

**SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LEBRIJA MEDIANTE EL  
MODELO DE GRANDES BACÍAS: CONFIGURACIÓN DE UN MODELO REGIONAL  
PARA LA GESTION LOCAL DE CUENCAS**

**PRESENTADO POR**  
**EVELYN BERMUDEZ GARCÍA**  
**ID: 000321247**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**  
**SECCIONAL BUCARAMANGA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**2021**

**SIMULACION HIDROLOGICA DE LA CUENCA DEL RIO LEBRIJA MEDIANTE EL  
MODELO DE GRANDES BACIAS: CONFIGURACIÓN DE UN MODELO REGIONAL  
PARA LA GESTION LOCAL DE CUENCAS**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERA CIVIL**

**EVELYN BERMUDEZ GARCÍA**

**ID: 000321247**

**DIRECTOR**

**PhD. DIEGO ALEJANDRO GUZMÁN ARIAS**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA**

**SECCIONAL BUCARAMANGA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**2021**

**Dedicatoria**

A Dios, creador de los cielos y la tierra, fuente de sabiduría y ciencia.

A mi madre por su apoyo incondicional, por enseñarme el valor de la disciplina.

A mi familia y en memoria de mi tío, Hebert de Jota García, quien, aunque ya no nos acompaña, supo compartir su pasión por la ingeniería y nunca se negó a enseñarnos.

## **Agradecimientos**

Agradezco primeramente a Dios, por su gracia que abunda en gran manera y por su fidelidad, porque en definitiva sus planes son mejores que los nuestros. Le agradezco por permitirme adquirir conocimiento y capacitarme durante estos años para poder servir de una mejor manera a las personas.

A mi madre y mi familia, por su amor, compañía y apoyo durante todo el proceso de aprendizaje.

A mis amigos por su incondicionalidad, por animarme a perseverar en todo momento sin importar la distancia ni la diferencia horaria.

Agradezco a mi director de proyecto, Diego A. Guzmán, por su guía durante todo el desarrollo hasta la culminación de esta investigación, por su paciencia en medio de las adversidades, por el conocimiento transmitido y por animarme a enfrentar nuevos retos.

A los diferentes docentes que durante este periodo de formación transmitieron sus conocimientos y aportaron a mi desarrollo profesional.

Al IDEAM, CDMB, amb por la información brindada para llevar a cabo este trabajo.

Agradezco también al grupo de Hidrología de Gran Escala de la Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por suministrar el software además de brindar asesoramiento.

## TABLA DE CONTENIDO

GLOSARO.....	XI
<b>1 ASPECTOS INTRODUCTORIOS .....</b>	<b>1</b>
1.1    Introducción .....	1
1.2    Delimitación Del Problema.....	2
1.3    Antecedentes .....	4
1.4    Justificación .....	7
1.5    Objetivos .....	8
1.6    Marco Conceptual.....	9
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>28</b>
2.1    Etapa I. Revisión bibliográfica, definición del área de estudio y su información de entrada requerida para el modelo .....	31
2.2    Etapa II. Construcción del banco de datos IPH .....	44
2.3    Etapa III. Ingreso de la información al MGB y su primera simulación.....	49
2.4    Etapa IV. Calibración y validación del modelo.....	57
2.5    Etapa V. Evaluación de Escenarios de Clima Futuro .....	61
<b>3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>67</b>
3.1    Características Morfológicas de la Cuenca Hidrográfica del Río Lebrija .....	67
3.2    Resultados Obtenidos del Modelamiento .....	69
3.3    Resultados de la Simulación para escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 .....	76
<b>4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>5 REFERENCIAS.....</b>	<b>88</b>

	V
APÉNDICE A.....	98
APÉNDICE B.....	99
Parámetros de suelo URH AS.....	99
Parámetros de suelo URH IGAC.....	101
APÉNDICE C.....	104

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 . <i>Cuenca del Río Lebrija</i>	3
Figura 2. <i>Curva hipsométrica y su relación con la fase de vida de la cuenca</i>	13
Figura 3. <i>Esquema representativo del funcionamiento del Modelo de Grandes Bacías</i>	19
Figura 4. <i>Elementos para tener en consideración como estrategia para la calibración de un modelo hidrológico</i>	23
Figura 5. <i>Metodología implementada en el proyecto (Etapa I-III)</i>	29
Figura 6. <i>Metodología implementada en el proyecto (Etapa III- V)</i>	30
Figura 7. <i>Localización geográfica de la zona de estudio, cuenca del Río Lebrija</i>	31
Figura 8. <i>Modelo Digital de Elevación (MDE), cuenca del Río Lebrija</i>	33
Figura 9. <i>Mapa de URH para América del Sur</i>	34
Figura 10. <i>Mapa de uso del suelo (sin clasificar), cuenca del Río Lebrija</i>	35
Figura 11. <i>Mapa del tipo de suelo (clasificado), cuenca del Río Lebrija</i>	35
Figura 12. <i>Ejemplo de formato ASCII para precipitación</i>	40
Figura 13. <i>Descarga de datos Climatic Research Unit</i>	41
Figura 14. <i>Ejemplo de formato ASCII para datos de caudal observado</i>	42
Figura 15. <i>Serie de tiempo de caudal observado en la estación San Rafael</i>	42
Figura 16. <i>Serie de tiempo de caudal observado en la estación Angosturas</i>	43
Figura 17. <i>Remoción de depresiones topográficas del MDE</i>	44
Figura 18. <i>Delimitación de la cuenca hidrográfica</i>	45
Figura 19. <i>Delimitación de las mini cuencas, en la cuenca del Río Lebrija</i>	46

Figura 20. <i>Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica extraído del Mapa de América del Sur</i>	47
Figura 21. <i>Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica basado en información nacional</i>	48
Figura 22. <i>Pre-Procesamiento en IPH Hydro Tools para generación de archivo MINI.gtp</i>	49
Figura 23. <i>Ventana de interpolación de la información de precipitación</i>	50
Figura 24. <i>Precipitación media anual por mini cuenca, en la cuenca del Río Lebrija</i>	51
Figura 25. <i>Pestaña para creación de medias de clima</i>	52
Figura 26. <i>Ventana para creación de datos de caudal observado</i>	53
Figura 27. <i>Pestaña para establecer los parámetros fijos del modelo</i>	54
Figura 28. <i>Ventana para introducir los parámetros de suelo</i>	55
Figura 29. <i>Creación de un proyecto para simulación</i>	56
Figura 30. <i>Primera corrida del modelo, MC AS</i>	57
Figura 31. <i>Ventana para creación de parámetros para la calibración automática</i>	60
Figura 32. <i>Curva de área-elevación para la totalidad de la cuenca del Río Lebrija</i>	68
Figura 33. <i>Gráfico de caudal observado vs caudal simulado para los cuatro modelos en el punto de aforo de San Rafael, primera simulación</i>	70
Figura 34. <i>Caudal observado vs caudal simulado, Estación San Rafael periodo (1984-2003)</i>	72
Figura 35. <i>Caudal observado vs caudal simulado, Estación San Rafael periodo (2004-2012)</i>	73
Figura 36. <i>Curva de caudales clasificados para el periodo 2004-2012</i>	73
Figura 37. <i>Cambios en la temperatura media de la cuenca para escenarios proyectados</i>	78
Figura 38. <i>Anomalía en la precipitación media de la cuenca para escenarios proyectados</i>	79
Figura 39. <i>Caudal simulado bajo escenario futuro RCP 4.5, San Rafael</i>	81
Figura 40. <i>Caudal simulado bajo escenario futuro RCP 8.5, San Rafael</i>	82

Figura 41. *Caudal medio mensual interanual simulado, comparación de escenarios* 84

Figura 42. *Mapa de localización de los puestos hidrometeorológicos sobre la cuenca de estudio*

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clases de forma de acuerdo con el índice de compacidad.....	11
Tabla 2. Clasificación de modelos hidrológicos.....	17
Tabla 3. Evaluación de desempeño del coeficiente Nash-Sutcliffe.....	24
Tabla 4. Evaluación de desempeño del índice RSR.....	25
Tabla 5. Evaluación de desempeño del índice PBIAS.....	25
Tabla 6. Clasificación del desempeño, estadísticas recomendadas.....	26
Tabla 7. Archivos de entrada para modelamiento hidrológico utilizando el plugin IPH-Hydro Tools.....	32
Tabla 8. Información de entrada para el modelo hidrológico MGB.....	36
Tabla 9. Ejemplo de la información contenida en el archivo de descripción de las URHs.....	38
Tabla 10. Localización de las estaciones pluviométricas.....	39
Tabla 11. Ventana de tiempo para la calibración y validación del modelo.....	49
Tabla 13. Análisis de sensibilidad de los parámetros de suelo.....	58
Tabla 14. Periodos para simulación de escenarios RCP.....	63
Tabla 15. Indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño de los procedimientos de corrección de sesgo.....	65
Tabla 16. Parámetros morfológicos de la cuenca del Río Lebrija.....	67
Tabla 17. Desempeño de los modelos tras la primera simulación para paso diario.....	69
Tabla 18. Desempeño de los modelos para los periodos de calibración y validación en escala diaria.....	71
Tabla 19. Oferta hídrica promedio medida al punto de salida de cada subcuenca.....	74

Tabla 20. Oferta hídrica promedio para cada subcuenca (excluyente).....	75
Tabla 21. Impacto del cambio climático sobre el caudal medio en los puntos de salida de las subcuencas y en San Rafael. ....	80
Tabla 22. Q90 en los diferentes periodos de simulación, caudal de salida en las subcuencas .....	83
Tabla 23. Parámetros de suelo Subcuenca 1 .....	99
Tabla 24. Parámetros de suelo Subcuenca 2 .....	99
Tabla 25. Parámetros de suelo Subcuenca 3 .....	100
Tabla 26. Parámetros de suelo Subcuenca 4 .....	100
Tabla 27. Parámetros de suelo Subcuenca 5 .....	101
Tabla 28. Parámetros de suelo Subcuenca 1 .....	101
Tabla 29. Parámetros de suelo Subcuenca 2 .....	102
Tabla 30. Parámetros de suelo Subcuenca 3 .....	102
Tabla 31. Parámetros de suelo Subcuenca 4 .....	103
Tabla 32. Parámetros de suelo Subcuenca 5 .....	103
Tabla 33. Evaluación del método de corrección de sesgo .....	104

## GLOSARO

**AEE.** Agencia Espacial Europea por sus siglas en español, es mejor conocida como ESA o ASE.

**amb.** Acueducto metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P.

**AR5.** Informe número cinco del IPCC comunicado en el año 2014 (IPCC, n.d.).

**AS.** Abreviatura para América del Sur.

**CDMB.** Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.

**CMHyd.** Herramienta desarrollada para preparar datos simulados de cambio climático, sus siglas corresponden a *Climate Model data for Hydrologic Modeling* (Rathjens et al., 2016).

**CMIP5.** Se refiere a *Coupled Model Intercomparison Project* (Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados) en su quinta versión, donde participaron treinta y cinco modelos para la evaluación de dichos modelos en su representación de la variabilidad climática, cambio climático, etc (Taylor et al., 2012).

**CORDEX.** Es sistema perteneciente al Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, cuyo propósito es el de evaluar el rendimiento de los modelos climáticos regionales (*CORDEX RCM List – Cordex*, n.d.).

**CPTEC INPE.** Se trata de la institución brasileña Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC- INPE, n.d.).

**CRL.** Abreviatura para Cuenca del Río Lebrija.

**CRU.** Climatic Research Unit, es una unidad de investigación perteneciente a la universidad de Reino Unido University of East Anglia. En el documento se la menciona como fuente de datos de clima (University of East Anglia, n.d.).

**DJF.** Periodo que comprende los meses de diciembre, enero y febrero, corresponde al verano austral.

**DM.** Sigla asignada para el método *Distribution Mapping* el cual es utilizado para la corrección de sesgo y trabaja a partir de las medias mensuales del clima con el fin de formar una función de distribución acumulativa CDF y efectuar las correcciones conforme a la relación de las probabilidades (Teutschbein & Seibert, 2012).

**FAO.** Hace referencia a la “agencia de las Naciones Unidas que lidera el esfuerzo internacional para poner fin al hambre”. En español su nombre es Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, n.d.).

**GIRH.** Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

**HadGEM2-ES.** Abreviatura para el Modelo Climático Global desarrollado por el Hadley Centre de Reino Unido, UK Met Office Hadley Centre Earth System Model (Chou et al., 2014).

**HD.** Método de propagación del flujo basado en las ecuaciones de Saint-Venant aplicando la ecuación desarrollada por Bates et al., (2010).

**HD AS.** Abreviatura para reconocer la aplicación del método de propagación *Hidrodinámico* o *Inercial*, integrando el mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica de América del Sur.

**HD IGAC.** Abreviatura para reconocer la aplicación del método de propagación *Hidrodinámico* o *Inercial*, integrando el mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica basado en la combinación de mapas de uso del suelo y cobertura del IGAC

**HGE.** Grupo de investigación de Hidrología de Gran Escala de la Universidade Federal do Río Grande do Sul de Brasil (UFRGS, 2020).

**HydroBID.** “Es una herramienta del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) creada para dar soporte a la región de América Latina y el Caribe en el manejo y planificación del recurso hídrico” (Banco Interamericano de Desarrollo, n.d.).

**IAF.** Abreviatura para Índice de área foliar.

**IDEAM.** Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Se trata de la institución pública colombiana encargada del apoyo técnico y científico al Sistema Nacional Ambiental.

**IGAC.** Entidad colombiana encargada de la información geográfica, catastral y agrológica del país, Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

**IPCC.** Se trata del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, hace parte del cuerpo de las Naciones Unidas para la investigación en lo relacionado al cambio climático (IPCC, n.d.).

**IPH Hydro Tools.** Herramienta desarrollada por el Instituto de Pesquisas Hidráulicas de la UFRGS (V. A. Siqueira et al., 2016).

**LOCI.** Sigla asignada para el método *Local Intensity Scaling of precipitation* el cual es utilizado para la corrección de sesgo y trabaja a partir de las medias mensuales de la precipitación, pero adicionalmente toma en cuenta la frecuencia e intensidad (wet-days), como menciona Teutschbein & Seibert, (2012)

**LS.** Sigla asignada para el método *Linear Scaling*, uno de los más sencillos, el cual realiza la corrección de sesgo a partir de las medias mensuales, y puede ser implementado sobre variables como la precipitación mediante el producto de un factor y la información a corregir, o en su forma aditiva para variables como la temperatura (Teutschbein & Seibert, 2012).

**MC.** Método de propagación del flujo *Muskingum- Cunge*.

**MC AS.** Abreviatura para reconocer la aplicación del método de propagación *Muskingum- Cunge* integrando el mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica de América del Sur.

**MC IGAC.** Abreviatura para reconocer la aplicación del método de propagación *Muskingum- Cunge* integrando el mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica basado en la combinación de mapas de uso del suelo y cobertura del IGAC.

**MCG.** Modelo Climático Global, también se conoce como Modelo de Circulación General.

**MCR.** Modelo Climático Regional, son el escalamiento dinámico de los modelos globales.

**MDE.** Modelo Digital de Elevación, se caracteriza por ser una imagen o ráster en el que se representan las elevaciones respecto al nivel medio del mar.

**MGB.** Recibe este nombre por sus siglas en portugués como *Modelo de Grandes Bacías*, lo que traduce a Modelo de Grandes Cuencas.

**MIROC5.** Abreviatura para el Modelo Climático Global desarrollado por The University of Tokyo Center for Climate System Research, National Institute for Environmental Studies, Japan, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Frontier Research Center for Global Change (Chou et al., 2014).

**MPI-ESM-LR.** Abreviatura para el Max- Plank- Institute Earth System Model, un modelo climático global utilizado en el CMIP5 (Giorgetta et al., 2013).

**OCDE.** Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE, 2015).

**POMCA.** Es el instrumento de planificación para la gestión de cuencas, se trata de un documento denominado Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas.

**PROJETA.** Plataforma para el acceso al conjunto de datos de las proyecciones de cambio climático escaladas dinámicamente por el modelo Eta-INPE (Hölbig et al., 2018).

