alcanza una medida anual entre 1500 milímetros y 2000 milímetros (Pabón-Caicedo, *et al.*, 2001).

A pesar que el altiplano tiene este tipo de características, se describe como un espacio árido por la vegetación existente y por las relativas bajas precipitaciones que tiene un promedio de 800 milímetros anuales, aunque como ya antes se menciona a sus alrededores tiene valores de precipitación mucho más importantes, con una presión atmosférica menor, permitiendo niveles de radiación altos, con temperaturas relativamente bajas respecto al promedio de temperatura nacional, que no tienen grandes variaciones durante todo el año pero si está bien diferenciado entre el día y la noche (CORPOBOYACA *et al.*, 2006). Las vitales fuentes de humedad de esta zona son de los vientos alisios que provienen del oriente del país y que vienen acompañados de humedad y frío según la ley de Buys Ballot (Roth, 1979)

El altiplano cundiboyacense es un paisaje geomorfológico, que se encuentra entre dos cordilleras, la oriental y la central, las cuales están formados normalmente por materiales sedimentarios, (Zinck, 2012) a una altura entre los 2300 y 2900 metros sobre el nivel del mar, tiene como peculiaridades geológicas que está formado en la era terciaria con característica lacustre, con suelos ricos y tierras en su mayoría fértiles para los cultivos principalmente de papa y cebolla, además de una evidente presencia de ganadería siendo estos transcendental fuente económica del área (Martínez Peláez *et al.*, 2005).

Los principales elementos de las zonas áridas son la escasez hídrica y su posible exacerbación por un régimen eólico persistente ya que incidirán en la vegetación que podrá existir en este tipo de ecosistema, siendo elementos restrictivos para la existencia de las especies vegetales. Es característico de los ecosistemas secos que se lleven a cabo actividades económicas como la ganadería y el pastoreo, así como la agricultura intensiva, trayendo como consecuencias pérdida de la cobertura

vegetal creando erosión en el suelo, compactación y cambio en el mismo (Valencia-Duarte *et al.*, 2012).

3.2 Demanda y Oferta de Agua en el Río Chicamocha

El Río Chicamocha es alimentado por seis cauces, según la descripción hidrológica del Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la cuenca alta del Río Chicamocha, los cuales caracterizan a nivel hidrológico la cuenca, donde el régimen de caudales tiene un comportamiento bimodal y no disminuyen en épocas de sequía, deduciendo que están siendo beneficiados por aportes de agua subterránea, de acuíferos de porosidad primaria "que pueden constituir acuíferos de mediana a buena productividad" (CORPOBOYACA *et al.*, 2006).

Ya que todos estos estudios se realizaron de manera teórica por falta de información, el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha hace énfasis en que no se tiene un control real de los caudales, debido a que este territorio es netamente rural y que la mayoría de las captaciones se hacen de manera directa y no se posee un control de usuarios, ni de volúmenes de demanda y tampoco hay permisos de captación de agua (CORPOBOYACA *et al.*, 2006).

El caudal mínimo ecológico con base a la resolución 865 de 2004 fue determinado a nivel general como el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente de estudio, adicionalmente de un 25% por la reducción de calidad del agua, esto es debido a que en la mayoría de los cauces de Colombia se vierte directamente materia orgánica, residuos industriales y agrícolas, dando un total de protección al caudal de 50% (CORPOBOYACA *et al.*, 2006).

Las demandas fueron calculadas por medio de un trabajo de campo de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá con el fin de tener un acercamiento a la economía del sector y como podría estar afectando a los cauces. Es importante tener en cuenta que se debe contar con un caudal mínimo ecológico, con una aportación significativa, lo cual en el estudio de cambio climático puede estar viéndose afectado (Pabón Caicedo, 2011), teniendo como demandas de agua por la cuenca alta del río

Chicamocha un total de $4,5 \cdot 10^{11}$ millones de metros cúbicos al año. (CORPOBOYACA *et al.*, 2006).

Según la categorización de demandas (Tabla 1), se puede interpretar que el Río Chicamocha se encuentran con una demanda baja sin ser afectando el caudal mínimo ecológico. (CORPOBOYACA *et al.*, 2006)

Tabla 1: Categoría e interpretación del índice de escasez de la cuenca alta del Río Chicamocha. Tomado de CORPOBOYACA *et al.*, (2006).

Categoría	Rango	Explicación
Alto	>50%	Demanda alta
Medio alto	21-50%	Demanda apreciable
Medio	11-20%	Demanda baja
Mínimo	1-10%	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Demanda no significativa

3.3 Obtención de Información

La obtención de datos se realizó a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), quienes suministraron datos de precipitación diaria acumulada en mm, caudales medios diarios en m³/s y temperatura media diaria en grados centígrados, en un intervalo de tiempo de cinco años (2008, 2009, 2010, 2011, 2012 y 2013) de la cuenca del río Chicamocha, así mismo se solicitó el Plan de Ordenamiento y de Manejo de la Cuenca alta del Río Chicamocha a la Corporación Autónoma de Boyacá.

Con los datos obtenidos y organizados de acuerdo a los requerimientos de la plataforma Hydro-BID, da inicio al trabajo y para ello se utiliza el "software" SIG denominado QGIS que visualiza, gestiona, y analiza datos de información geoespacial, el cual es importante para el proyecto ya que las estaciones que contienen información de caudales deben ser georreferenciados y permite ir ubicando el proyecto dentro del programa, seguidamente por medio de la herramienta AHD (Analytical Hydrology Dataset) se definen el área de trabajo, aguas arriba del punto de aforo establecido para la cuenca (Figura 2).

Esta información es montada, junto con la imagen preliminar que es la base geográfica que trabaja con número único de identificación y divisoria de cuencas y

subcuencas, las cuales tienen ya la información del área, el AHD flujo que contiene la información de los números únicos de identificación y el sentido del flujo y el AHD línea asignación de los cauces con base al número único de identificación. Por medio de la herramienta AHD se realiza la interrelación de estos cuatro elementos y es asignada una serie de números únicos de identificación para la cuenca de estudio.