**PWTR.** Sigla asignada para el método *Power Transformation of Precipitation*, el cual recurre a una corrección de tipo exponencial (Teutschbein & Seibert, 2012).

**QGIS.** Sistema de Información Geográfico utilizado para efectos de este documento. Se trata de software libre.

**QOBS.** Hace referencia al caudal observado en la estación de aforo.

**RCP.** Estas siglas corresponden al inglés *Representative Concentration Pathways*, es decir, las trayectorias representativas de concentración las cuales describen un posible volumen de gases de efecto invernadero (GHG) emitidos en los años futuros.

**SIG.** Siglas para definir Sistemas de Información Geográfica.

**SRTM.** Sus siglas indican el nombre *Shuttle Radar Topography Mission*, es la misión desarrollada por la NASA junto con la NGA, para obtener un mapa digital de elevación de gran parte del globo.

**SWAT.** Modelo hidrológico, que recibe su nombre de sus siglas en inglés *The Soil and Water Assessment Tool*.

**TRMM.** Tropical Rainfall Measuring Mission, es la Misión de Medición de Lluvias Tropicales, un trabajo articulado entre la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa JAXA y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio NASA.

**UFRGS.** Es la Universidad Federal del Río Grande del Sur (la Universidade Federal do Rio Grande do Sul) de Brasil.

**HRC.** Hace referencia a las mismas Unidades de Respuesta Hidrológica. Este término se utiliza debido a que aparece en el software como *Hydrologic Response Classes*.

**URH.** Unidad de Respuesta Hidrológica, constituida generalmente por la unión de características comunes que surgen de la combinación de cobertura y tipo de suelo.

**RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO**

**TITULO:** SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO LEBRIJA MEDIANTE EL MODELO DE GRANDES BACÍAS: CONFIGURACIÓN DE UN MODELO REGIONAL PARA LA GESTION LOCAL DE CUENCAS

**AUTOR(ES):** Evelyn Bermúdez García

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Diego Alejandro Guzmán Arias

**RESUMEN**

El área de estudio de la cuenca del Río Lebrija, situada en el noreste de Colombia, es una zona de desarrollo socioeconómico y agroindustrial, la cual goza de gran biodiversidad y de variedad de ecosistemas. Sin embargo, esta parte del territorio representa un reto para la modelación hidrológica debido a la complejidad de su relieve y la baja densidad de medición con relación a su área. Este trabajo tiene como objetivo evaluar el rendimiento del MGB (Modelo de Grandes Bacías) como modelo hidrológico alternativo y analizar el impacto del cambio climático sobre la oferta hídrica de la cuenca. La metodología consideró cinco etapas, donde la primera fue conocer el modelo en su estructura, entradas y salidas. La segunda y tercera etapa cubrieron las actividades de modelación y la primera ejecución, donde se trabajaron cuatro configuraciones distintas basadas en el uso de dos mapas de URH y dos métodos de propagación del flujo diferentes. La cuarta etapa comprendió los procesos de calibración y validación, donde se evaluó el desempeño mediante los índices Nash-Sutcliffe, PBIAS y RSR. Posterior a ello, en la última etapa, se evaluó el impacto del cambio climático a partir de los datos del ensamble Eta MIROC5, escenarios RCP 4.5 y 8.5 para el periodo proyectado (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2099). Los resultados obtenidos muestran un desempeño no satisfactorio para casi todas las configuraciones, excepto MCIGAC, la cual se clasificó dentro del rango satisfactorio tanto para el periodo de calibración como para el de validación. Los resultados bajo los escenarios futuros mostraron un aumento de la temperatura y una disminución generalizada de las precipitaciones en la cuenca. La disponibilidad de agua se vio gravemente afectada, ya que se identificó una reducción superior al 60% en la descarga del río y del caudal base.

**PALABRAS CLAVE:**

Modelamiento hidrológico, cambio climático, MGB, disponibilidad hídrica, Río Lebrija

**V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO**

**GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** HYDROLOGICAL SIMULATION OF THE LEBRIJA RIVER BASIN USING THE MODELO DE GRANDES BACÍAS: CONFIGURATION OF A REGIONAL MODEL FOR LOCAL BASIN MANAGEMENT.

**AUTHOR(S):** Evelyn Bermúdez García

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Diego Alejandro Guzmán Arias

**ABSTRACT**

The study area of the Lebrija river basin, located in north-eastern Colombia, is an area of socio-economic and agro-industrial development, which has great biodiversity and a variety of ecosystems. However, this part of the territory represents a challenge for hydrological modelling due to the complexity of its relief and the low density of measurement concerning its area. This work aims to evaluate the performance of MGB (Modelo de Grandes Bacías) as an alternative hydrologic model and to analyse the impacts of climate change on the water supply of the basin. The methodology considered five stages, where the first step was getting to know the model on its structure, inputs, and outputs. The second and third stages covered the modelling activities and the first run, where four different configurations were worked out based on the use of two different HRU maps and two different flow propagation methods. The fourth stage comprised the calibration and validation processes, where performance was evaluated using Nash-Sutcliffe, PBIAS, and RSR indices. Subsequently, in the last stage, the impact of climate change was assessed using data from the Eta MIROC5 ensemble, RCP 4.5 and 8.5 scenarios for the projection period (2011-2040, 2041-2070, and 2071-2099). The results obtained show unsatisfactory performance for almost all the configurations, except MC- IGAC, which is classified within satisfactory range for both, the calibration and validation periods. The results under future scenarios showed an increase in temperature and a generalised decrease in the rainfall over the basin. Water availability was severely affected, as a reduction of more than 60% in river discharge and base flow was identified.

**KEYWORDS:**

Hydrological modelling, climate change, MGB, water availability, Lebrija river basin

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## 1 ASPECTOS INTRODUCTORIOS

### 1.1 Introducción

La Cuenca del Río Lebrija pertenece a la macrocuenca Magdalena-Cauca y se localiza en su parte media, comprende una porción de los departamentos del Cesar, Norte de Santander y Santander. Es una cuenca de gran importancia para la región, pues en ella tienen lugar actividades económicas como la ganadería, agricultura, minería, entre otras. Se caracteriza por abarcar diferentes elevaciones y tipos de suelo como zonas montañosas, de lomerío, piedemonte, planicie y valle aluvial. En ella se encuentran ecosistemas de páramo y complejos de humedales, los cuales la hacen relevante en términos de gestión hídrica.

Los estudios realizados en esta cuenca han considerado principalmente los sectores localizados en su parte alta y media, concentrándose en las cuencas Río de Oro y Suratá. También han sido estudiadas sus subcuencas principales individual e integralmente (CDMB, n.d.; Nalesso, 2019).

Este documento se enfoca en el modelamiento hidrológico de la totalidad de la cuenca utilizando como herramienta el *Modelo de Grandes Bacías*, MGB, con el fin de determinar la producción hídrica de la cuenca y su respuesta frente a escenarios de cambio climático. Con ello se busca evaluar el desempeño de este modelo brasilero en esta cuenca e incentivar a su futura aplicación como modelo hidrodinámico para estudios de inundaciones, un tema significativo para la zona teniendo en cuenta las afectaciones en la zona tras el fenómeno El Niño en 2010-2011.

## 1.2 Delimitación Del Problema

Este proyecto se desarrolla dentro de los límites de la cuenca del Río Lebrija (CRL), esta se sitúa sobre gran parte del departamento de Santander y parte del Cesar y Norte de Santander; se subdivide en las subcuencas Alta, Media, Baja, Cáchira y afluentes directos como se observa en la Figura 1. Su ubicación geográfica se halla en la depresión del río Magdalena, hacia el Noreste de Colombia entre los entre los  $-73.9275^{\circ}$  y  $-72.8342^{\circ}$  de Latitud, y entre los  $6.9100^{\circ}$  y  $8.1542^{\circ}$  de Longitud. Dado que ya se han adelantado trabajos de modelamiento hidrológico en el área de interés, existe una base de datos de información parcial (no incluye todos los parámetros y variables de modelamiento necesarios para la implementación del MGB) (D. Guzmán et al., 2019; Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez et al., 2018); el periodo comprendido de modelamiento es de 29 años continuos a partir del año 1984.

Entre las variables y parámetros que alimentan el modelo a través de las herramientas del MGB, se recolectará la información relativa a la precipitación, variables climatológicas, vegetación y uso del suelo. Además, se tomará en cuenta la información sobre los caudales requeridos para realizar el proceso de calibración. Todo esto con el propósito de analizar si este tipo de modelo describe las características y comportamiento de la cuenca de modo que se constituya en una herramienta de soporte para los tomadores de decisión que gestionan el recurso hídrico en la región generando, por ejemplo, la creación de políticas o restricciones que permitan el uso eficiente del recurso, o permitiendo que posterior a este trabajo se realizaran proyecciones que tomaran en cuenta escenarios de sequía o inundación y respecto a ello el planteamiento de prevención de riesgos de origen hidrometeorológico.

**Figura 1 . Cuenca del Río Lebrija**



Nota. El mapa representa la CRL con su red de drenaje. Tomado de Modelamiento hidrológico del Río Lebrija: implementación de la herramienta HydroBID en la subcuenca baja, Guzmán et al., 2019.

### 1.3 Antecedentes

Con objeto de aplicar el modelo hidrológico MGB en la cuenca del Río Lebrija, es conveniente reconocer el marco investigativo con relación tanto a las experiencias de modelamiento hidrológico dentro de la zona de estudio, como a la aplicación de dicho modelo en distintos escenarios de Sudamérica.

#### 1.1.1 Antecedentes de Modelos Hidrológicos en la Zona de Estudio

Los últimos años diferentes estudios como la implementación de modelos hidrológicos en algunas subcuencas que conforman la CRL han sido llevados a cabo. Como unos de los primeros esfuerzos en el área se tuvo la implementación de dos modelos en la cuenca del Río Sucio (J. Guzmán et al., 2008), la cual también hace parte de la cuenca del Río Tona. Allí se emplearon los modelos NAM y SHIA, concluyendo que los resultados eran similares y resaltando la importancia de seguir instrumentando la cuenca.

Por otra parte, de acuerdo con otra investigación (S. Gómez & Guzmán, 2011) se identificó para la cuenca superior del Río Lebrija, que aproximadamente el 71% de la esorrentía total correspondía al flujo base para el punto de salida de esta. Este resultado fue obtenido mediante el método de isótopos estables y la aplicación de algoritmos y permite tener una percepción sobre los procesos hidrogeológicos que se estarían presentando en la zona. Este tema continuó en desarrollo y fue evaluado posteriormente en las cuencas Suratá y Río de Oro (S. Gómez & Gómez, 2016).

Más adelante, se llevaron a cabo “las aplicaciones del modelo SWAT a la cuenca del Río de Oro” (Pinilla & Peñaloza, 2017) donde se estimaba la producción hídrica y del modelo HydroBID, el cual fue aplicado a la totalidad de la CRL mediante un trabajo conjunto de

diferentes expertos del departamento (D. Guzmán et al., 2019; Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez et al., 2018; Nalesso, 2019). En este último se evaluó también el impacto del cambio climático sobre el recurso hídrico.

Posterior a estos trabajos, por una parte, Villamizar et al., (2019) evaluaron los efectos sobre la producción hídrica bajo unos escenarios de cambio en el uso del suelo junto con escenarios de proyección RCP, enfocados esta vez a la cuenca del río Tona. Por otra parte, se dio la aplicación del modelo HEC -HMS (Martínez, 2019), esta vez orientada a la determinación de la relación oferta/demanda para el desarrollo de actividades con la técnica de fracturamiento hidráulico.

#### 1.1.2 Antecedentes de Implementación del Modelo de Grandes Bacías

El modelo hidrológico lluvia-escorrentía MGB, fue desarrollado e implementado por primera vez para las cuencas de los ríos Taquari-Antas (RS) y Taquari (MS), y la cuenca alta del Río Uruguay, según (Collischonn & Tucci, 2001), donde se obtuvieron resultados satisfactorios y se detallaron algunas características que determinaban el campo de aplicación del modelo y lo que se podría analizar por medio de este. Entre estas se destaca el hecho de que es una herramienta que permite el modelamiento a gran escala, el que fue diseñada pensando en la posible escasez de datos, de modo que permite la utilización de datos globales como entrada, predicción de caudales, además de que permite identificar el efecto del cambio en el uso del suelo.

Después de un tiempo, y con el desarrollo de nuevas aplicaciones (Collischonn et al., 2007), se tuvieron algunas modificaciones que permitieron su integración como complemento para los Sistemas de Información Geográfica SIG. En un primer momento esto fue aplicado con el software MapWindow GIS y ArcGIS (da Silva & Rosa, 2017; F. M. Fan & Collischonn, 2014), y posterior a ello, fue generado también como complemento a QGIS. Dicha integración consideró

los avances en cuanto a la creación de la herramienta topológica IPH-Hydro Tools, así como las modificaciones que tomaban en cuenta la utilización del método inercial para la propagación del flujo en áreas de planicie (de Paiva et al., 2013; F. Fan et al., 2014; Paulo R M Pontes et al., 2015; Paulo Rógenes Monteiro Pontes et al., 2017).

Seguidamente, el MGB fue implementado en el continente de Sudamérica, (Vinicius Siqueira et al., 2018), los resultados obtenidos fueron comparados frente a otros modelos globales, concluyendo que era factible su utilización a escala continental y apuntando hacia una comprensión de la hidrología a gran escala (Fleischmann et al., 2019), sin desconocer la importancia de los modelos a escala local y regional, objetivo de este documento.

## 1.4 Justificación

Ante todo, los modelos hidrológicos globales y los modelos de superficie terrestre son una posible solución para simular el ciclo del agua continental. No obstante, la resolución de estos modelos no siempre es la óptima para las tareas de gestión de cuencas a escalas más reducidas. Por otro lado, el problema de tener información básica limitada para construcción de modelos hidrológicos más detallados supone un desafío para los modeladores al intentar satisfacer las necesidades locales y reducir la incertidumbre en los resultados.

La cuenca del Río Lebrija es un área de alta importancia socioeconómica y de biodiversidad para el departamento de Santander, Colombia. En ella se desarrollan actividades de los diferentes sectores como el agropecuario, la minería y el petróleo. Dichas actividades tienen una relación directa con el recurso hídrico de la cuenca ya sea como fuente de abastecimiento o como punto de vertimiento. Por esta razón, con miras a dar una buena gestión, se hace necesario contar con herramientas y estudios de los que se sirvan los tomadores de decisiones.

Partiendo de que “el agua es un recurso que debe ser entendido desde el ciclo hidrológico” (Mejía, 2010), se desea evaluar si un modelo regional como el Modelo de Grandes Bacías (MGB) puede representar los procesos hidrológicos locales en la CRL a partir de la información disponible. Esto permitiría evaluar y/o establecer si el modelo es aplicable a la Cuenca Río del Lebrija y por extensión a otras regiones del país dando paso a futuras investigaciones.

Dado que los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico se encuentren dentro de los rangos considerados como satisfactorios, “ $NSE > 0.50$ ,  $RSR \leq 0.70$  y  $PBIAS$  menor al  $\pm 25\%$  para caudal” (Moriasi et al., 2007), y haya una conveniente representación del sistema, podría llegar a considerarse como recurso del que se pueden apoyar las entidades encargadas de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH).

## 1.5 Objetivos

### 1.1.3 Objetivo general

Construir el modelo hidrológico de la Cuenca del Río Lebrija mediante la utilización del MGB (Modelo de Grandes Bacías), a partir de la información disponible y considerando las limitaciones de la aplicación de dicho modelo.

### 1.1.4 Objetivos específicos

- ✓ Recopilar la información de parámetros y variables necesarias para la construcción del modelo hidrológico MGB.
- ✓ Procesar y adaptar la información de entrada al MGB mediante la herramienta IPH-Hydro Tools para su configuración.
- ✓ Realizar la calibración de los parámetros del modelo con el fin de determinar si este representa adecuadamente los procesos que intervienen en la cuenca al verificarlos con los indicadores NSE, RSR y PBIAS.
- ✓ Evaluar el impacto del cambio climático de las variables de temperatura y precipitación sobre la disponibilidad hídrica mediante el modelo MGB.