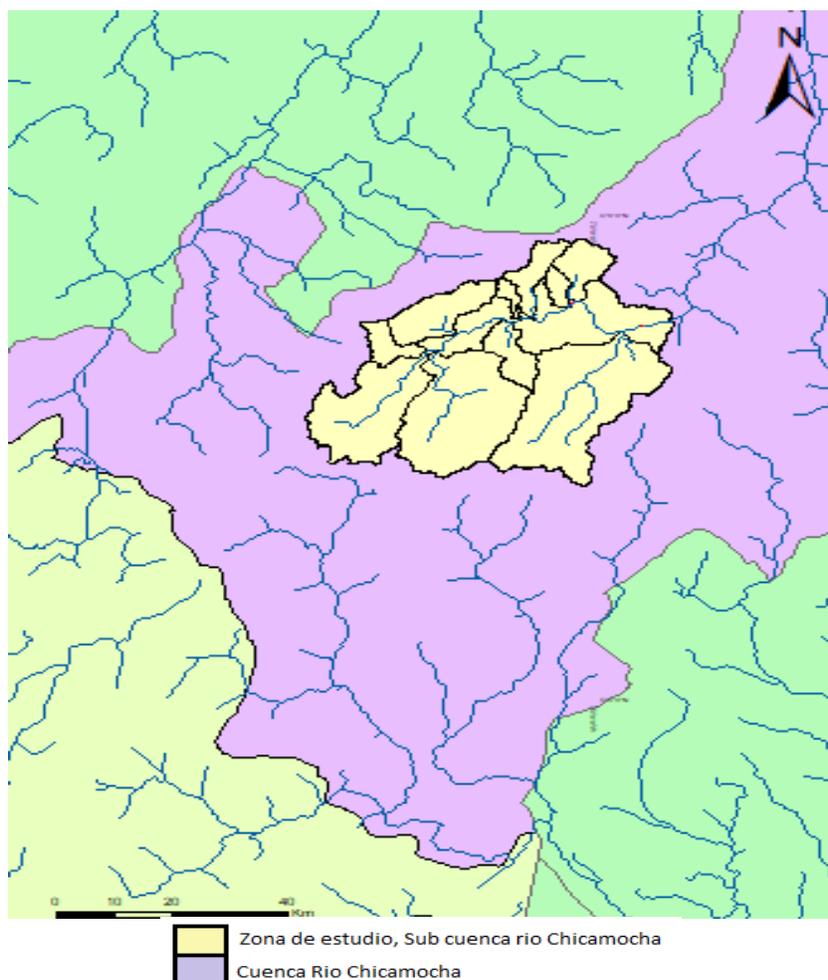


Figura 2. Área de estudio por medio de la herramienta AHD.

El área de la caracterización y de drenaje de la cuenca es de 2158,74 Km² delimitada por la interfaz de Hydro-BID con QGIS, la cual visualiza la misma, y da una longitud total de los cauces que hacen parte de la cuenca de 211 Km; así mismo ubica las estaciones determinando el área de estudio (Tabla 2), siendo la estación de Nobsa la que se encuentra aguas abajo y el proyecto se realiza con base a la información aguas arriba, esto también sirve para la conexión entre la información de AHD y la información cargada por el modelador, por medio de la generación del número de identificación único. Se generan también los números únicos de identificación que son relacionados, para ser llevados a la interfaz de Hydro-BID.

Tabla 2: Localización de Estaciones de caudales.

Estación	Latitud	Longitud
Capitanejo	6.513208056	-72.69545306
Duitama	5.807611111	-73.01380556
Nobsa	5.759888889	-72.90652778
Paipa	5.766733333	-73.10872222

Lo importante para este proceso es que lo que está generando QGIS tenga sentido con lo cargado, realizando un análisis de los datos dados colocándolos en la plataforma del Sistema de Información Geográfica.

Finalizando este proceso de verificación, se llevan los datos proporcionados a Hydro-BID y se ejecuta el programa, el cual arroja como primera medida, sin realizar ningún tipo de calibración, lo expresado en la Tabla 3:

Viendo que se tiene un error general de 0,68 significativamente alejado a 0, el coeficiente de correlación es positivo igualmente alejado de 1 y la eficiencia de Nash Sutcliffe se encuentra según lo antes mencionado por Cabrera (s.f.) satisfactorio.

Tabla 1: Estadística para la verificación de la calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.

Estadística	Evaluación Diaria	Evaluación Mensual
Volumen general de error	12.14	0.68
Coefficiente de correlación	0.4	0.66
Eficiencia de Nash Sutcliffe	-0.24	0.37

Este módulo estadístico nos permitirá movernos en los rangos de seguridad con el objetivo de poder calibrar la modelación de la cuenca y que ella esté acorde a los datos proporcionados y llevarlos a una situación de cambio climático.

Este espacio estadístico, refleja cómo es el comportamiento de los caudales medios bajo la realidad, manifestando la cercanía que tiene el modelo generado con los datos reales aportados: los errores menores al 40% se consideran aceptables. Tenemos desviaciones significativas en los años 2008 y 2014 dentro del error general del volumen que es determinado por la diferencia entre el flujo simulado del modelo y el flujo generado por el modelador. Evidenciando un error diario de 12.4% y mensual de 11.27% el cual no es significativo ya que está cerca al valor 0.

Visualizando el coeficiente de correlación (Figura 3) se puede determinar que ésta es positiva y debido a la diferencia entre el flujo observado y el flujo simulado, están directamente correlacionados. Se puede percibir la presencia de valores atípicos sobre el eje y de 325 m³/s. También se observa que los valores observados y modelados están entre 0 y 175 m³/s aproximadamente, se puede concluir de la misma manera que los valores evidenciados son mucho menores que los simulados dirigiendo la línea de mejor ajuste de forma negativa en el eje y. La eficiencia de Nash Sutcliffe nos refleja la posibilidad que tiene el modelo de explicar el comportamiento de la simulación con respecto a los valores medidos reales. En este caso el ajuste, la relación entre simulación y datos reales, es suficientemente buena y por esta razón se prosigue a realizar la calibración y ajuste del modelo.

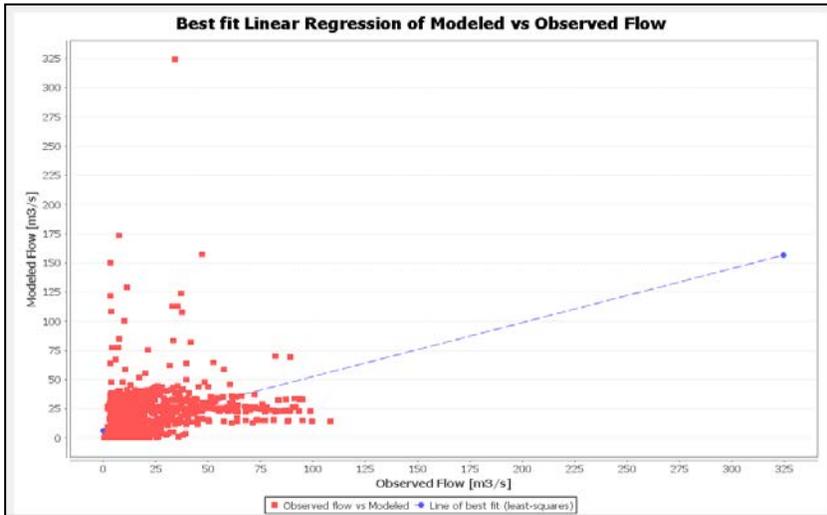


Figura 3: Regresión lineal entre el modelo simulado y el modelo observado.

Se evidencia que los valores observados que corresponden al comportamiento diario de flujo son menores (Figura 4), así mismo se refleja un pico importante en los valores simulados entre el año 2011 y 2012, que puede ser el valor que se presenta como atípico en la gráfica de correlación (Figura 3).