## **1.6 Marco Conceptual**

### **1.1.5 Cuenca Hidrográfica.**

Se define como cuenca hidrográfica a la unidad natural que corresponde a una superficie delimitada por una línea imaginaria denominada divisoria de aguas; dentro de ella, el agua precipitada, los sedimentos y materiales disueltos, drenan hacia un punto considerado como punto de salida. La ruta de drenaje es determinada por las características topográficas, geológicas, tipo y cobertura de suelo de la cuenca. Este término se diferencia de la cuenca hidrológica dado que la cuenca hidrológica, la cual también toma en cuenta las aguas subterráneas (Gámez, 2010; IDEAM, n.d.).

### **1.1.6 Características morfológicas de una cuenca hidrográfica.**

La caracterización morfológica de una cuenca consiste en la determinación de parámetros que describen propiedades particulares de la cuenca. Estos permiten conocer su forma, es decir, sus características geométricas, y establecer una relación frente a su posible respuesta ante eventos de precipitación. Algunos de ellos se presentan a continuación.

#### ***1.6.1.1 Área de la Cuenca (km<sup>2</sup>).***

Es la proyección de la superficie delimitada por la línea divisoria de aguas a un plano horizontal. Usualmente se expresa en km<sup>2</sup>, para cuencas de menor extensión se puede expresar en ha, (Breña & Jacobo, 2006; Gámez, 2010). Se designa como A.

#### ***1.6.1.2 Perímetro de la Cuenca (km).***

Corresponde a la longitud del contorno del área de la cuenca, es decir, es la longitud de la proyección en el plano horizontal de la línea divisoria de aguas (Villón, 2002).

### **1.6.1.3 Longitud Axial (km).**

Distancia entre el punto de salida o de desembocadura de la cuenca y el punto más lejano de la cuenca (Breña & Jacobo, 2006; Gámez, 2010). Se designa como  $L_a$ .

### **1.6.1.4 Longitud del Cauce Principal (km).**

Distancia entre la desembocadura y el punto de nacimiento del cauce principal (Jiménez, 2017).

### **1.6.1.5 Ancho Promedio.**

El ancho promedio se estima como la razón entre el área de la cuenca y la longitud axial (Jiménez, 2017).

$$A_{prom} = \frac{A}{L_a}$$

Donde:  $A_{prom}$  es el ancho promedio (km),  $A$  es el área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ) y  $L_a$  la longitud axial (km).

### **1.6.1.6 Índice de Compacidad.**

El índice de compacidad, coeficiente de compacidad o de Gravelius es un parámetro que describe la forma de la cuenca, determina cuanto se aleja de una forma circular. Entre más diste de la forma redonda, más tardará en concentrar los escurrimientos y llevarlos al punto de salida. Esta clasificación se puede observar en la Tabla 1.

$$k = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:  $k$  es el índice de compacidad (adimensional),  $P$  es el perímetro de la cuenca (km) y  $A$  es el área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ).

**Tabla 1.** Clases de forma de acuerdo con el índice de compacidad

<b>Valores de <math>k</math></b>	<b>Tipos o clases de formas</b>
De 1.00 a 1.25	De casi redonda a oval redonda
De 1.26 a 1.50	De oval redonda a oval oblonga
De 1.51 a 1.75	De oval oblonga a rectangular oblonga

Nota. Tomado de *Texto Básico de Hidrología* (p. 37), por W. R. Gámez, (Jiménez, 2017; Villón, 2002), Universidad Nacional Agraria.

#### **1.6.1.7 Factor de Forma de Horton ( $K_f$ ).**

Está dada por la relación entre el ancho promedio de la cuenca y la longitud axial, o, dicho de otra forma, es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud. Un menor Factor de Forma indica que la cuenca es menos propensa a crecientes que otra con misma área, pero con mayor coeficiente de forma (Jiménez, 2017; Villón, 2002).

$$K_f = \frac{A}{L_a^2}$$

Donde:  $k$  es el índice de compacidad (adimensional),  $A$  es el área de la cuenca ( $\text{km}^2$ ) y  $L_a$  la longitud axial (km).

#### **1.6.1.8 Pendiente Media de la Cuenca.**

Es uno de los parámetros que caracteriza el relieve de la cuenca. Es de gran importancia ya que tiene incidencia sobre la velocidad de la escorrentía, lo cual es un factor de incidencia en los procesos erosivos del suelo. En su libro, Gámez (2010) menciona cómo estimarla a partir de los métodos de Nash, Alvord y Horton.

### **1.6.1.9 Pendiente Media del Cauce Principal.**

Se puede definir como la relación entre el desnivel entre los extremos inicial y final, y la distancia horizontal del trecho. Es importante considerar que un río puede estar formado por varios tramos con diferentes pendientes. Para cálculos con tramos de diferente longitud, la pendiente media se puede estimar a partir de la siguiente ecuación (Villón, 2002), propuesta por Taylor y Shwarz:

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}} \right]^2$$

Donde:  $S$  es la pendiente media del cauce principal,  $L$  es la longitud total del cauce principal,  $l_n$  es la longitud del tramo  $n$  de río, y  $S_n$  corresponde a la pendiente del tramo  $n$  de río.

### **1.6.1.10 Curva Hipsométrica.**

También conocida como curva de área-altitud, es una curva que indica el porcentaje de superficie de la cuenca que se encuentra sobre una cota de nivel determinada (Gámez, 2010). Se asocia con las edades de los ríos de las cuencas y a su potencial erosivo como se ilustra en la Figura 2.

### **1.6.1.11 Elevación media.**

Corresponde a la ordenada para la cual el porcentaje de área acumulada es del 50%.

**Figura 2.** Curva hipsométrica y su relación con la fase de vida de la cuenca



*Nota.* El gráfico representa la relación porcentaje de área acumulada – altitud, de acuerdo con la forma de esta curva se puede establecer los procesos evolutivos de la misma. Tomado de *Texto Básico de Hidrología* (p. 38), por W. R. Gámez, 2010, Universidad Nacional Agraria.

#### 1.1.7 Ciclo Hidrológico.

El ciclo hidrológico es un concepto que abarca los procesos asociados a la circulación del agua, la cual se da de manera continua, sin principio ni fin y que tienen lugar en la atmósfera, la litosfera e hidrosfera (Chow et al., 1988). Durante esta circulación, el agua sufre constantemente cambios físicos (cambios de estado), químicos, y biológicos (Gámez, 2010).

Las fases o procesos son usualmente comprendidos como entradas y salidas del sistema, donde el sistema hace alusión al ciclo hidrológico. Algunas de estas son la evaporación, transpiración, precipitación, interceptación, infiltración, percolación y la escorrentía, etc.

#### ***1.6.1.12 Precipitación.***

Se produce desde la atmósfera hacia la superficie terrestre por la condensación del vapor de agua provocada por una disminución en la temperatura o un aumento en la presión, además de la presencia de pequeños cristales o partículas de polvo que permitan la nucleación. Puede alcanzar la superficie en forma de lluvia, llovizna, granizo, nieve, aguanieve, etc. “Desde el punto de vista hidrológico es considerada como la fuente principal del agua de la superficie terrestre” (Hingray et al., 2015, p. 115).

#### ***1.6.1.13 Evapotranspiración.***

Comúnmente denominada evapotranspiración, comprende dos procesos. El primero, denominado evaporación directa o evaporación, consiste en el cambio de estado del agua ya sea de sólido o líquido, a gaseoso. Este proceso puede tener lugar en superficies de agua, como son los cuerpos de agua; la evaporación de la humedad del suelo mediante ascensión capilar; evaporación de la interceptación, la cual viene siendo la evaporación del agua que se encontraba en una superficie después de un evento de precipitación y/o la evaporación obtenida de la sublimación de la nieve o hielo. El segundo, evaporación indirecta o transpiración, indica el intercambio de humedad por medio de los estomas de las hojas presentes en la vegetación (Hingray et al., 2015, pp. 136–143).

#### ***1.6.1.14 Intercepción.***

Ocurre cuando la cobertura del suelo ya sea vegetación u otro tipo de superficie, impide que, al precipitarse el agua, esta caiga directamente en el suelo. Usualmente parte de la precipitación interceptada vuelve a la atmósfera por evaporación o sublimación (Hingray et al., 2015, p. 128).

#### ***1.6.1.15 Infiltración.***

Proceso por el cual el agua precipitada o que cubre la superficie terrestre fluye a través de las capas superiores del suelo bajo acción de las fuerzas de gravedad, de presión y capilares. La tasa

máxima a la que el agua penetra en un suelo se conoce como capacidad de infiltración (Gámez, 2010, p. 16).

#### ***1.6.1.16 Percolación.***

Flujo lento de agua a través de un medio poroso, generalmente en zonas profundas del suelo. A partir de esta se da el proceso de recarga de acuíferos (Gámez, 2010, p. 16).

#### ***1.6.1.17 Escorrentía.***

También denominada escurrimiento, se entiende como el flujo de agua que circula sobre la superficie terrestre transportando parte de la precipitación que ocurre en una cuenca hidrológica y conduciéndolo a la red de drenaje hasta la salida de la cuenca, en el caso de las cuencas exorreicas, o a un lago, por ejemplo, en el caso de las cuencas endorreicas.

#### ***1.6.1.18 Escorrentía Superficial.***

“Se define como el exceso de precipitación que se desplaza sobre la superficie del terreno por gravedad, formando una red hidrográfica sobre el terreno hacia un punto de salida del área de drenaje de la cuenca” (Chow et al., 1988; Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, n.d.).

#### ***1.6.1.19 Escorrentía o Flujo Subsuperficial.***

Ocurre cuando el agua infiltrada que no ha alcanzado el nivel freático o el almacenamiento subterráneo circula paralelo a la superficie en los primeros horizontes del suelo (Villón, 2002, p. 136).

#### ***1.6.1.20 Escorrentía Subterránea.***

Proción de la precipitación que se ha infiltrado en el terreno, llegando a la zona del nivel freático y circulando por corrientes subterráneas, (Gámez, 2010, p. 16).

### **1.6.1.21 Flujo Base.**

Es el caudal de aporte desde un acuífero a un cauce determinado, es la escorrentía que se observa que en tiempos de sequía (Breña & Jacobo, 2006).

### **1.1.8 Balance hídrico.**

El balance hídrico, basado en el principio de conservación de masa, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo de un sistema para un determinado intervalo de tiempo. “La diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación de agua almacenada” (Beven, 2012).

$$\Delta \text{Almacenamiento} = \text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de salida}$$

Como elementos del balance hídrico en el suelo se tienen como entrada la precipitación y en ocasiones el flujo subterráneo, y como flujo de salida la evapotranspiración además del flujo superficial, subsuperficial y subterráneo, adicionalmente se puede considerar un término residual o de diferencia (Hingray et al., 2015; Sokolov & Chapman, 1981).

### **1.1.9 Modelos hidrológicos.**

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de una serie de procesos que tienen lugar en un sistema llamado cuenca, que ocurren dentro del ciclo hidrológico y que se encuentran relacionados entre sí. Entre ellos participan diferentes fenómenos como la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía (en sus diferentes formas), la percolación, la interceptación, la infiltración además de procesos como el almacenamiento. Estas variables se simulan como entradas y salidas del sistema, permitiendo tener una aproximación a la realidad de cómo se está dando el flujo del agua y con ello lograr una mayor comprensión de la situación particular de la cuenca.

A partir de los resultados obtenidos se pueden generar análisis, proyecciones, e incluso se pueden simular nuevas condiciones. Por esta razón se considera que los modelos hidrológicos son una herramienta de gran importancia cuando se trata de la gestión del recurso hídrico (Beven, 2012).

A lo largo de los años, distintos autores se han dado a la tarea de clasificar los modelos hidrológicos (Devia et al., 2015). Ponce, (1989), distingue cuatro tipos de modelos matemáticos cuyos nombres se indican en la tabla. No obstante, los modelos también pueden ser clasificados de acuerdo con su variabilidad espacial (agregados o distribuidos) y su variabilidad temporal.

**Tabla 2.** Clasificación de modelos hidrológicos

<b>Tipo de modelo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Modelos determinísticos</b>	Descrito por ecuaciones diferenciales, regido por fórmulas físicas. Se caracterizan por ser modelos de gran complejidad.
<b>Modelos probabilísticos</b>	Pueden ser modelos estadísticos o estocásticos, cuentan con el componente de aleatoriedad. Suelen ser modelos sencillos y se basan en series de tiempo.
<b>Modelos conceptuales</b>	Representan los procesos o fenómenos que se producen dentro de la cuenca, mediante conceptos físicos, parámetros (Vinicius Siqueira et al., 2018), álgebra, ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, de una manera simplificada.
<b>Modelos paramétricos</b>	También reciben el nombre de modelos empíricos, estos representan los procesos hidrológicos mediante ecuaciones algebraicas y parámetros que son determinados experimentalmente.

*Nota.* Diferentes autores los consideran los modelos conceptuales como modelos determinísticos (Vinicius Siqueira et al., 2018).

*Fuente.* Elaboración propia.

#### **1.1.10 Modelo Semi-Distribuido.**

En comparación con los modelos globales, los modelos semi-distribuidos poseen una mayor base física. Al no tomar la cuenca como una sola unidad le permite variar en el espacio en sus características, generando una serie de subdivisiones/ subunidades que vendrían siendo las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU). No obstante, se diferencian de los modelos distribuidos en que estos últimos discretizan la cuenca en una gran y mayor cantidad de “elementos”. A su vez se requiere una mayor cuantía de información de entrada la cual se traduce en su capacidad para representar la variabilidad espacial y en la proximidad al simular el comportamiento real del sistema (Vinicius Siqueira et al., 2018).

#### **1.1.11 Modelo de Grandes Bacías.**

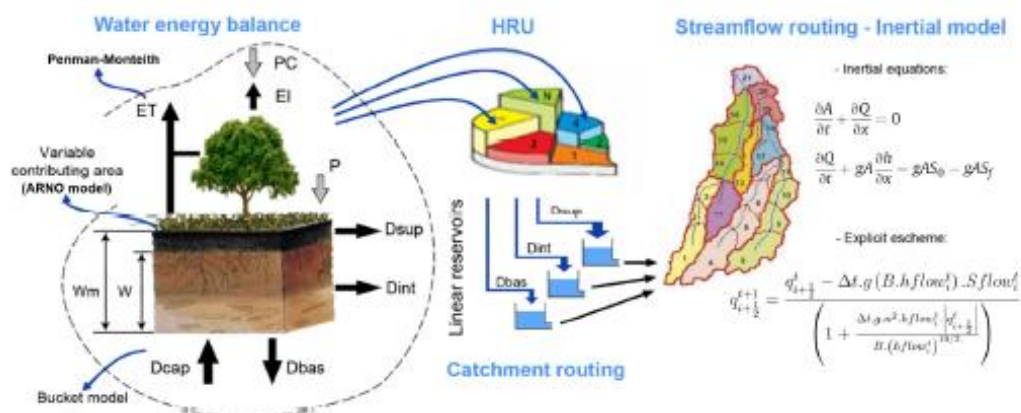
El MGB es un modelo conceptual semi-distribuido de gran escala desarrollado por el grupo de investigación del IPH-UFRGS de Brasil (Vinicius Siqueira et al., 2018; Vinicius Siqueira et al., 2018). Es un modelo de precipitación- escorrentía en el que se discretiza espacialmente la cuenca hidrográfica generando subcuencas y mini cuencas, estas últimas corresponden a la delimitación de las áreas de drenaje para cada tramo de río. Dentro de las “mini cuencas” se encuentra adicionalmente la subdivisión por URH, las cuales son regiones de la cuenca con comportamiento hidrológico similar que consideran las características de tipo de suelo y de uso o cobertura del suelo. Es en las URHs donde se realizará el balance hídrico.