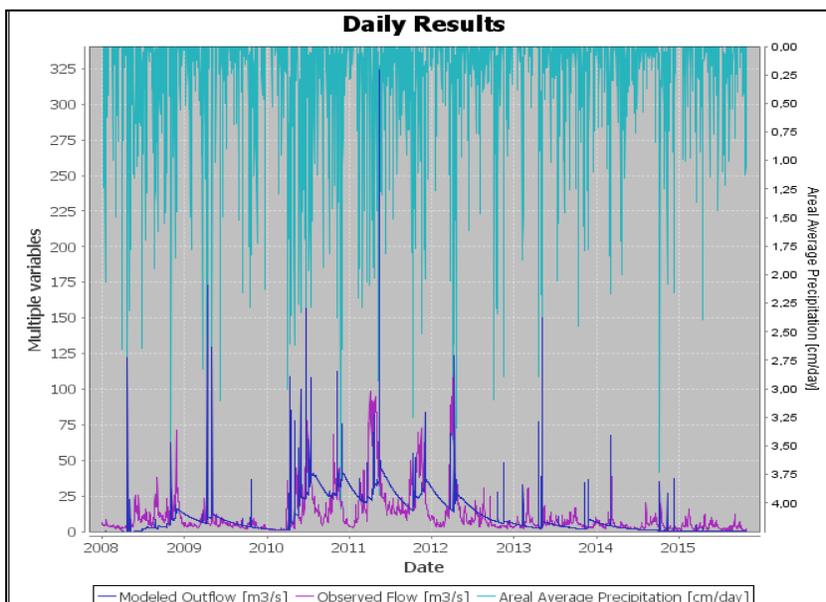


Figura 4. Comportamiento de caudales modelados y observados, frente a la precipitación.

3.4 Calibración

La calibración se hace por medio de prueba y error, en donde se mejoran los valores dando una aproximación de la realidad en cuestión al comportamiento de los caudales modelados bajo el criterio de los caudales proporcionados, determinando que el volumen general de error se encuentra muy cercano a 0, el coeficiente de correlación no mejoró significativamente y la eficiencia de Nash Sutcliffe se encuentra dentro de un rango de fiabilidad bueno.

Como resultado de la calibración, se puede observar un ajuste entre los datos simulados y los medidos (Figura 5), pues los primeros se ajustan significativamente a los caudales reales, según los valores atípicos ya evidenciados desde un inicio de la calibración y que no permitieron realizar una reducción del desajuste.

Tabla 2: estadística después de realizar calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.

Estadística	Evaluación Diaria	Evaluación Mensual
-------------	-------------------	--------------------

Volumen general de error	0.9	0.1
Coefficiente de correlación	0.33	0.67
Eficiencia de Nash Sutcliffe	-0.53	0.44

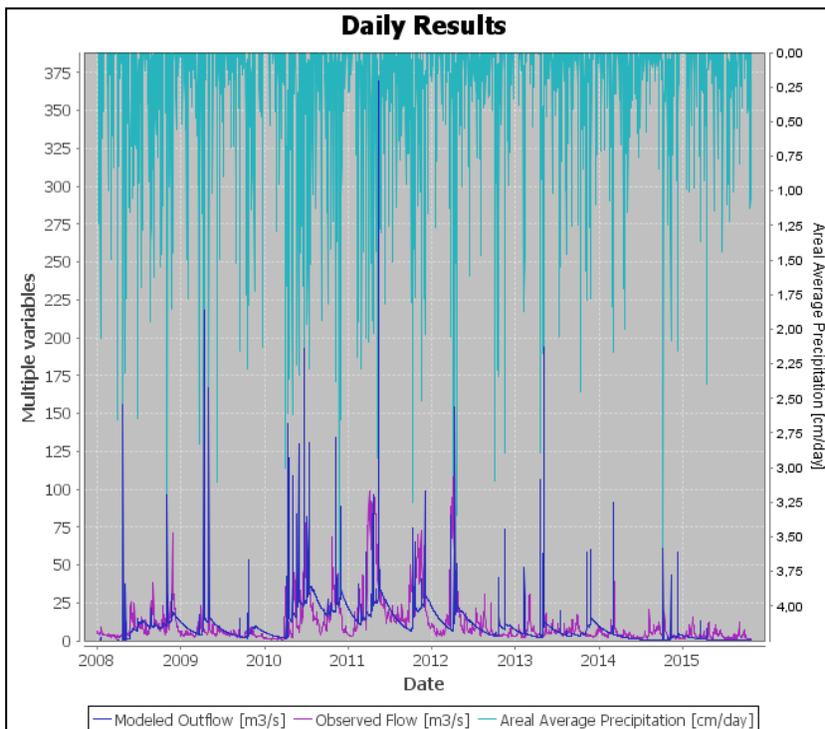


Figura 5. Resultado de la calibración realizada.

La calibración permitió reducir el error diario en 0.9 y 0.1 el mensual. La correlación bajó muy poco pero igual sigue siendo positiva y directamente correlacionada, mejoró de manera significativa la eficiencia de Nash Sutcliffe lo cual puede determinar que el modelo tiene la capacidad de explicar la realidad bajo el 44% lo que corresponde a un ajuste bueno.

El proceso de validación no pudo ser realizado debido a la falta de una serie temporal significativa (por lo menos 10 años) diferente que tuviera datos confiables, por lo tanto, con base a la calibración se realiza el proceso de cambio climático, sin la certeza que este proceso sea confiable.

3.5 Análisis Cambio Climático

A partir de los estudios de cambio climático que se ha realizado en Colombia, ya antes mencionados, se evidencia un aumento de temperatura constante y de precipitación durante los primeros 20 años y luego una disminución de ésta, por lo tanto, con los datos base de un periodo de 2008 y 2013, se realiza los siguientes escenarios de cambio climático para el año 2040.

- Escenario A: Aumento de temperatura de 1 grado centígrado y un aumento de precipitación del 10%.
- Escenario B: Aumento de temperatura de 1 grado centígrado, sin alteración de la precipitación.
- Escenario C: Aumento de temperatura en 1 grado centígrado y una disminución del 10% de la precipitación.

4 Resultados

4.1 Modelo Base

La simulación base, es el punto de partida para realizar la evaluación del cambio climático bajo diferentes escenarios, se puede observar que la precipitación oscila entre 4,8 y $7,8 \cdot 10^{-4}$ Millones de metros cúbicos, la evapotranspiración se evidencia estable bajo el rango de 3,2 y $3,5 \cdot 10^{-4}$ Mm³, la escorrentía con una variabilidad alta se encuentra entre 1 y $4,1 \cdot 10^{-5}$ Mm³, infiltración entre 1,3 y $7,3 \cdot 10^{-5}$ Mm³ y un total de caudal que esta entre 6,34 y $1,73 \cdot 10^{-1}$ Mm³ (Tabla 5).

En la Figura 6 se observa en el eje x el intervalo de tiempo de estudio que se encuentra entre 2008 y 2014, en el eje y, a la izquierda, se encuentran los valores de caudal en unidades de m³/s y al lado derecho está representando la precipitación media en cm/día, esta figura ilustra en una sola imagen las entradas y salidas en un balance hídrico viendo como las precipitaciones son la mayor influencia en la presencia de los caudales en la cuenca en los momentos de crecientes del caudal. Algo obvio, aunque también se pone de manifiesto la existencia de un caudal base que mantiene la constante de flujo del río.

Tabla 3: Balance Hídrico Escenario Base, proporcionado por el programa Hydro-BID.

Rango de datos	Precipitación Mm3	Evapotranspiración Mm3	Escurrentía Mm3	Infiltración MM3	Caudal total Mm3
2008	0.000590	0.000353	0.0000102	0.0000341	0.428
2009	0.000478	0.000344	0.0000167	0.0000510	0.677
2010	0.000786	0.000347	0.0000415	0.0001320	1.730
2011	0.000731	0.000343	0.0000244	0.0001360	1.600
2012	0.000482	0.000330	0.0000154	0.0000738	0.920
2013	0.000482	0.000323	0.0000171	0.0000436	0.634

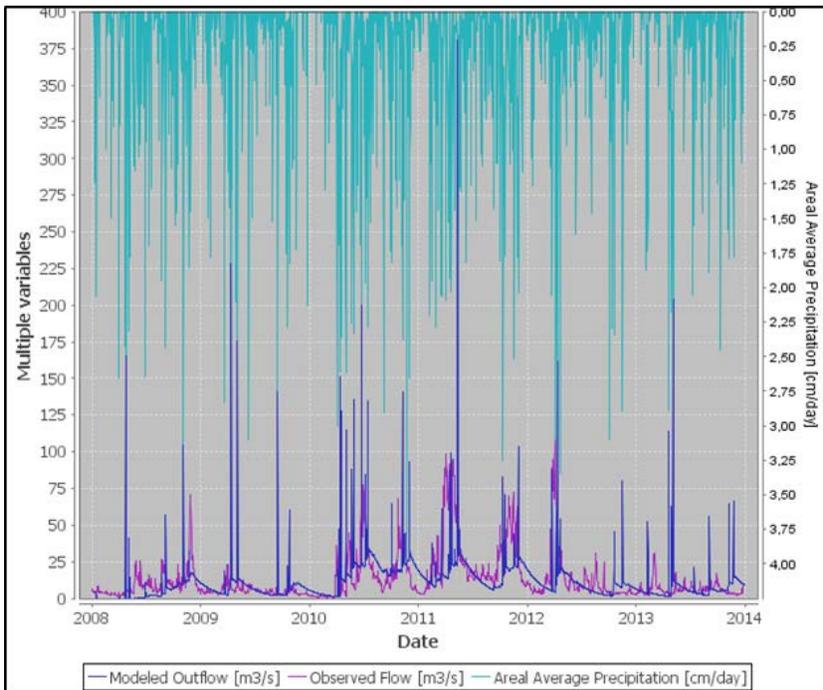


Figura 6. Escenario Base.

La comparación visual del flujo modelado y el observado muestra que la tendencia a lo largo del tiempo es en cierta coincidencia en el trazado de ambos, sin un ajuste total; sin embargo, Hydro-BID sobre-representa los picos máximos en la práctica totalidad de los sucesos de crecida.

Se puede observar en la Figura 7 que entre el 2008 y 2014 la temperatura media diaria se encuentra entre los 15 y 20 grados centígrados hasta mediados de 2012, después ella baja estando aproximadamente entre los 7 y los 17 °C al finalizar el 2014.

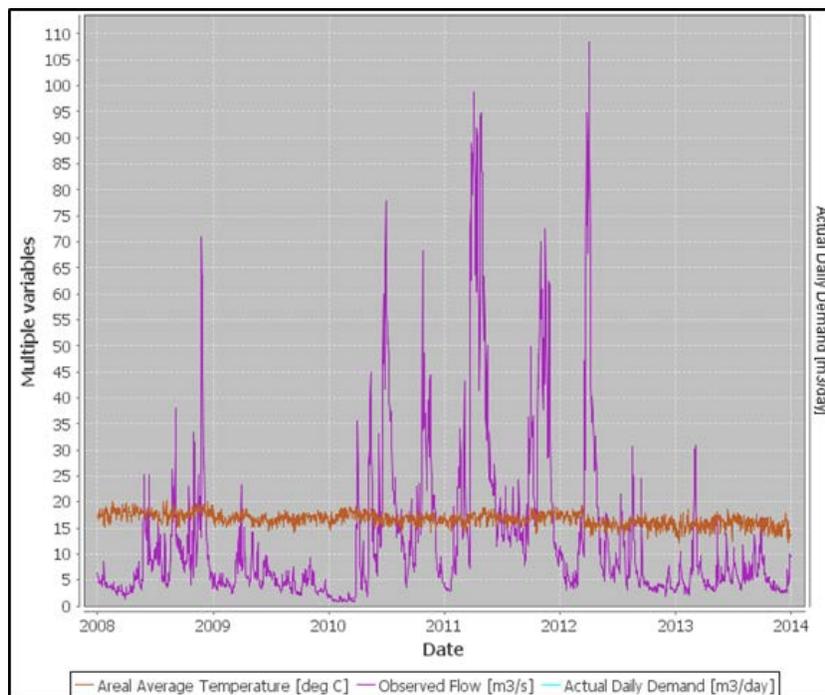


Figura 7. Escenario Base: comportamiento del caudal observado respecto a la temperatura.

Se puede identificar que entre el 2009 y el 2010 hubo una época seca y entre el año 2010 y 2011 y 2011 y 2012 se ven reflejados dos picos característicos de una precipitación bimodal, decayendo los caudales entre el primer tercio de año de 2012 hasta el 2014.

Se puede observar en la Figura 8 que durante el 2008 y el 2014 hubo precipitaciones durante la mayoría del año exceptuando a final de 2009 e inicio de 2011. Se aprecian períodos de máximas lluvias inter anuales a lo largo de los cinco

años estudiados, pero también se destaca un período más abundante en precipitaciones entre 2010 y 2012.

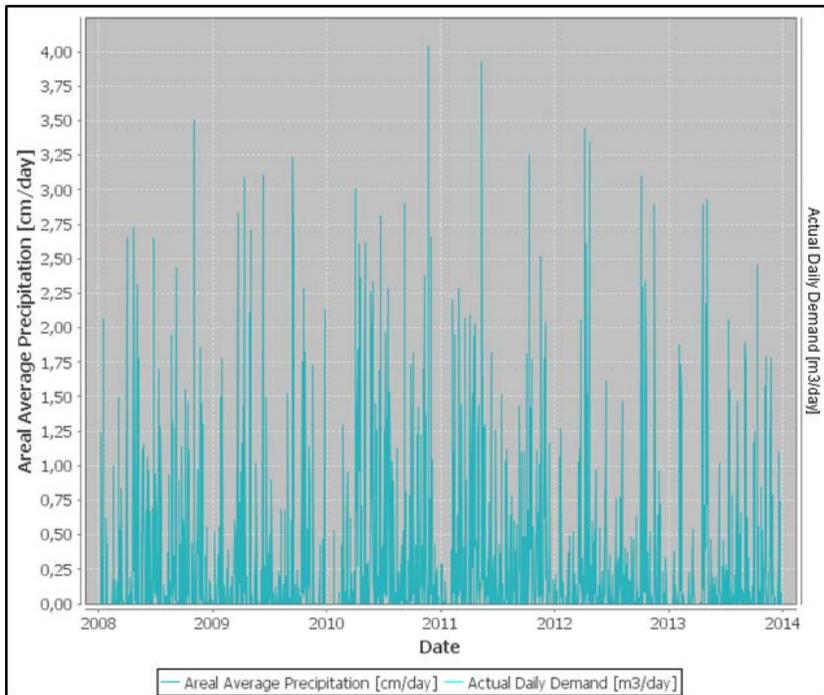


Figura 8. Comportamiento de la precipitación, Escenario Base.