#### ***1.6.1.22 Balance Hídrico para el MGB.***

El balance hídrico es realizado en cada una de las URH que se encuentran en cada mini cuenca como se ilustra en la Figura 3. Como entrada se tiene la precipitación (interpolada por el método

de la Distancia Inversa Ponderada); la interceptación se estima a partir del Índice de Área Foliar (IAF), uno de los parámetros fijos del modelo, y la evapotranspiración se calcula mediante la ecuación de Penman-Monteith. La estimación de la escorrentía superficial, y el flujo subsuperficial y subterráneo, son generados a partir de ecuaciones del modelo de Arno, Brooks-Corey y una ecuación lineal, respectivamente. La escorrentía generada (superficial, subsuperficial y subterránea) es dirigida hacia su reservorio lineal, en donde el volumen acumulado en cada reservorio es transformado en flujo mediante una relación entre el volumen almacenado y un parámetro de tiempo de permanencia para luego ser propagado.

**Figura 3.** Esquema representativo del funcionamiento del Modelo de Grandes Bacías



*Nota.* Tomado de Supplement of Toward continental hydrologic-hydrodynamic modelling in South America, V. Siqueira et al., 2018.

A continuación, se muestra la ecuación utilizada en el modelo para el balance hídrico.

$$W_{i,j}^t = W_{i,j}^{t-1} + (P_i - ET_{i,j} - Dsup_{i,j} - Dint_{i,j} - Dbas_{i,j} + Dinf_{i,j})\Delta t$$

Donde:  $i, j$  y  $t$  son los índices relacionados para cada “unit – catchment”, cada URH y para cada tiempo respectivamente;  $W_m$  es la capacidad de almacenamiento de agua en esa capa de suelo [mm],  $W$  es la capacidad de almacenamiento del suelo [mm].  $P$  es la precipitación que llega al suelo [ $mm \Delta t^{-1}$ ],  $ET$  es la evapotranspiración del suelo [ $mm \Delta t^{-1}$ ],  $D_{sup}$  representa la escorrentía superficial [ $mm \Delta t^{-1}$ ],  $D_{int}$  corresponde al flujo subsuperficial [ $mm \Delta t^{-1}$ ],  $D_{bas}$  es el flujo base / flujo al acuífero [ $mm \Delta t^{-1}$ ],  $D_{inf}$  representa la infiltración de áreas inundadas [ $mm \Delta t^{-1}$ ] y  $\Delta t$  es el lapso para el balance hídrico, que generalmente equivale a un día (Vinícius Siqueira et al., 2018).

#### **1.6.1.23 Evaporación Potencial, Ecuación de Penman -Monteith.**

El balance energético y la evaporación del suelo, vegetación y el follaje hacia la atmósfera son estimados mediante la siguiente ecuación:

$$E = \left[ \frac{\Delta(R_L - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})} \right] \frac{1}{\lambda \rho_w}$$

Donde:  $E$  es la evaporación potencial [ $m / s$ ],  $R_L$  es la radiación neta [ $MJ/m^2s$ ],  $G$  es el flujo de calor en el suelo, [ $MJ/m^2s$ ],  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión vapor de saturación [ $kPa / ^\circ C$ ],  $(e_s - e_a)$  representa el déficit de presión de vapor del aire [ $kPa$ ],  $\gamma$  es la constante psicrométrica [ $kPa / ^\circ C$ ],  $\rho_a$  es la densidad del aire [ $kg/m^3$ ],  $\rho_w$  es la densidad del agua [ $kg/m^3$ ],  $c_p$  es el calor específico del aire [ $MJ / kg \cdot ^\circ C$ ],  $r_s$  y  $r_a$  son las resistencias: superficial (total) y aerodinámica (Vinícius Siqueira et al., 2018).

#### ***1.6.1.24 Propagación del Caudal.***

El MGB considera la opción de realizar la propagación del caudal por dos métodos distintos, el método de Muskingum-Cunge (MC) y el método Inercial local (HD), partiendo de las ecuaciones de Saint-Venant.

#### ***1.6.1.25 Método de Muskingum-Cunge.***

Toma en cuenta el principio de continuidad, y hace una simplificación del principio de conservación de momentum, de manera que es un método de onda cinemática con difusión controlada y es comúnmente utilizado en otros modelos hidrológicos.

#### ***1.6.1.26 Método Inercial Local.***

El método inercial para la propagación de caudales considera las ecuaciones de Saint- Venant. Sin embargo, de la ecuación de conservación del momentum no se considera el término de aceleración convectiva, y se da una solución por aproximación numérica, la cual fue propuesta por Bates et al. (2010). La ventaja del uso de este método está en la mejor representación que puede dar en zonas de planicie inundables o de bajas pendientes (Paulo Rógenes Monteiro Pontes et al., 2017; Vinicius Siqueira et al., 2018).

#### ***1.6.1.27 Parámetros Fijos.***

Estos parámetros dentro del MGB son aquellos relativos a la vegetación y deben ser introducidos para cada mes del año para cada URH.

*Albedo.* Reflectividad de una superficie en comparación a la radiación que recibe. El término se expresa como porcentaje.

*Leaf área index (IAF).* Cantidad de área foliar, es decir, el área de la hoja por unidad de superficie terrestre. Este valor, al ser un índice es adimensional y característico de la vegetación de la zona (Salmona, n.d.).

*Average vegetation height.* Indica la altura promedio de la vegetación para los diferentes tipos de cobertura de acuerdo con las URH establecidas.

*Surface resistance.* Resistencia superficial al flujo de vapor, producto de la transpiración y evaporación en la superficie del suelo, para buenas condiciones de humedad en el suelo.

#### **1.6.1.28 Parámetros Calibrables.**

Son los parámetros que pueden ser modificados y que indican propiedades que influyen en almacenamiento del suelo, estos definen las características para cada HRC (Medeiros et al., 2018). Antes de realizar la calibración del modelo, se debe realizar un análisis de sensibilidad el cual consiste en la identificación de los parámetros para los que pequeñas modificaciones tienen mayor efecto en la respuesta del modelo (IDEAM, 2018).

Es importante tener en cuenta que estos parámetros deben ser modificados dentro de unos rangos específicos con el objetivo de que sus valores se ajusten a los valores reales desde una perspectiva física.

*Wm.* Capacidad de almacenamiento del suelo.

*b.* Es el parámetro que controla la distribución de la capacidad de almacenamiento del suelo.

*kBas.* Es el parámetro que da la tasa de percolación del agua subterránea en caso de que sea un suelo saturado y cuyas unidades se da en  $[\text{mm } \Delta t^{-1}]$ .

*kInt.* Es un parámetro semejante a la conductividad hidráulica saturada, controla la escorrentía subsuperficial,  $[\text{mm } \Delta t^{-1}]$ .

*Cs* y *Ci.* Son parámetros que corrigen la estimación del tiempo de concentración para drenaje superficial y subsuperficial, están dados por la ecuación de Kirpich.

*Cb.* Es el tiempo de residencia del agua subterránea, que puede ser estimado de la curva de recesión considerando un largo periodo de sequía.

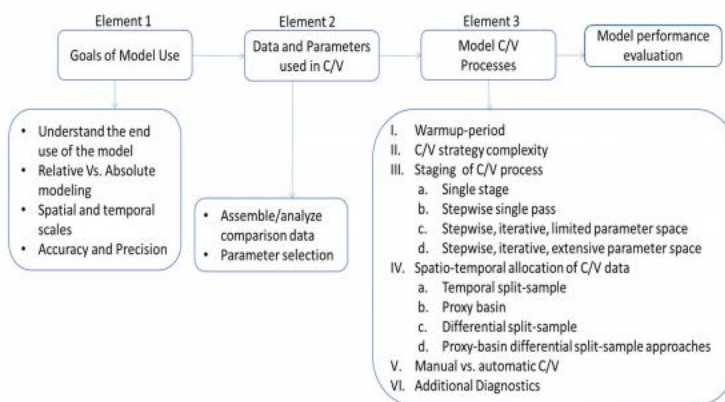
*XL.* Parámetro que controla la curva de reducción del reservorio subsuperficial.

*CAP.* Parámetro de ascensión capilar.

### 1.1.12 Calibración y validación.

Los procesos de calibración y validación son de gran importancia dado que permiten conocer si un modelo presenta resultados satisfactorios para una aplicación en particular. Por esta razón autores como Daggupati et al. y Moriasi et al., 2007, recomiendan tener en cuenta ciertos aspectos en consideración como se ilustran en la Figura 4 .

**Figura 4.** Elementos para tener en consideración como estrategia para la calibración de un modelo hidrológico



Nota. Tomado de A Recommended Calibration and Validation Strategy for Hydrologic and Water Quality Models, P. Daggupati et al., 2015.

La finalidad de la calibración del modelo es poder replicar los datos de manera que estos sean lo más parecidos posible a los datos observados (Moriasi et al., 2007). Esto se puede lograr

mediante la selección de unos parámetros para calibración y el uso de funciones objetivo que consideran coeficientes o indicadores los cuales permiten medir la eficiencia del modelo.

Una vez ha finalizado el proceso de calibración, se da paso al proceso de validación cuyo propósito es el de verificar si para un periodo diferente al de calibración el modelo puede simular el comportamiento hidrológico de la cuenca con mayor exactitud.

### ***1.6.1.29 Coeficientes para la Evaluación del Desempeño del Modelo Hidrológico.***

En el área de modelamiento hidrológico existen algunos coeficientes que son comúnmente utilizados, de entre los cuales se destacan: Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y el Percent BIAS (PBIAS) (Moriassi et al., 2007). El MGB, por ejemplo, en su estructura considera los coeficientes NSE, Nash-Log y PBIAS.

*Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE).* Coeficiente estadístico que permite evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos

Tabla 3. Determina la magnitud del “ruido” comparado con la información o datos observados.

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean})^2} \right]$$

**Tabla 3.** Evaluación de desempeño del coeficiente Nash-Sutcliffe

<b>Evaluación coeficiente NSE</b>	
Rango de valores NSE	$(-\infty, 1]$
Desempeño aceptable	$(0.0, 1]$
Desempeño no satisfactorio	$\leq 0.0$

*Fuente.* Elaboración propia.

*RMSE-observations standard deviation ratio (RSR)*. Es la relación entre el error cuadrático medio y la desviación estándar de los datos Tabla 4.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[ \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}$$

**Tabla 4.** Evaluación de desempeño del índice RSR

<b>Evaluación índice RSR</b>	
Valor óptimo	$RSR = 0$
Variación del desempeño	$RSR > 0$

*Fuente.* Elaboración propia

*Percent BIAS (PBIAS)*. Es un indicador estadístico que permite evaluar el desempeño de los modelos hidrológicos Tabla 5. Mide la tendencia media de los datos simulados de ser mayores o menores a los observados, es decir su desviación en términos porcentuales.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$

**Tabla 5.** Evaluación de desempeño del índice PBIAS

<b>Evaluación del PBIAS</b>	
<b>Subestimación</b>	$PBIAS > 0$
<b>Valor óptimo</b>	$PBIAS = 0$
<b>Sobreestimación</b>	$PBIAS < 0$

*Fuente.* Elaboración propia.

Para cada uno de estos indicadores, las variables  $Y_i^{obs}$ ,  $Y_i^{sim}$  y  $Y^{mean}$  son respectivamente, la descarga observada, la descarga simulada y la media de los datos observados para el componente evaluado. La variable  $n$  es el número total de observaciones.

En la Tabla 6, se condensa la información de los intervalos de puntuación para los resultados de los coeficientes RSR, NSE y PBIAS.

**Tabla 6.** Clasificación del desempeño, estadísticas recomendadas

Clasificación del desempeño	RSR	NSE	PBIAS
<b>Muy bueno</b>	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
<b>Bueno</b>	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
<b>Satisfactorio</b>	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
<b>Insatisfactorio</b>	$RSR > 0.70$	$NSE < 0.5$	$PBIAS \geq \pm 25$

*Nota.* Estos umbrales son recomendaciones para modelos con resultados en escala temporal mensual. Adaptado de *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*, Moriasi et al., 2007.

#### **1.6.1.30 Calibración en el MGB.**

Para realizar la calibración en el MGB, es recomendable realizar primero una calibración manual con el fin de obtener unos valores aceptables para las funciones objetivo. La calibración manual se realiza modificando los parámetros de suelo dentro de los rangos que conservan un sentido físico. Una vez hecho esto se procede a la calibración automática para la cual se identifican primeramente las funciones objetivo para las que será aplicada el algoritmo de optimización MOCOM-UA (Collischonn et al., 2007; de Paiva et al., 2013; Yapo et al., 1998).

### ***1.6.1.31 Gestión Local del Recurso Hídrico.***

La gestión local del agua es apenas una escala como su nombre lo indica a nivel local y que se desprende de la Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH). Esto hace referencia a la administración de dicho recurso mediante la formulación y orientación de políticas que promuevan su manejo y aprovechamiento, tomando en cuenta su impacto y conexión con el medio ambiente de manera que se maximice el bienestar social y el desarrollo económico dentro de un marco de sustentabilidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, n.d.; OCDE, 2015).

### **1.6.1.32 Cambio Climático.**

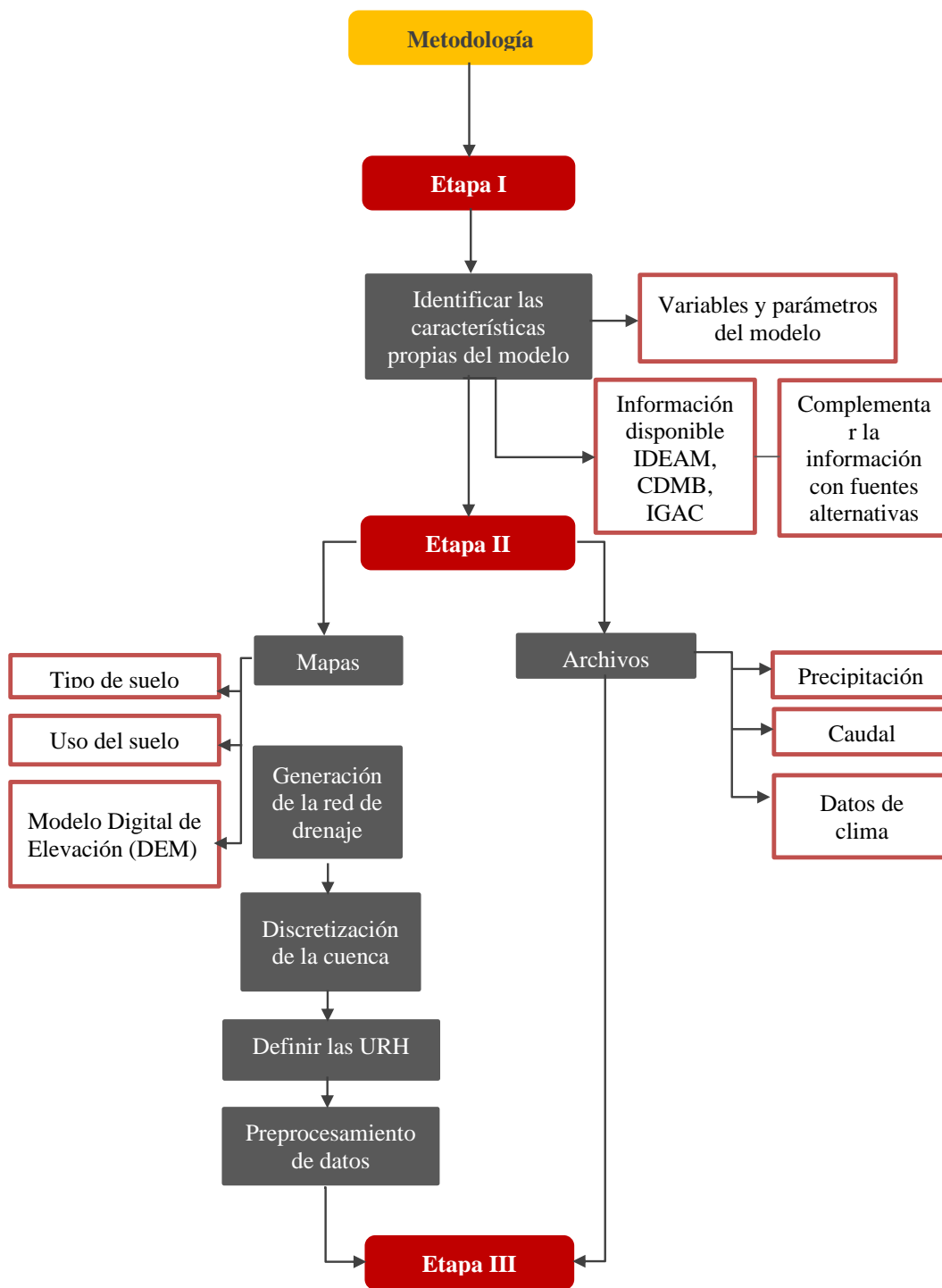
Hace referencia a un cambio en el estado del clima persistente durante largos periodos el cual puede deberse a causas o procesos naturales o a cambios antropogénicos (Shukla et al., n.d.).