La infiltración del suelo en la Figura 9 se puede correlacionar con la precipitación, como se puede observar entre el año 2010 y 2012 donde hubo mayor precipitación, también hubo mayor infiltración en el suelo. Además de reflejar las oscilaciones temporales pluviométricas, la infiltración tiene un comportamiento propio relacionado también con el potencial de almacenamiento de agua de éste y con su propia estructura porosa que permitirá una tasa de infiltración mayor. Eso queda reflejado en el gráfico en sus ondulaciones y en sus momentos de máximos, coincidiendo éstos con las máximas precipitaciones.

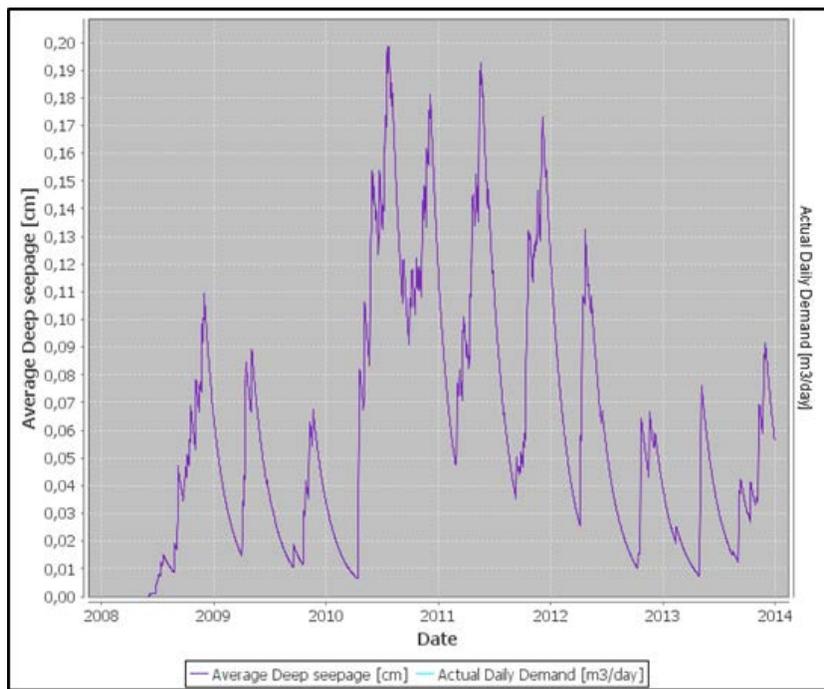


Figura 9. Comportamiento de la infiltración en Escenario Base.

4.2 Comparación de los diferentes escenarios de cambio climático con la simulación base

La Tabla 6 muestra los valores sintéticos del balance hídrico en condiciones actuales o Escenario Base (Tabla 6 D) y los Escenarios A, B y C, (Tabla 6 A, B y C respectivamente). Recordemos que el Escenario A plantea una situación de aumento de temperatura de 1°C e incremento del 10% de precipitación, mientras que el Escenario B sólo simula el aumento de temperatura en 1°C y el C se basa en el aumento de temperatura en 1 grado centígrado y una disminución del 10% de la precipitación.

En la Tabla se observa que, en los valores resumen para toda el área de estudio hay pocas diferencias entre el Escenario Base y el Escenario B, con únicamente aumento de temperatura de 1°C. Sí que se dan diferencias entre el Escenario Base y

el A, sobre todo en los incrementos de las variables más dependientes de la precipitación (escorrentía e infiltración).

Tabla 6: Balance Hídrico de los distintos Escenarios modelados por el programa Hydro-BID.

A: Escenario A. +1°C, +10% precipitación					
Rango de datos año	Precipitación Mm ³	Evapotranspiración Mm ³	Escorrentía Mm ³	Infiltración Mm ³	Caudal total Mm ³
2008	0.000627	0.000357	0.0000148	0.0000429	0.428
2009	0.000511	0.000344	0.0000197	0.0000623	0.677
2010	0.000843	0.000347	0.0000562	0.0001470	1.730
2011	0.000788	0.000347	0.0000347	0.0001530	1.600
2012	0.000525	0.000330	0.0000222	0.0000889	0.890
2013	0.000513	0.000322	0.0000234	0.0000558	0.634
B: Escenario B. +1°C					
2008	0.000590	0.000353	0.0000102	0.0000341	0.428
2009	0.000478	0.000344	0.0000167	0.0000510	0.677
2010	0.000790	0.000347	0.0000415	0.0001320	1.730
2011	0.000731	0.000347	0.0000244	0.0001360	1.600
2012	0.000482	0.000330	0.0000154	0.0000738	0.890
2013	0.000482	0.000323	0.0000171	0.0000436	0.634
C: Escenario C. +1°C, -10% precipitación					
2008	0.000513	0.000348	0.00000522	0.0000138	0.190
2009	0.000418	0.000344	0.00000899	0.0000302	0.393
2010	0.000690	0.000347	0.00002770	0.0001010	1.280
2011	0.000644	0.000347	0.00001630	0.0001060	1.220
2012	0.000430	0.000330	0.00001020	0.0000636	0.638
2013	0.000420	0.000330	0.00001030	0.0000263	0.365
D: Escenario Base-Situación actual					
2008	0.000590	0.000353	0.0000102	0.0000341	0.428
2009	0.000478	0.000344	0.0000167	0.0000510	0.677
2010	0.000786	0.000347	0.0000415	0.0001320	1.730
2011	0.000731	0.000343	0.0000244	0.0001360	1.600
2012	0.000482	0.000330	0.0000154	0.0000738	0.920
2013	0.000482	0.000323	0.0000171	0.0000436	0.634

Por el contrario las diferencias entre la Evapotranspiración y el caudal total ya no son tan significativas, siendo prácticamente las mismas entre el Escenario Base y el de cambio climático A. Un comportamiento similar presenta la simulación establecida con el Escenario C, aunque en este caso los valores obtenidos en las variables que muestran diferencias son menores, pues se plantea una disminución de la precipitación y un aumento de la temperatura.

Se observa en la Figura 10 que la mayor precipitación se da en el escenario B, el comportamiento del Escenario Base con el escenario A no tienen cambios significativos, donde el aumento de precipitación y de temperatura no darán cambios relevantes en la precipitación, el escenario más desfavorable es el C.