## 2 METODOLOGÍA

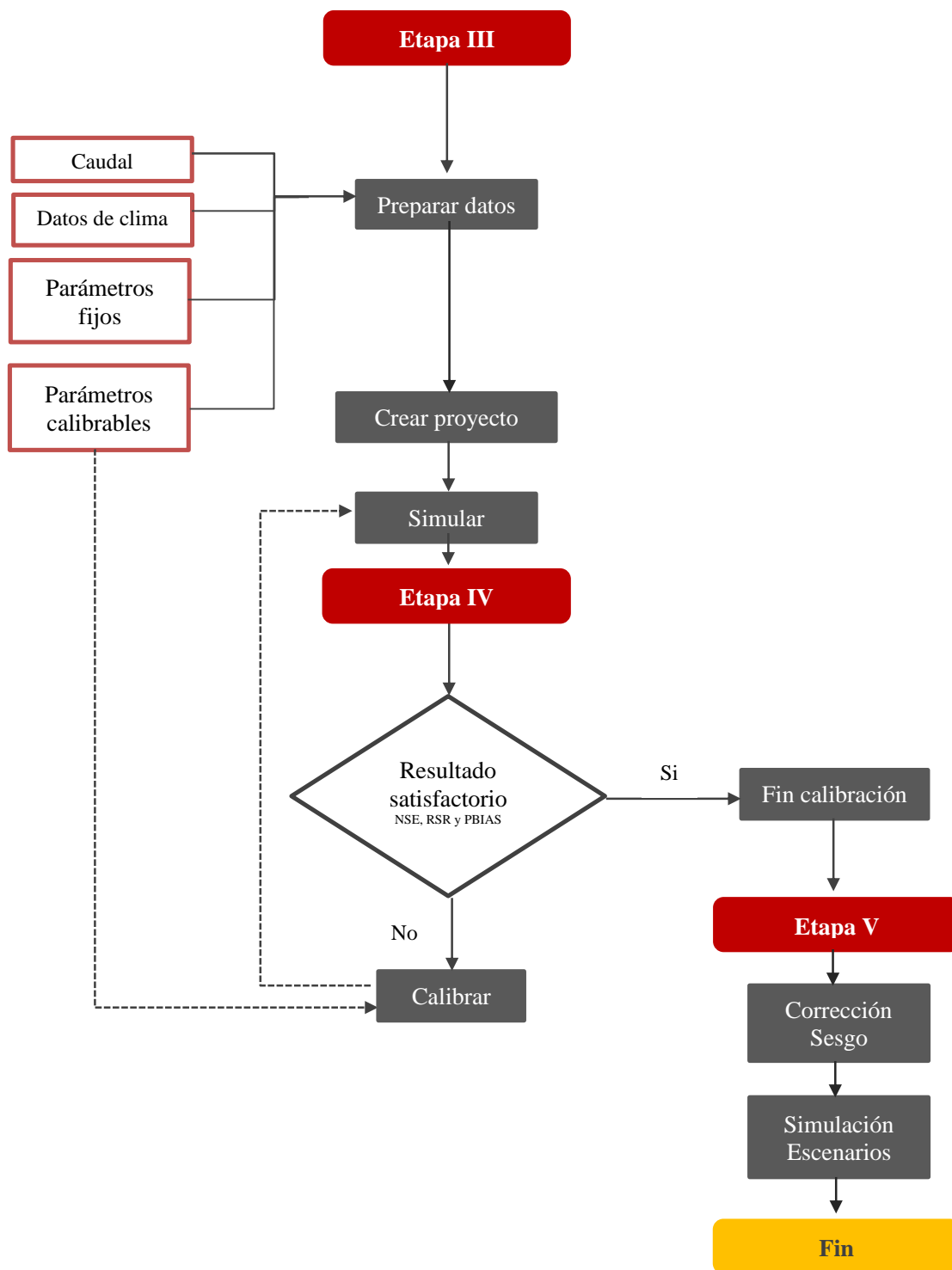
La simulación hidrológica inicialmente planteada se llevó a cabo en cinco etapas o fases principales. En cada una de ellas se completó un grupo de actividades relacionadas entre sí, permitiendo en un primer momento la revisión bibliográfica complementaria para una mejor comprensión sobre la herramienta MGB, la recolección de la información de entrada, su preparación y procesamiento, la etapa de calibración y validación de cuatro configuraciones del modelo denominadas en este documento como MC-AS, MC-IGAC, HD-AS y HD-IGAC, y la evaluación del impacto en la producción hídrica para los diferentes escenarios de emisiones. Estas etapas fueron definidas con base en los pasos demarcados en el manual del MGB (Jardim et al., 2014; Medeiros et al., 2018) y se presentan de forma resumida en las Figura 5 y Figura 6.

Para llevar a cabo la preparación de los datos de entrada fue de gran importancia la utilización de herramientas de software como Microsoft Excel, QGIS (versiones 3.4.14 “Madeira” y 3.10 “A Coruña”) y Super Manejo de Datos 2.0.5; las actividades relacionadas a la delimitación de la cuenca y el modelamiento se realizó mediante los paquetes o extensiones, IPH- Hydro Tools y MGB versión 4.3. Con el fin de visualizar algunos de los resultados obtenidos durante el proceso, se recurrió a Notepad ++ y Matlab.

**Figura 5.** Metodología implementada en el proyecto (Etapa I-III)



**Figura 6.** Metodología implementada en el proyecto (Etapa III- V)



*Nota.* Adaptado de *Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB 2018 Utilizando o IPH-*

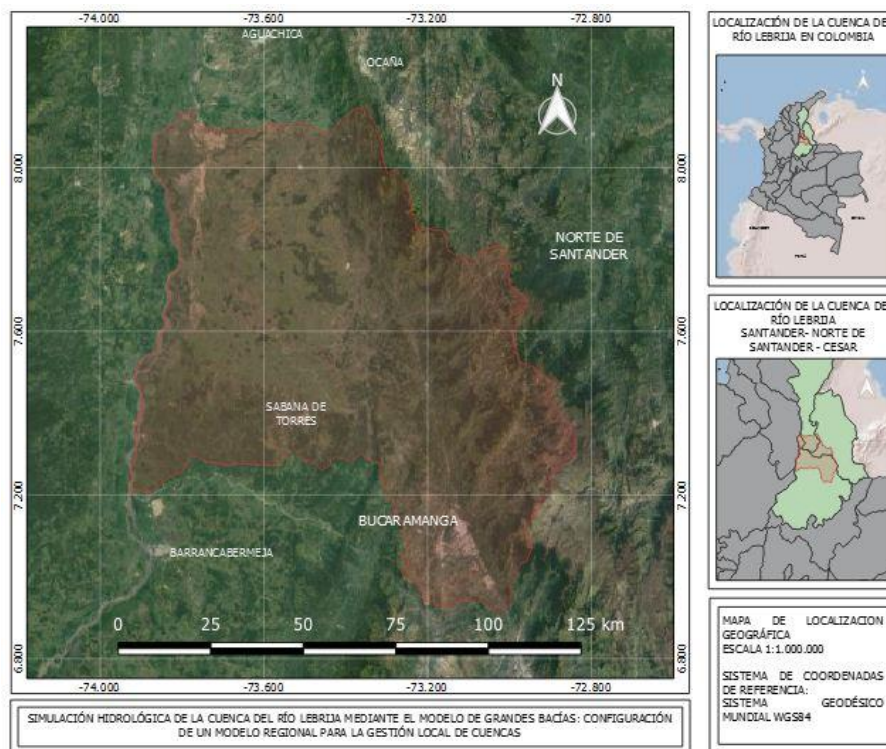
*Hydro Tools*, Medeiros et al., 2018.

## 2.1 Etapa I. Revisión bibliográfica, definición del área de estudio y su información de entrada requerida para el modelo

### 1.1.13 Definición del área de estudio.

La CRL está situada hacia el noreste colombiano, propiamente sobre gran parte del departamento de Santander, así como sobre parte de los departamentos de Norte de Santander y Cesar, más precisamente entre los  $-73.9275^\circ$  y  $-72.8342^\circ$  de Latitud, y entre los  $6.9100^\circ$  y  $8.1542^\circ$  de Longitud (WSG84), ver Figura 7.

**Figura 7.** Localización geográfica de la zona de estudio, cuenca del Río Lebrija



*Fuente.* Elaboración propia.

Cuenta con un área de aproximadamente  $9600 \text{ km}^2$  y una altura media de 759 msnm, con máximos alrededor de los 4200 msnm y mínimos de 16 msnm. Forma parte de la macrocuenca

Magdalena-Cauca en donde realiza su descarga. De acuerdo con el POMCA, está subdividida en las subcuencas Superior/ Alto Lebrija, Media, Baja, Cáchira Sur y en sus afluentes.

#### 1.1.14 Información de entrada Pre-Procesamiento con IPH- Hydro Tools.

La información requerida para realizar el proceso de la delimitación de la cuenca, generación del archivo de dirección de flujo, la red de drenaje, etc., además del archivo requerido para la entrada del MGB, se encuentra identificada en la siguiente Tabla 7.

**Tabla 7.** Archivos de entrada para modelamiento hidrológico utilizando el plugin IPH-Hydro Tools

<b>Ítem</b>	<b>Formato</b>	<b>Nombre del archivo</b>	<b>Descripción</b>
Modelo digital de elevación	ASCII IPH	DEM_Cuenca	Modelo Digital de Elevación del área de la cuenca
Máscara	Shape / ASCII IPH	Mask	Polígono del área de la cuenca
Punto de Salida	Shape	Salida_CRL	Punto de salida de la cuenca utilizado para la delimitación de ésta
Mapa de URH	ASCII IPH	HRC_AS_CRL HRC_CRL	Mapa de tipo de suelo y mapa de cobertura de suelo integrados

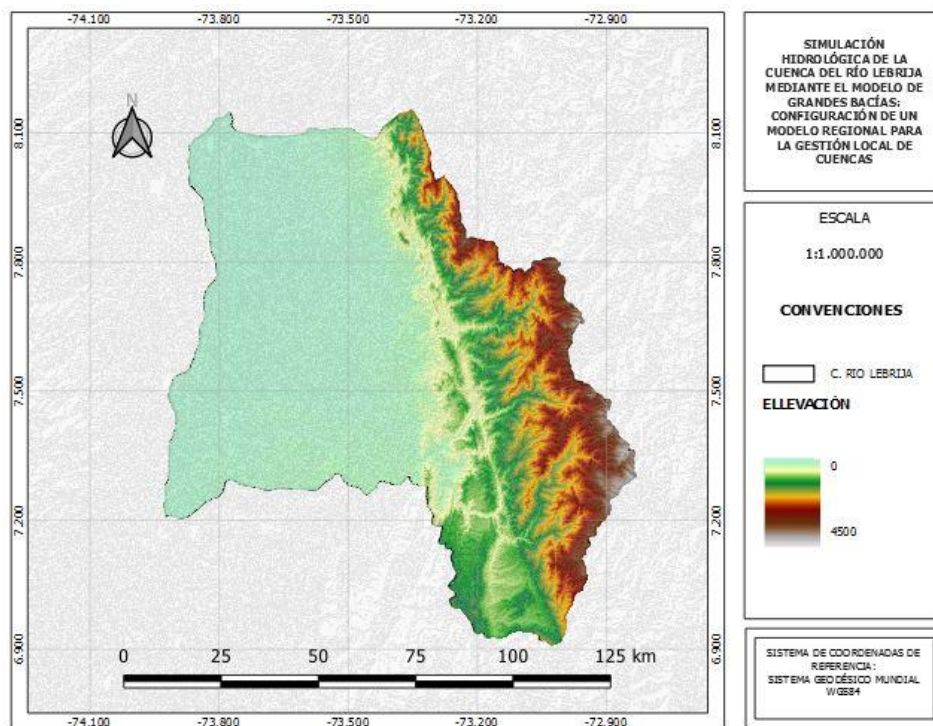
*Fuente.* Elaboración propia.

##### **2.1.1.1 Modelo Digital de Elevación (MDE).**

Dado que el MGB trabaja con el sistema de coordenadas geográficas WGS 84, no fue necesario proyectar el ráster. Sin embargo, con el fin de transformarlo al formato ASCII IPH para ser trabajado mediante IPH-Hydro Tools, se realizó la conversión del archivo primero a formato

ASCII de QGIS, y luego de éste a ASCII IPH. Finalmente, mediante la máscara se extrajo el área deseada como se muestra en la Figura 8.

**Figura 8.** *Modelo Digital de Elevación (MDE), cuenca del Río Lebrija*



*Fuente. Elaboración propia.*

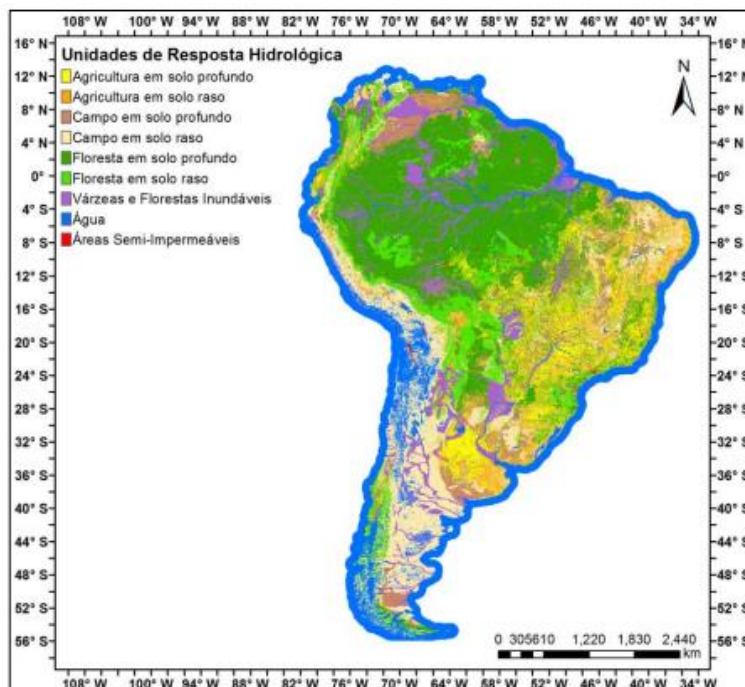
### 2.1.1.2 Máscara.

El archivo vectorial para facilitar la extracción del área de la cuenca fue obtenido de la Zonificación Hidrográfica 2013 realizada por el IDEAM.

### 2.1.1.3 Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica.

Para este modelo se plantearon dos fuentes de entrada, una corresponde al recurso del para para URH de América del Sur desarrollado por el grupo de Hidrología de Grande Escala HGE (F. M. Fan et al., 2015), el cual se observa en la Figura 9 y cuenta con una resolución espacial de 400m.

**Figura 9.** Mapa de URH para América del Sur

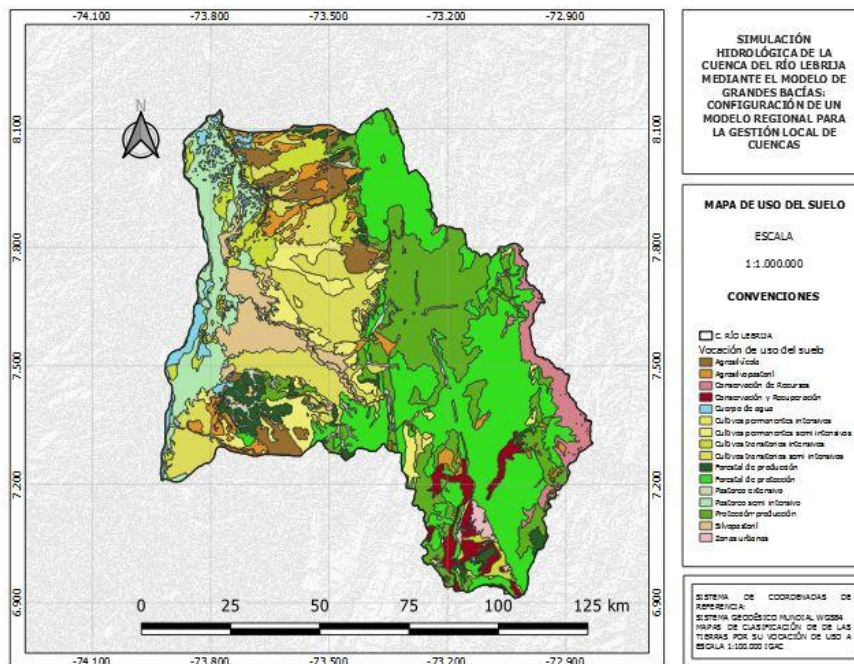


*Fuente.* Tomado de *Um mapa de unidades de resposta hidrológica para a América do Sul*, Fan et al., 2015.

La información de tipo de suelo correspondiente al sector de la cuenca trabajada en este proyecto proviene de la base de datos de suelos en escala 1:5.000.000 de *Food and Agriculture Organization of the United Nations* FAO. Por otra parte, el mapa de cobertura fue obtenido de la *Agencia Espacial Europea* AEE con una resolución espacial de 300 m.

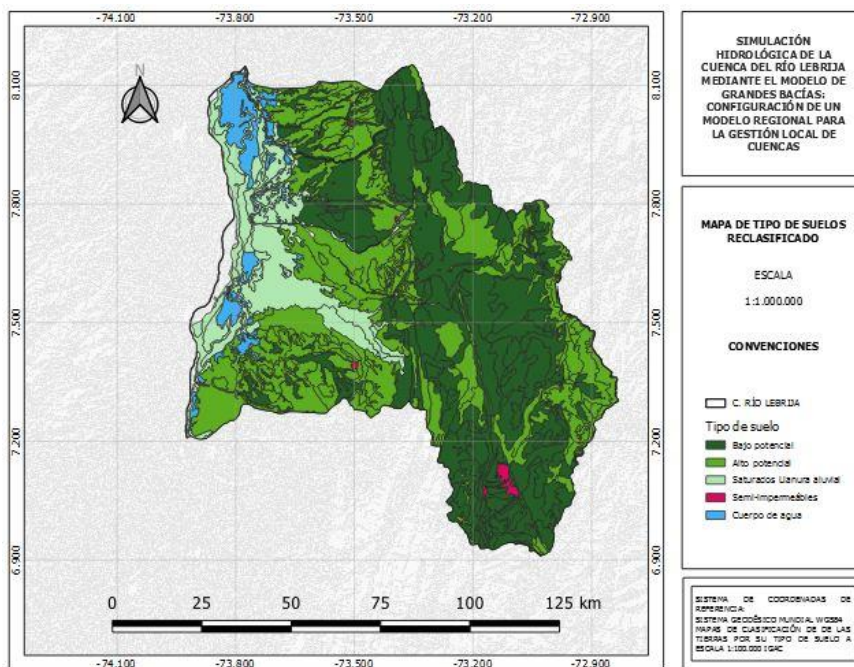
La segunda fuente corresponde a la integración del mapa mostrado en la Figura 10 de vocación de uso del suelo a escala 1:100.000 de cobertura Nacional, y el mapa de tipo de suelo obtenido al extraer el área de estudio de la integración de los departamentos de Cesar, Norte de Santander y Santander también a escala 1:100.000 Figura 11, ambos provistos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, n.d.).

**Figura 10.** Mapa de uso del suelo (sin clasificar), cuenca del Río Lebrija



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 11.** Mapa del tipo de suelo (clasificado), cuenca del Río Lebrija



Fuente. Elaboración propia.

Con objeto de generar un mapa similar al propuesto por el grupo HGE y poder comparar resultados, se consideraron experiencias anteriores. De esta manera para el mapa de tipo de suelos se realizó una clasificación inicial asignando valores de 1 a 5 conforme a la capacidad de generación de escorrentía de cada uno de los terrenos, por lo que fue necesario un primer reconocimiento de las características de cada uno de los suelos. De igual modo se trabajó con el mapa de tipo de suelos, realizando una clasificación en términos de cobertura para lo cual se asignaron en esta ocasión valores de 1 a 6 como se había implementado en la experiencia del mapa de América del Sur (F. M. Fan et al., 2015).

Una vez generados ambos archivos vectoriales, fueron adecuados al formato de entrada ráster para posteriormente ser procesados con ayuda de la herramienta *Hydrologic Response Clases*, del componente IPH- Hydro Tools.

#### 1.1.15 Información de entrada para el Modelo de Grandes Bacías.

El MGB como información de entrada requiere en primer lugar un archivo denominado MINI, el cual es generado, para el caso de este proyecto, mediante IPH-Hydro Tools. En este archivo se encuentran las características geométricas de la cuenca y sus centroides. Sin embargo, la entrada para el modelo hidrológico se indica en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Información de entrada para el modelo hidrológico MGB

Ítem	Formato	Nombre del archivo	Descripción
Tabla de descripción de las URH	*.hrc	HRC_descrip	Archivo de descripción de las Unidades de Respuesta Hidrológica con su respectivo código
Localización de las estaciones pluviométricas	-	CP_CRL	Considera el código, longitud, latitud y nombre de la estación

Datos de precipitación diaria	ASCII	23155030, 23195130, 23190710, 37015020, 23195180, 23195200, 23205020, 23180050, 23190110, 23180080, 23180120, 23190520, 23190480, 23190810, 23190460, 23180110, 23180040, 23180020, 23180070, 23190500, 23190580, 23185010, 23195090, 23190560	Tabla cuyo contenido son las series de tiempo de precipitación diaria para cada una de las estaciones
Localización de las estaciones de aforo	-	CQ_CRL	Considera el código, longitud, latitud y nombre de la estación
Datos de caudal diario observado	ASCII	23197370, 23197400, 23197290, 23197430	Tabla cuyo contenido son las series de tiempo de caudal diario para cada una de las estaciones de aforo
Temperatura media	CRU GRID (dat)	grid_10min_tmp	Mapa de temperatura media mensual
Humedad relativa	CRU GRID (dat)	grid_10min_reh	Mapa de humedad relativa mensual
Brillo Solar	CRU GRID (dat)	grid_10min_sunp	Mapa de insolación (brillo solar) mensual
Velocidad del viento (10m)	CRU GRID (dat)	grid_10min_wnd	Mapa de velocidad del viento mensual
Elevación	CRU GRID (dat)	grid_10min_elv	Mapa de elevación

*Fuente.* Elaboración propia.

#### **2.1.1.4 Descripción de las Unidades de Respuesta Hidrológica.**

Se trata de un archivo que relaciona el código asignado para las URHs del proyecto, con un nombre denominado “Bloque” y su respectiva descripción como se observa en la Tabla 9. No

obstante, el orden de los bloques, en el caso de los mapas de URHs de fuentes diferentes al de América del Sur (F. M. Fan et al., 2015) puede ser completamente diferente.

La información de la Tabla 9 consiste en la descripción adjunta al archivo del mapa de URH para América del Sur a manera de ejemplo. Esta puede cambiar dependiendo del archivo de entrada para las URH.

**Tabla 9.** Ejemplo de la información contenida en el archivo de descripción de las URHs

<b>Unidades de Respuesta Hidrológica</b>		
<b>Código</b>	<b>Bloque</b>	<b>Descripción</b>
1	FlorRas	Bosque en suelo superficial
2	FlorProf	Bosque en suelo profundo
3	AgriRas	Agricultura en suelo superficial
4	AgriProf	Agricultura en suelo profundo
5	CampRas	Campo en suelo superficial
6	CampProf	Campo en suelo profundo
7	Varzea	Valle/ llanura y bosques inundables
8	ASI	Áreas Semi-Impermeables
9	Agua	Aguas

*Fuente.* Elaboración propia.

#### **2.1.1.5 Información pluviométrica.**

El modelo MGB como datos de entrada de precipitación, para cuencas localizadas fuera del Brasil, ofrece las opciones de datos MERGE para Sudamérica, datos satelitales de la misión TRMM, así como datos de precipitación diaria.

Para el caso de la cuenca del Río Lebrija, se recurrió a la opción de entrada de precipitación diaria de modo que se tuvieron en cuenta los datos provistos por entidades gubernamentales como IDEAM y la CDMB, los cuales previamente fueron trabajados en el modelo Hydro-BID (D. Guzmán et al., 2019; Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez et al., 2018; Nalesso, 2019), en los puestos pluviométricos mencionados en la Tabla 10 y mostrados en el APÉNDICE A. De

manera que anteriormente se había realizado un análisis de consistencia de datos mediante curvas de doble masa; se habían escogido las estaciones cuyas series no presentaban un número significativo de datos faltantes y fueron completados mediante métodos convencionales.

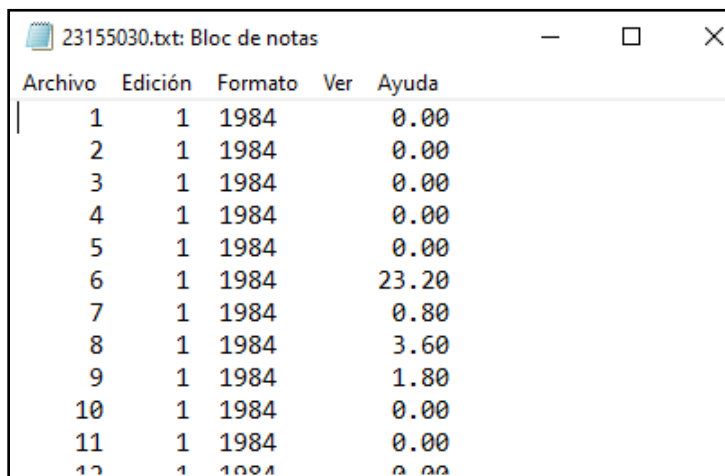
**Tabla 10.** Localización de las estaciones pluviométricas

<b>Nombre</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Código</b>
Aero_Yariguies	7.02638889	-73.8086111	23155030
Apto_Palonegro	6.96750000	-73.1330560	23195130
Barranca_Leb	8.01183300	-73.7244444	23190710
Berlin	7.18694400	-72.8686111	37015020
Cachira	7.73527778	-73.0516667	23195180
Cachiri	7.47388900	-72.9911111	23195200
Col_cooperativo	7.47500000	-73.9255560	23205020
El_Establo	7.54138889	-73.5980556	23180050
El_Libano	7.83805600	-73.4280560	23190110
Eloy_Valenzuela	7.48944444	-73.6783333	23180080
La_Coquera	7.22277778	-73.9191667	23180120
La_Dorada	7.99555600	-73.4397222	23190520
Los_Angeles	8.09888900	-73.5075000	23190480
Los_Planes	7.81261100	-73.3214444	23190810
Papayal	7.61555556	-73.6488889	23190460
Paturia	7.58611111	-73.8252778	23180110
Porvenir	7.45277778	-73.4827778	23180040
Pto_Wilches	7.34861111	-73.8930556	23180020
Sabana_Torres	7.39000000	-73.4894444	23180070
San_Alberto	7.75972200	-73.3883330	23190500
San_Daniel	8.08875000	-73.6187780	23190580
Villa_Leiva	7.45611111	-73.5372222	23185010
Vivero_Surata	7.36583300	-72.9875000	23195090
San_Rafael	7.57444444	-73.5597222	23190560

*Fuente.* Elaboración propia.

Como se mencionaba anteriormente, los datos de precipitación han de ser cargados en formato de columnas ASCII con extensión \*.txt, por cada estación individualmente indicando la fecha (DDMMAA) y la precipitación en mm/día, como se observa en la Figura 12.

**Figura 12.** Ejemplo de formato ASCII para precipitación



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1	1	1984		0.00
2	1	1984		0.00
3	1	1984		0.00
4	1	1984		0.00
5	1	1984		0.00
6	1	1984		23.20
7	1	1984		0.80
8	1	1984		3.60
9	1	1984		1.80
10	1	1984		0.00
11	1	1984		0.00
12	1	1984		0.00

*Fuente.* Elaboración propia.

#### 2.1.1.6 Información climatológica.

El MGB requiere como datos de entrada de clima las variables de temperatura (°C), humedad relativa del aire (%), velocidad del viento (10m), insolación (horas/días), presión atmosférica (mb).

Como fuente para estos datos, el MGB propone dos alternativas que serían aplicables para este caso particular. La primera consiste en la utilización de la base de datos *Climatic Research Unit* (CRU) (New et al., 2002), seleccionando las grillas demarcadas según se muestra en la Figura 13. La segunda consiste en utilizar una base de datos de clima con escala temporal diaria, empero, esta última opción se encuentra deshabilitada al momento de realizar el proyecto.

**Figura 13.** Descarga de datos Climatic Research Unit

File	Gzipped	Uncompressed	Description
<a href="#">readme.txt</a>	-	-	Documentation
<a href="#">grid_10min_problems.txt</a>	-	-	Problem log (none)
<a href="#">new_et_al_10minute_climate_CR.pdf</a>	-	3 MB	<i>Climate Research</i> paper describing dataset
<a href="#">grid_10min_pre.dat.gz</a>	28 MB	101 MB	Precipitation
<a href="#">grid_10min_rd0.dat.gz</a>	10 MB	56 MB	Wet-days
<a href="#">grid_10min_tmp.dat.gz</a>	11 MB	56 MB	Mean temperature
<a href="#">grid_10min_dtr.dat.gz</a>	9 MB	56 MB	Mean diurnal temperature range
<a href="#">grid_10min_reh.dat.gz</a>	12 MB	56 MB	Relative humidity
<a href="#">grid_10min_sunp.dat.gz</a>	12 MB	56 MB	Sunshine
<a href="#">grid_10min_frs.dat.gz</a>	7 MB	56 MB	Ground-frost
<a href="#">grid_10min_wnd.dat.gz</a>	6 MB	56 MB	10m windspeed
<a href="#">grid_10min_elev.dat.gz</a>	3 MB	15 MB	Elevation
<a href="#">tmc.iso.gz</a>	96 MB	509 MB	CD-ROM image of all files Use <i>Nero</i> , <i>Adaptec-CD</i> etc to cut to disc

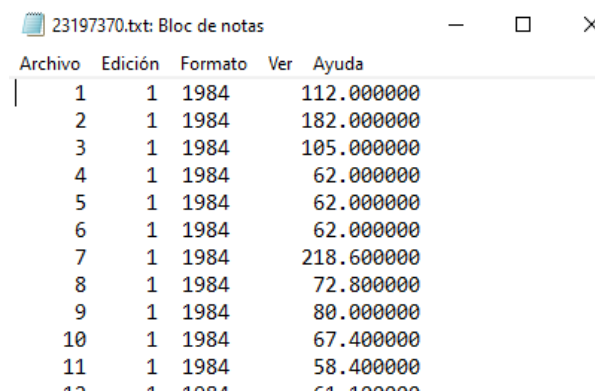
Fuente. Tomado del *Manual de exemplo de aplicaçao do modelo MGB 2018 utilizando o IPH-Hydro Tools*, Mediros et al., 2018.

### 2.1.1.7 Información hidrométrica.

Con el fin de comparar los caudales obtenidos en la simulación, el MGB requiere la generación de un archivo de caudales observados, además de su localización. Estos datos deben ser ingresados en formato ASCII por columnas \*.txt, como se detalla en la Figura 14, donde el orden corresponde a DDMMAA y al valor del aforo en m<sup>3</sup>/s.

En la cuenca se identificó la presencia de diferentes estaciones entre las cuales se destacan la estación de San Rafael, Angosturas, El Hoyo, El Conquistador y Café Madrid. Cabe notar que estas dos últimas estaciones se encuentran dentro de la subcuenca Alta y que tanto para la cuenca Cáchira como los afluentes no se tienen estaciones de aforo. Los caudales observados obtenidos del IDEAM como lecturas de caudal medio en escala temporal diaria, la cual coincide con la entrada del modelo.