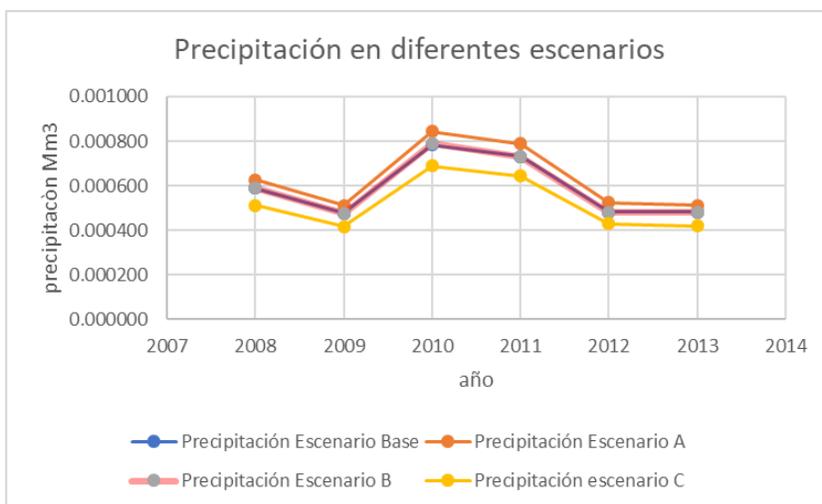


Figura 10. Precipitación diferentes escenarios.

La evapotranspiración (Figura 11) es descendente en todos los escenarios con la particularidad que siendo el C el más bajo en la precipitación, es también el que más evapotranspiración produce, siendo entre el 2012 y 2013 el año de menores cantidades.

Se puede evidenciar en la Figura 12 que la escorrentía en el escenario A es notablemente mayor, frente a los otros tres escenarios, así como en el escenario C

se observa una escorrentía con menor volumen. Al ser un valor altamente dependiente de la precipitación, su producción es también menor en el escenario C, pues es el que plantea la disminución de la precipitación en un 10%.

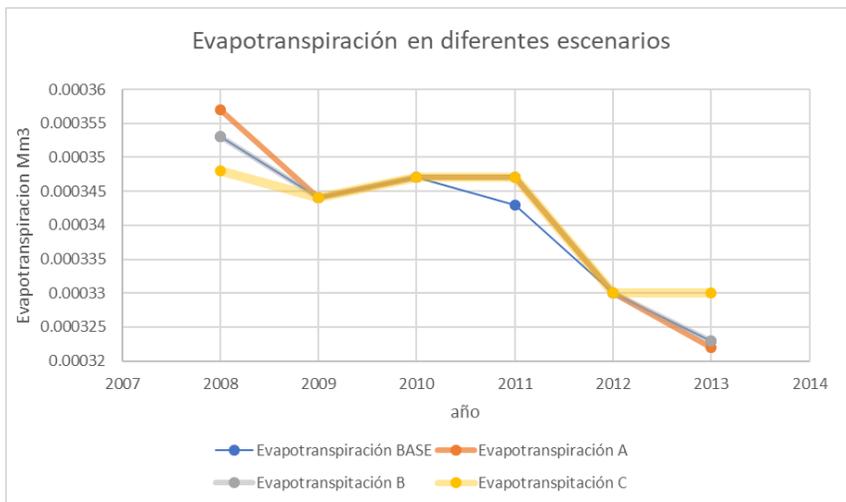


Figura 11. Evapotranspiración bajo diferentes escenarios.

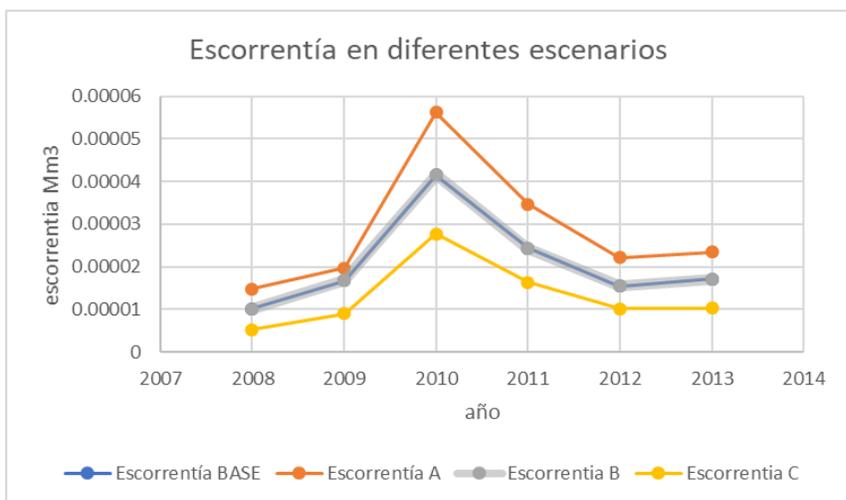


Figura 12. Escorrentía bajo diferentes escenarios.

La infiltración, al igual que la escorrentía, refleja la influencia de la precipitación planteadas en los escenarios A y C. Por tanto, se evidencia una mayor producción en el escenario A y menor en el C (Figura 13). Sin embargo, Los escenarios A y B no ven afectados en el caudal total por los diferentes escenarios de cambio climático a excepción del escenario C en donde se observa una fuerte disminución (Figura 14).

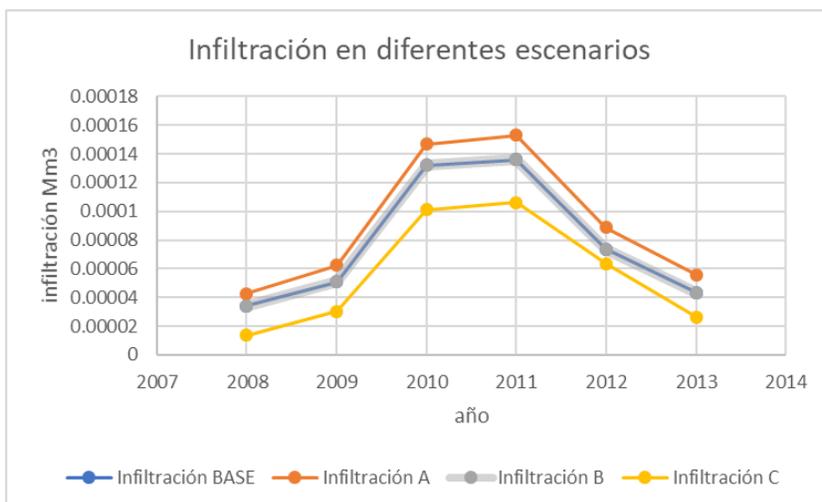


Figura 13. Infiltración bajo diferentes escenarios.

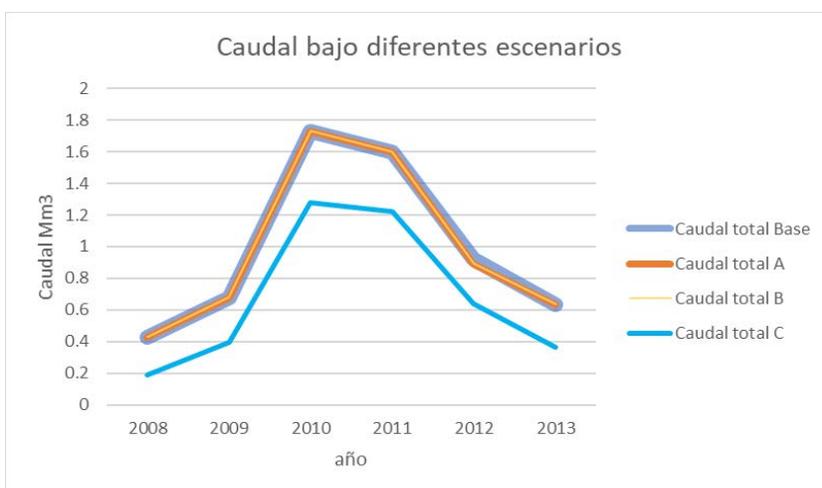


Figura 14. Caudal en diferentes escenarios.

A partir de los gráficos en comparación del comportamiento de los caudales de cada uno de los escenarios, bajo el rango de temperatura media diaria en la Figura 15, se puede observar que no son notablemente diferenciadores, esto podría explicarse por las aportaciones de las aguas subterráneas del lugar.

Sin embargo, debería también tenerse en cuenta que, aunque la temperatura puede tener cierta incidencia en las pérdidas hídricas por Evapotranspiración, su significado en el régimen de caudales es más relevante si se tiene en cuenta su función de ajuste de las fracciones de agua que no se convertirán en escorrentía, pues en los casos de aumentos de los caudales debería considerarse los volúmenes de precipitación que se aportan por escorrentía superficial, además de los flujos o caudales base.

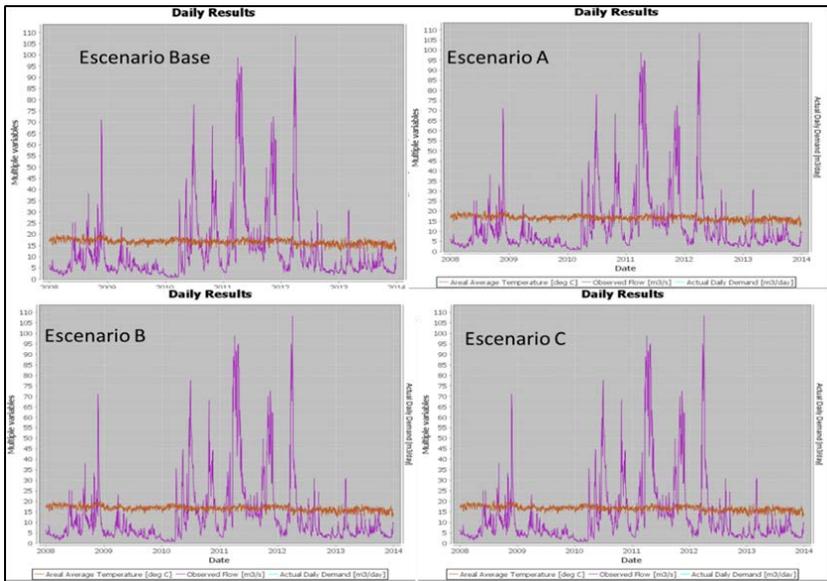


Figura 15. Diferentes escenarios con respecto al caudal observado y la temperatura.

En la Figura 16 se puede identificar que el escenario A, en comparación con el Escenario Base, presenta un aumento de la precipitación de alrededor de 0,05 cm/día aproximadamente, entre el escenario A y el B se evidencia un aumento de

precipitación entre el 0,003 cm/día en el escenario B, entre el escenario B y C se identifica una disminución de 0,005 cm/día en el escenario C. Viendo que la temperatura juega un papel importante en la precipitación, evidenciando que entre el Escenario Base y el escenario B hay un aumento en la precipitación con el aumento de la temperatura específicamente.

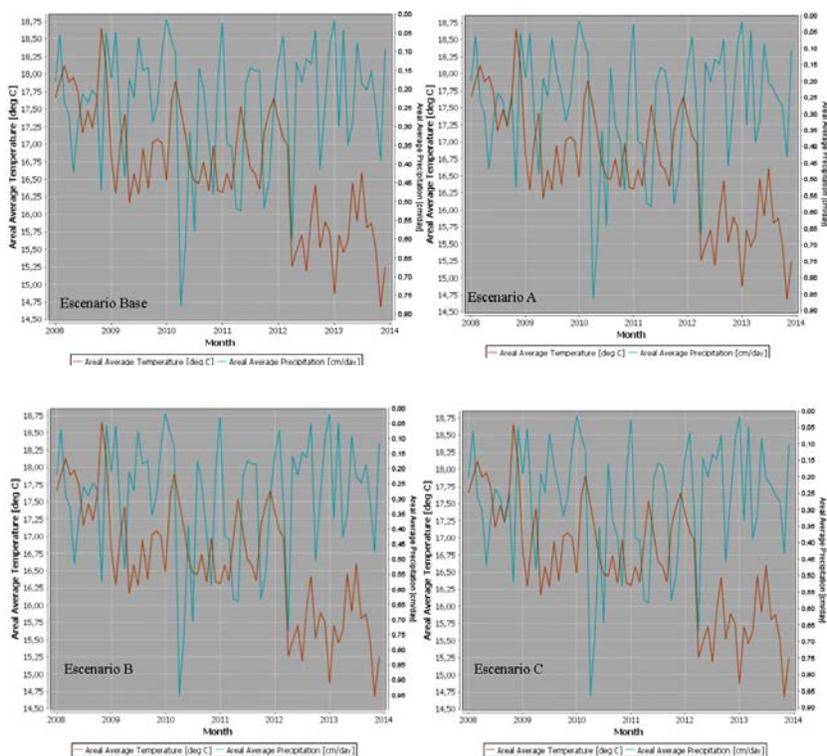


Figura 16. Temperatura y precipitación bajo diferentes escenarios.

Como se puede observar en la Figura 17 entre el Escenario Base y el A, se puede identificar un cambio significativo en la escorrentía de 0,22 cm/día, así como se evidencia elevado el escenario B con aumentos de escorrentía de 0,04 cm/día con respecto al Escenario Base, en el escenario C se puede evidenciar una escorrentía menor a los escenarios A y B pero no menor al Escenario Base.