**Figura 14.** Ejemplo de formato ASCII para datos de caudal observado

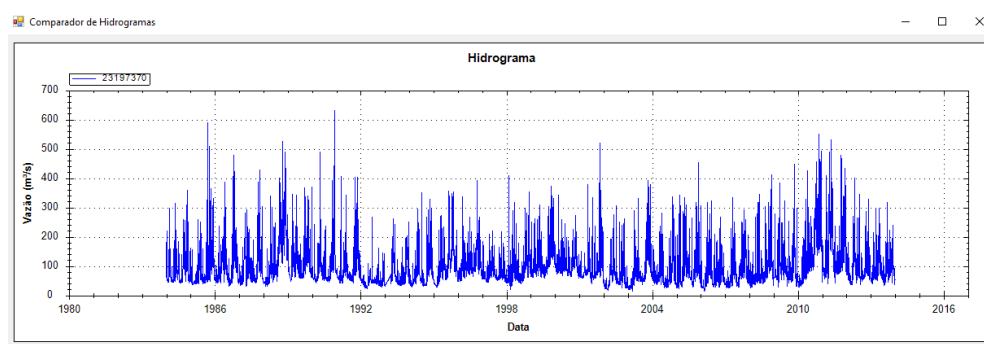


Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1	1	1984		112.000000
2	1	1984		182.000000
3	1	1984		105.000000
4	1	1984		62.000000
5	1	1984		62.000000
6	1	1984		62.000000
7	1	1984		218.600000
8	1	1984		72.800000
9	1	1984		80.000000
10	1	1984		67.400000
11	1	1984		58.400000
12	1	1984		61.100000

*Fuente.* Elaboración propia.

*Estación San Rafael.* Dado que los datos se encontraban completos no se recurrió a un proceso de llenado de datos y se consideró como estación para calibración. No obstante, se detalló la presencia de unas lecturas con presencia de algunos picos (ver Figura 15), los cuales pueden ser producto de algún evento en particular, así como de un posible error en la recolección de los datos, generando incertidumbre para los procesos de calibración y validación.

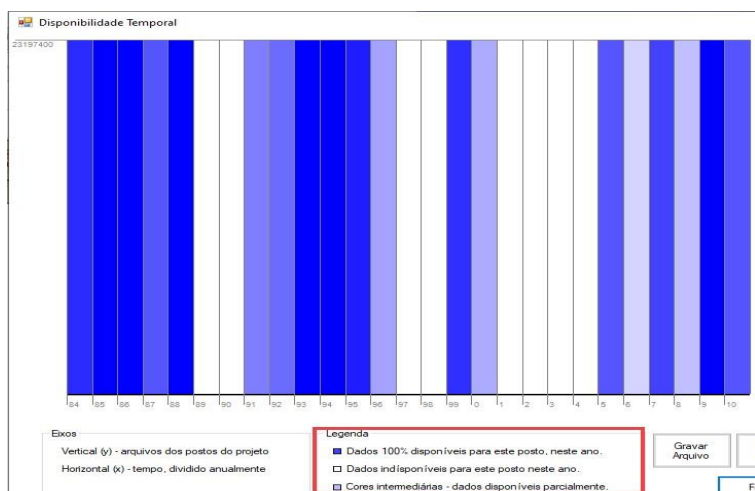
**Figura 15.** Serie de tiempo de caudal observado en la estación San Rafael



*Fuente.* Elaboración propia.

*Estación Angosturas.* Para este proyecto se descartó como estación para calibración, dado que se observó que no había registro de datos por periodos que se extendían alrededor de 3 años continuos (como se observa en la Figura 16), además fue suspendida en el año 2010. Dado que se encuentra localizada hacia la salida de las subcuencas Alta y Cáchira, se determinó que únicamente se utilizaría como un medio de apoyo gráfico.

**Figura 16.** *Serie de tiempo de caudal observado en la estación Angosturas*



*Fuente.* Elaboración propia.

*Estación El Hoyo.* La estación no pudo ser utilizada, dado que, al generar la red de drenaje, se produjo una bifurcación que impide obtener el flujo total en ese punto. Adicionalmente, la serie de datos presenta periodos prolongados de datos faltantes. Por lo que no es óptima ni para calibración y validación, ni para observación.

*Estación Café Madrid y El Conquistador.* Estas estaciones no se consideraron para la calibración y validación del modelo. Únicamente fueron utilizadas como apoyo gráfico.

De este modo, se optó por una calibración global de la CRL, tomando como estación de referencia la Estación San Rafael. Las estaciones se encuentran representadas en el mapa localizado en el APÉNDICE A.

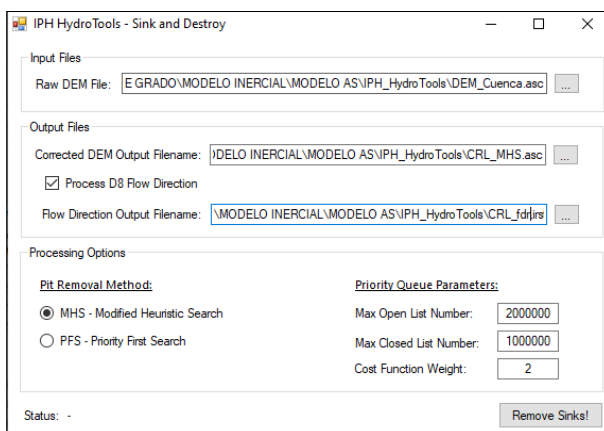
## 2.2 Etapa II. Construcción del banco de datos IPH

En esta etapa se trabajó lo concerniente a la delimitación de la cuenca (la generación de la red de drenaje y su segmentación), así como la creación de los bloques correspondientes a las diferentes URH. Para ello se trabajaron cuatro modelos distintos, esto con el fin de evaluar las respuestas ante las dos configuraciones de URH y con el fin, de en primera instancia cumplir con el objetivo de evaluar este modelo hidrológico y en segunda instancia, de sentar la base de un modelamiento hidrodinámico con esta herramienta.

### 1.1.16 Delimitación de la Cuenca Hidrológica.

Inicialmente se creó un proyecto partiendo del MDE en bruto, para luego mediante la herramienta *Sink and destroy* corregir las depresiones (Figura 17).

**Figura 17.** Remoción de depresiones topográficas del MDE

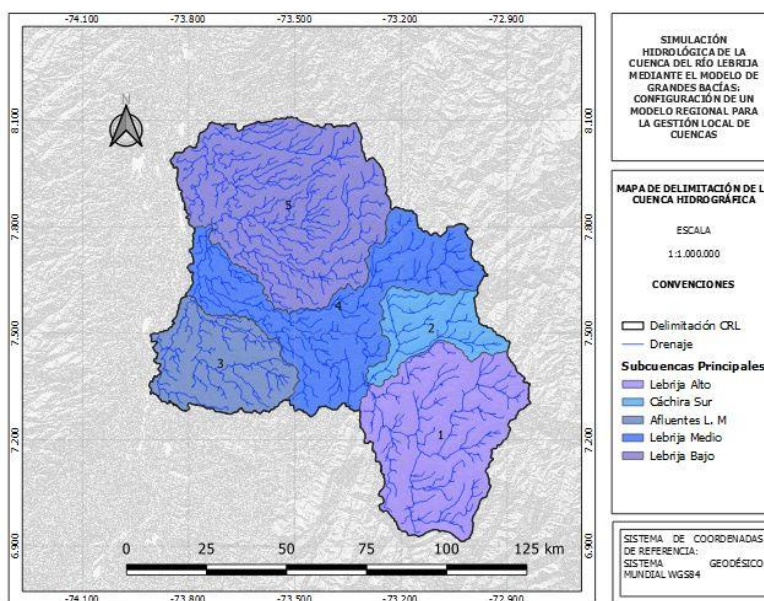


*Fuente.* Elaboración propia.

Seguidamente se generó el archivo de flujo acumulado y se procedió a definir la red de drenaje indicando un área de 5km<sup>2</sup> lo que equivale a un número de aproximadamente 584 celdas del MDE. Se consideró este umbral ya que permitía representar adecuadamente la densidad de la red.

A partir de esto se realizó la delimitación de la cuenca indicando el punto de salida de ésta utilizando una capa vectorial. El proceso se repitió para la creación de las subcuencas, buscando conservar la mayor similitud posible con la distribución que se tiene en los documentos POMCA y se puede observar en la Figura 18.

**Figura 18.** *Delimitación de la cuenca hidrográfica*



*Fuente.* Elaboración propia.

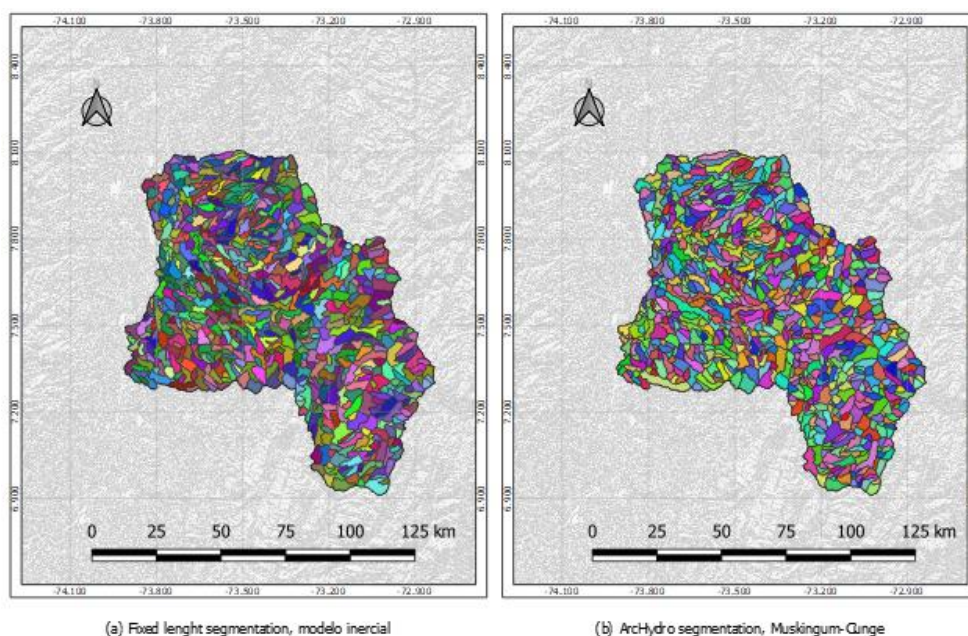
### 2.2.1.1 Segmentación de la red.

Dado que se buscaba aplicar los dos métodos de propagación del flujo se aplicó para los modelos MC la segmentación con la herramienta ArcHydro Segmentation, la cual realiza la segmentación tomando en cuenta los puntos de confluencia de los ríos aguas arriba y aguas abajo. Por otra parte, para el modelo HD se utilizó Fixed Length Segmentation, la cual realiza una segmentación tomando en cuenta una distancia mínima (10km) y permite la creación de mini cuencas de extensión similar.

### 2.2.1.2 Delimitación de las mini cuencas.

Una vez finalizada la segmentación fluvial se procedió a crear las mini cuencas. De acuerdo con los métodos mencionados en el paso anterior, se obtuvieron las distribuciones observadas en la Figura 19.

**Figura 19.** Delimitación de las mini cuencas, en la cuenca del Río Lebrija



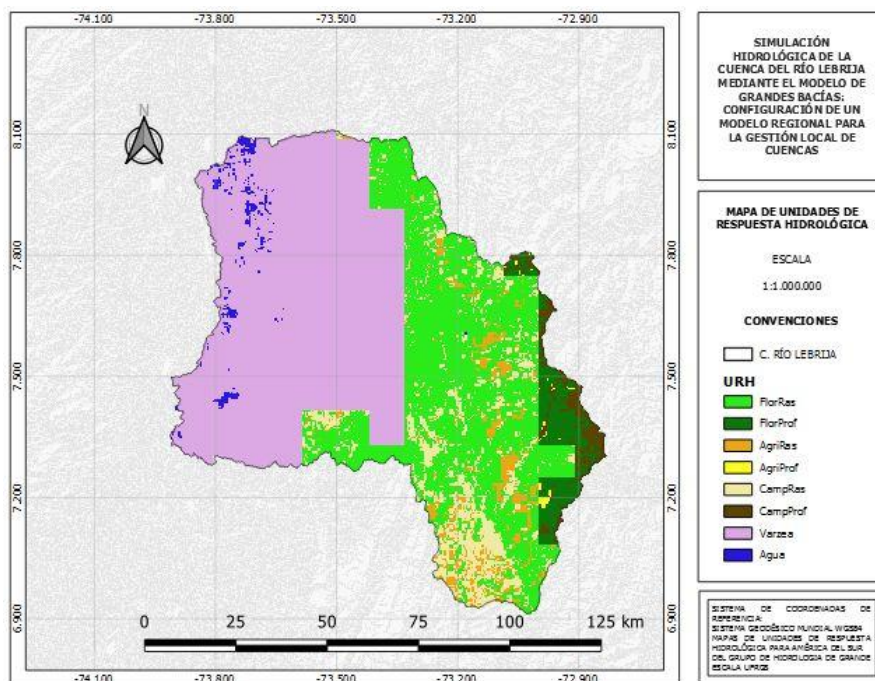
*Fuente.* Elaboración propia.

Hasta este punto se trabajaron de igual manera dos proyectos con iguales características para cada distribución obteniéndose un total de 661 mini cuencas para los proyectos con propagación HD y un total de 912 mini cuencas para los proyectos con propagación por MC.

### 2.2.1.3 Definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica.

Seguidamente se generaron los mapas de respuesta hidrológica de acuerdo con cada modelo y la información espacial correspondiente a cada mini cuenca. Para ello, por cada método de propagación se crearon dos mapas de URH, uno extrayendo el área de la cuenca delimitada Figura 20 el cual se denominó internamente como AS.

**Figura 20.** Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica extraído del Mapa de América del Sur

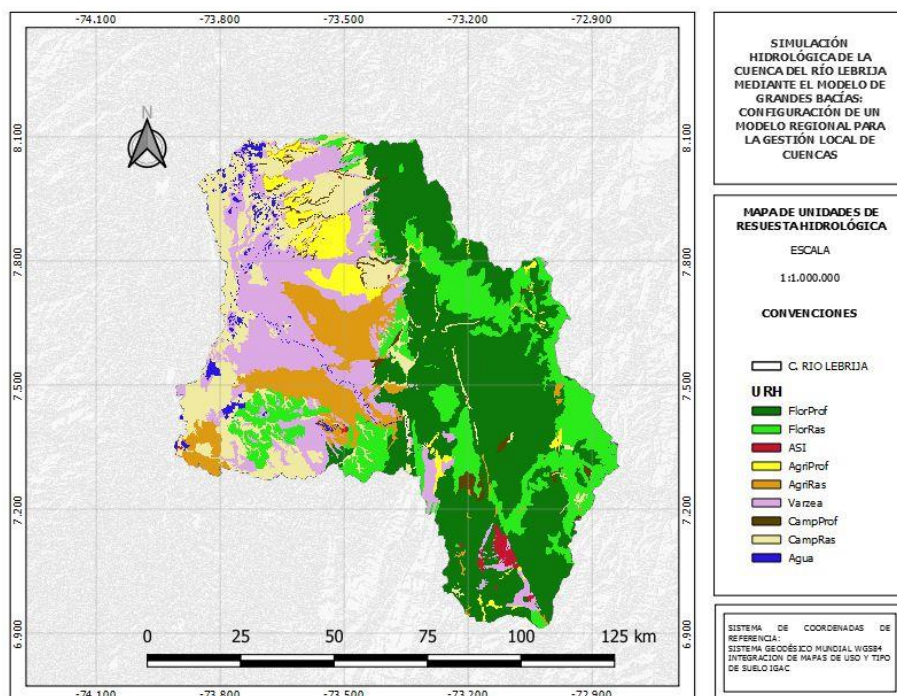


*Fuente.* Extracción del ráster de URH para América del Sur, Fan et al., 2015.