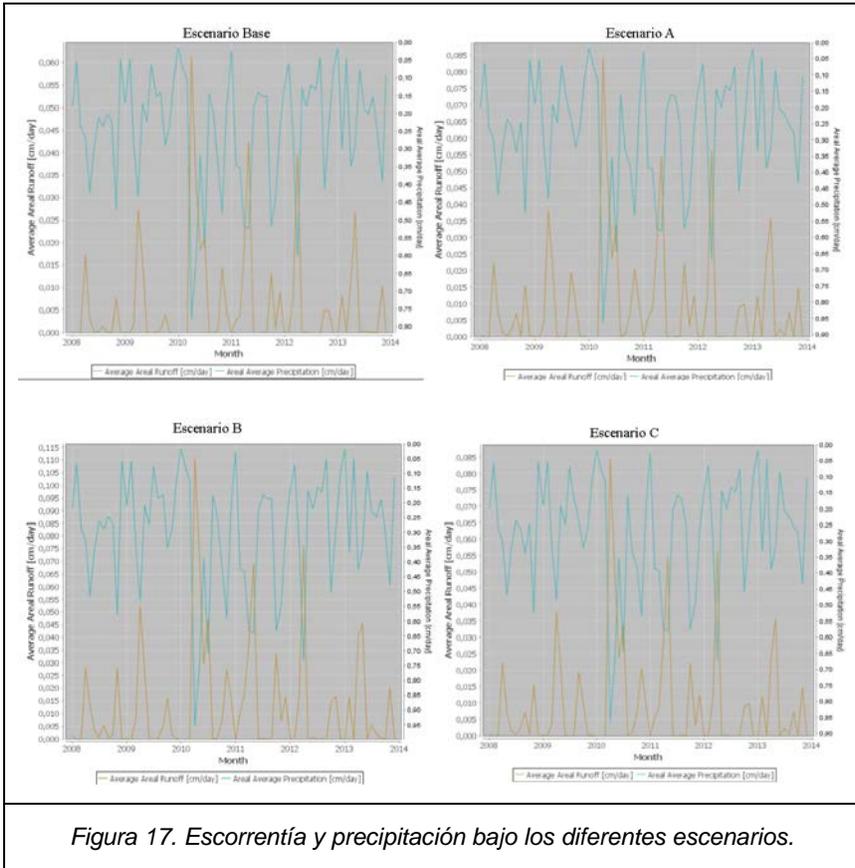


Figura 17. Escorrentía y precipitación bajo los diferentes escenarios.

5 Conclusiones

Sobre los resultados obtenidos bajo los diferentes escenarios de cambio climático, se puede establecer que la peor situación a la que se enfrentaría la cuenca del río Chicamocha es bajo el escenario C, el cual aumenta la temperatura y disminuye la precipitación, viendo alteraciones en las aportaciones de caudal total.

La calibración y la exactitud del modelo dependen del modelador y la habilidad que tenga para dominar el mismo. Se requiere contar con datos suficientes y precisos ya que los rangos en los mismos, en el caso de Colombia, no son completos ni suficientes lo que generan dificultades en el aprovechamiento de la herramienta.

Así mismo, los valores variarían de manera importante teniendo en cuenta la influencia del uso del suelo, infiltración, pendiente, entre otros.

Con base a la información aportada por la Corporación autónoma de Boyacá, la cuenca alta del río Chicamocha tiene como demanda $4.5 \cdot 10^{11}$ millones de metros cúbicos al año y viendo la disponibilidad de agua que se tiene estas necesidades son satisfechas sin alterar los caudales ecológicos.

Es necesario para futuros estudios tener en cuenta el proceso de validación con series de tiempo significativas de caudal, precipitación y temperatura, que sean confiables y puedan desarrollar la realidad.

El departamento de Boyacá, con respecto a la cuenca alta de Chicamocha, no se encuentra listo para Hydro-BID, ya que la falta de datos es significativa y el proceso de recopilación de estos, depende de varias entidades como el IDEAM, Corporación Autónoma de Cundinamarca, Corporación Autónoma de Boyacá, Empresas Públicas de Boyacá, Universidades, entre otros, los cuales tienen estaciones meteorológicas, pero sus datos son variables y poco confiables, ya sea por ausencia de datos, estaciones suspendidas o de difícil acceso.

Siendo Hydro-BID una herramienta que pretende mejorar las condiciones de manejo de las realidades de la presencia de agua en América latina, se debe priorizar la implementación de esta, como una forma eficiente de medir el impacto de los cambios climáticos y poder determinar acciones que limiten las consecuencias de los desastres naturales.

La herramienta Hydro-BID implementada de manera correcta y teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada suelo será un instrumento importante en la proyección de cosechas y tiempo de postcosecha, así como también en la planeación de cambio de actividades económicas derivadas de la disponibilidad del recurso agua.

Se requiere capacitar a personas en el manejo correcto y cuidadoso de las estaciones de tal manera que los datos arrojados por estas sean confiables y

suficientes, o de otra manera el programa Hydro-BID no podría aportar de manera adecuada el análisis de gestión de los recursos hídricos que propone.

No se puede realizar la validación del modelo debido a la falta de datos en la cuenca de aguas abajo (Capitanejo), ya que cuenta con 5 años consecutivos de esta información, debiéndose emplear parte de la serie para el ajuste inicial del modelo; por lo tanto, se debe contar con información más robusta para darle confirmación a dicha caracterización de cambio climático en la cuenca alta del Río Chicamocha.

La falta de datos confiables y la carencia de estudios hacen que el proceso de planificación territorial de la Corporación Autónoma de Boyacá, sea incierto. Al estar éste altamente determinado por el crecimiento poblacional y económico del departamento, lo que podría ejercer grandes presiones sobre la disponibilidad del recurso en el futuro.

Bibliografía

- Berestovoy, V. (2018). Balance hídrico de la cuenca Mbóí Caé asociado a El Niño: oscilación del Sur mediante el sistema Hydro-BID. *Revista Científica Estudios e Investigaciones*, 12. <https://doi.org/10.26885/rcei.foro.2017.12>
- Cabrera, J. (s. f.). Calibración de Modelos Hidrológicos. 7. Recuperado de <http://sie.car.gov.co:80/handle/20.500.11786/33708>
- CORPOBOYACA, Universidad Nacional de Colombia, y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2006). PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA. I, 669.
- Gaviria Muñoz. (s. f.). "Si Colombia no se adapta al cambio climático perderá \$3,8 billones anuales hasta el 2100": Simón Gaviria Muñoz. Recuperado 14 de abril de 2019, de [https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CSi-Colombia-no-se-adapta-al-cambio-clim%C3%A1tico-perder%C3%A1--\\$3,8-billones--anuales--hasta-el-2100%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CSi-Colombia-no-se-adapta-al-cambio-clim%C3%A1tico-perder%C3%A1--$3,8-billones--anuales--hasta-el-2100%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx)
- Jaramillo-Robledo, A., Chaves-Córdoba, B. (2000). DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ANALIZADA MEDIANTE CONGLOMERACIÓN ESTADÍSTICA. 12.

Caracterización hidrológica de la cuenca del río Chicamocha / 141

- Martínez Pélaez, G., Gómez, G., Cárdenas, M., Ordoñez, N. (Eds.) (2005). Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá. T. 1: ... (Vols. 1-III). Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Pabón Caicedo, J. D. (2011). El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
Recuperado de <http://sie.car.gov.co:80/handle/20.500.11786/33708>
- Pabón-Caideco, J., Eslava-Ramírez, J., Gómez-Torres, R. (2001). Generalidades de la distribución espacial y temporal de la temperatura del aire y de la precipitación en Colombia. *Meteorología Colombiana*, 4: 47:59.
- Rincón, L. N. G., Camargo, C. A. C. (2017). Effect of Climate Change on Rainfall in the Upper Basin of Chicamocha River in the Period of 1980-2012. 10.
- Roth, G. D. (1979). *Meteorología Una Guía Práctica Para El Excursionista, El Agricultor Y El Navegante*. Barcelona: Omega.
- Valencia-Duarte, J., Ortiz, L. N. T., Ríos, O. V. (2012). Dinámica de la vegetación en un enclave semiárido del río Chicamocha, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2).
<https://doi.org/10.21068/bc.v13i2.262>
- Zinck, J. A. (2012). *Geo pedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Enschede: ITC.