El otro, Figura 21, se obtuvo de la combinación de los mapas mencionados en las Figura 10 y Figura 11 una vez fueron procesados de acuerdo con lo indicado en el capítulo 2.13.1 del manual (Medeiros et al., 2018). Esto permitió generar un ráster de resolución 90x90m, igual a del MDE, como se observa en la Figura 21. Este consta de una distribución, si bien similar, también con diferencias características como lo es la existencia de las áreas semi-impermeables demarcadas en rojo.

Al momento de generar dicho ráster y asignar los valores que indican el código de cada bloque, el orden se vio alterado respecto al archivo de descripción de URH mencionado en la Tabla 9.

**Figura 21.** Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica basado en información nacional



*Fuente.* Elaboración propia.

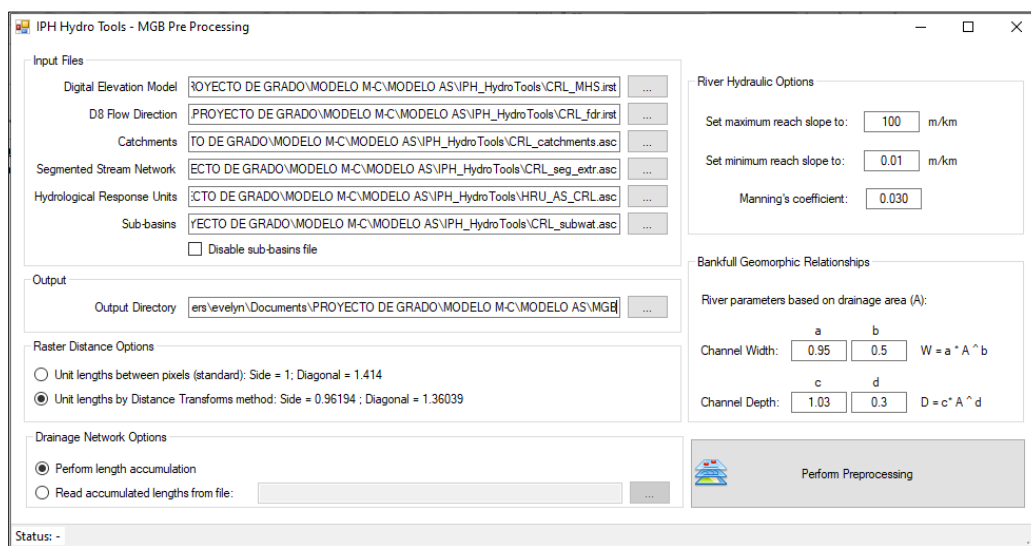
#### 1.1.17 MGB- Preprocesamiento.

Una vez listos los mapas de URH y demás pasos anteriores, se procedió a generar el archivo MINI.gtp (ver Figura 22), en el que se almacenará la información correspondiente a la topología para cada mini cuenca, incluyendo en columnas denominadas Bloques el porcentaje de URH que se encuentra en ellas.

Para la generación de este archivo se tuvo como entradas el MDE con depresiones corregidas, la dirección del flujo, las mini cuencas y subcuencas generadas, así como la segmentación elegida y las URH. Adicionalmente, como se observa en la Figura 22, se mantuvieron los parámetros que estaban por defecto, entre ellos el coeficiente de Manning, el cual coincidía con valores

indicados en algunos estudios previos y el reportado para la zona en la experiencia con el modelo (Vinícius Siqueira et al., 2018).

**Figura 22.** Pre-Procesamiento en IPH Hydro Tools para generación de archivo *MINI.gtp*



*Fuente.* Elaboración propia.

### 2.3 Etapa III. Ingreso de la información al MGB y su primera simulación.

A partir de esta etapa se comienza a trabajar con el plugin del MGB.

El ingreso de la información pluviométrica e hidrométrica se llevó a cabo teniendo en cuenta la separación de los periodos de calibración y de validación del modelo, estos se prepararon como se muestra en la Tabla 11.

**Tabla 11.** Ventana de tiempo para la calibración y validación del modelo

Características	Calibración	Validación
Periodo de simulación	1984-2003 (20 años)	2004-2012 (9 años)
Periodo de calentamiento (warm-up)	(1 año)	(1 año)

---

Periodo efectivo	1985-2003 (19 años)	2005-2012 (8 años)
------------------	------------------------	-----------------------

---

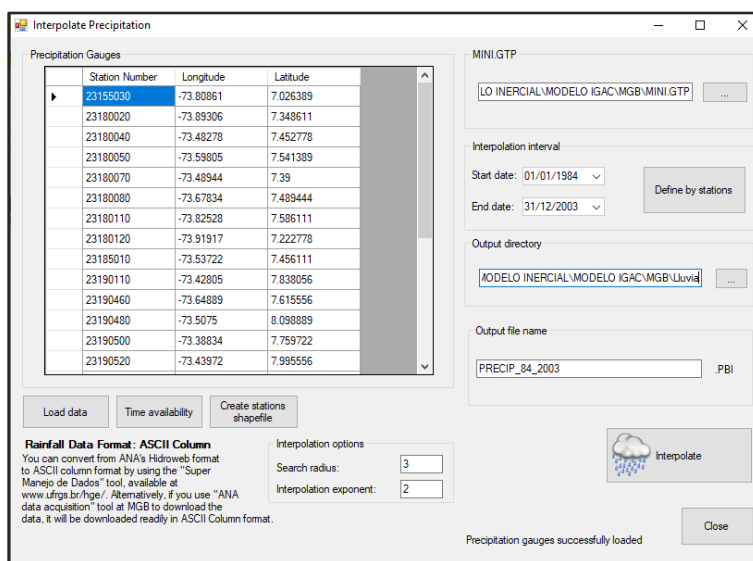
*Fuente.* Elaboración propia.

### 1.1.18 Interpolación de la precipitación.

Al llevar a cabo este proceso, se cargaron inicialmente las estaciones junto con sus coordenadas por medio de la pestaña *Tools/Internal Database* fueron añadidas, para luego llamarlas mediante su código de identificación.

Como anteriormente se mencionó, los datos utilizados fueron aquellos trabajados por el IDEAM, de manera que el método de entrada al MGB es por la pestaña *Precipitación/ Using ANA data* como se indica en la Figura 23.

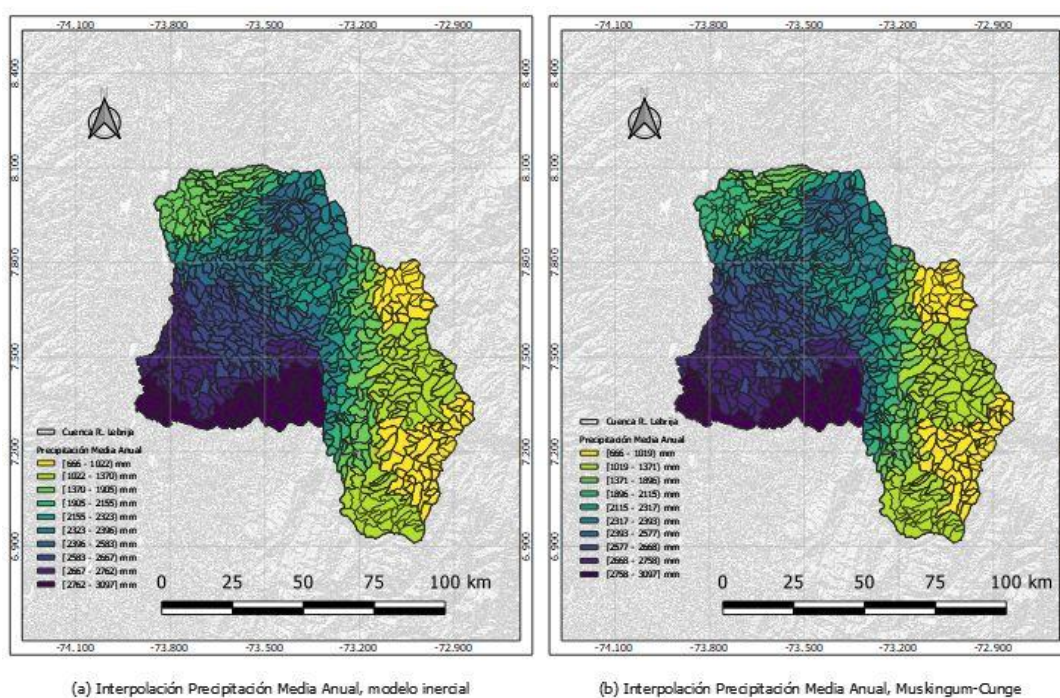
**Figura 23.** Ventana de interpolación de la información de precipitación



*Fuente.* Elaboración propia.

Luego estos fueron interpolados, utilizando internamente el método de la Distancia Inversa Ponderada, y se generó tanto un archivo vectorial con la ubicación de las estaciones pluviométricas, como el ráster de precipitación media anual en la Figura 24. Este proceso se realizó de manera independiente para los modelos y tomando en cuenta la separación de los periodos de calibración y de validación.

**Figura 24.** *Precipitación media anual por mini cuenca, en la cuenca del Río Lebrija*



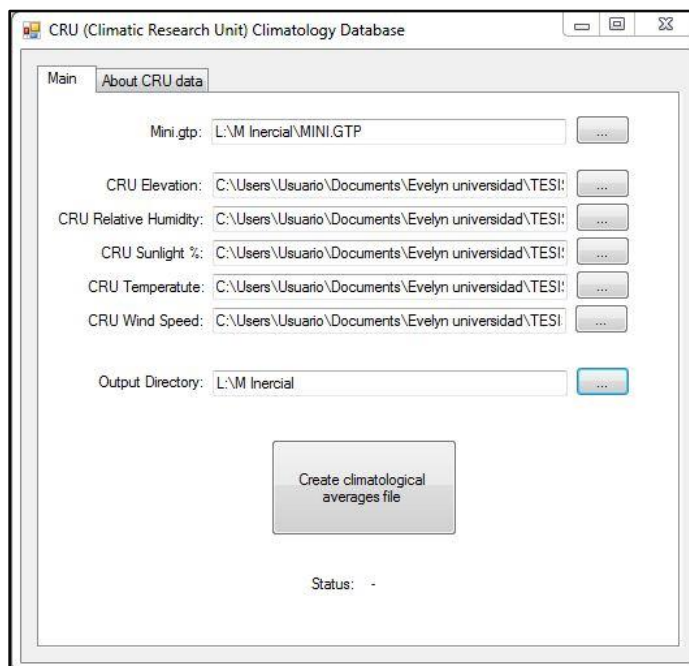
*Fuente.* Elaboración propia.

### 1.1.19 Datos climatológicos.

En cuanto a los datos climatológicos, estos fueron procesados mediante la pestaña *Climate variables / Using CRU climatology database (global)*, al introducir los datos previamente descargados como se observa en la Figura 25.

Esta herramienta genera un archivo denominado medias.cru, el cual también presenta un formato ASCII en el que se identifican inicialmente por medio de las coordenadas la elevación y luego para cada ID de mini cuenca un valor medio mensual.

**Figura 25.** Pestaña para creación de medias de clima



*Fuente.* Elaboración propia.

#### 1.1.20 Datos de caudal observado.

Con relación a los datos de caudal, se cargaron cuatro estaciones para generar el archivo de caudal observado. No se incluyó o generó ningún archivo de sustitución de caudal, y únicamente para efectos de calibración se recurrió a la estación de San Rafael.

Para generar dicho archivo, al igual que en el caso de las estaciones pluviométricas, fue necesario incluir las estaciones de aforo en la base interna de datos para después de eso extraer la capa vectorial con su localización. Esto facilita el corroborar la ubicación del aforo sobre la mini

cuenca que arroja el modelo de acuerdo con el archivo MINI.gtp, como se observa en la Figura 26.

**Figura 26.** Ventana para creación de datos de caudal observado

The screenshot shows a software window titled 'Flow data' with two main panels. The left panel, 'Gauge Stations', contains a table with columns 'Gauge Number', 'Longitude', and 'Latitude'. The right panel, 'Observed Discharge', contains a table with columns 'Gauge', 'Catchment', and 'Action'. Below the tables are several buttons and a date interval selector.

Gauge Number	Longitude	Latitude
23197290	-73.14645	7.166333
23197370	-73.56055	7.578055
23197400	-73.33083	7.335278
▶ 23197430	-73.04111	6.989444
*		

Gauge	Catchment	Action
23197290	622	O
23197370	649	O
23197400	643	O
23197430	508	O
*		

Buttons: Load data, Temporal availability, Generate Shapefile,  Automatically Suggest Catchment, Create observed Discharge file, Create substituted Discharge file, Close.

Date interval: Start date: 01/01/1984, End date: 31/12/2003.

Data Format: ASCII Column

You can convert from ANA's Hidroweb format to ASCII column format by using the "Super Manejo de Datos" tool, available at [www.ufrgs.br/hge/](http://www.ufrgs.br/hge/). Alternatively, if you use "ANA data acquisition" tool at MGB to download the data, it will be downloaded readily in ASCII Column format.

Fuente. Elaboración propia.

### 2.3.1.1 Parámetros asociados a la vegetación.

Estos corresponden a los parámetros fijos del modelo los cuales fueron consultados con el fin de identificar los valores característicos de la cuenca de estudio. Con este fin se recurrió a información satelital (NASA, n.d.) sobre puntos específicos cuyas características coincidían con la descripción en la pestaña de entrada para valores de albedo. En cuanto a los demás valores se consultaron los POMCAS y los Estudios de Zonificación. La información de entrada fue la misma para los cuatro modelos y se observa en la siguiente Figura 27.

Figura 27. Pestaña para establecer los parámetros fijos del modelo

Albedo	Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance									
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	ForRas	0.16	0.15	0.16	0.16	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16
	ForProf	0.17	0.17	0.18	0.17	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18
	AgriRas	0.16	0.15	0.16	0.16	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.15
	AgriProf	0.17	0.17	0.18	0.17	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18
	CampRas	0.16	0.15	0.16	0.16	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16
	CampProf	0.17	0.17	0.18	0.17	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.17	0.18	0.18
	Verzea	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
	ASI	0.16	0.15	0.16	0.16	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.16
	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
*													

(a)

Albedo	Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance									
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	ForRas	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	ForProf	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00	9.00
	AgriRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	AgriProf	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
	CampRas	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	CampProf	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
	Verzea	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	ASI	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	Agua	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
*													

(b)

Albedo	Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance									
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	ForRas	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
	ForProf	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
	AgriRas	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	AgriProf	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
	CampRas	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	CampProf	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	Verzea	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	ASI	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Agua	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
*													

(c)

Albedo	Leaf area index	Average vegetation height		Surface resistance									
	HRC	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December
▶	ForRas	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.	100.
	ForProf	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.
	AgriRas	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	AgriProf	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.	150.
	CampRas	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
	CampProf	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
	Verzea	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	ASI	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
	Agua	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
*													

(d)

Fuente. Elaboración propia.

### 1.1.21 Parámetros calibrables.

Enseguida se procedió a establecer los parámetros del suelo de acuerdo con cada una de las clases de respuesta hidrológica. Para ello se tuvieron como guía de punto de partida los valores propuestos en el manual del MGB.

Los parámetros se adecuaron a cada subcuenca, particularmente se observaron los registros de caudal para asignar un valor al parámetro CB el cual determina el tiempo de residencia del reservorio. Inicialmente, todos los modelos fueron configurados bajo los mismos parámetros de manera que se pudiese establecer una comparación preliminar.

A continuación, se muestra en la Figura 28 parte de la interfaz donde se introducen estos parámetros y dónde se ejecutó la calibración manual. La totalidad de los parámetros se encuentra consignada en el APÉNDICE B.

**Figura 28.** Ventana para introducir los parámetros de suelo

The screenshot displays the 'Soil Parameters' window. At the top, there are three text boxes for file paths: HRCs, MINI.GTP, and Soil Parameters, each with a browse button. To the right are 'New soil parameters file' and 'Save soil parameters file' buttons. Below these is a 'Subwatershed' section with navigation arrows and a value of 5. The main area is a 'Parameters' table:

HRC	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Flor_ras	200	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Flor_prof	300	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Agr_ras	150	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Agr_prof	250	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Cam_ras	150	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Cam_prof	300	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Varzeas	100	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1
Sem_per	100	0.23	4.9	35	0.67	0	0.1

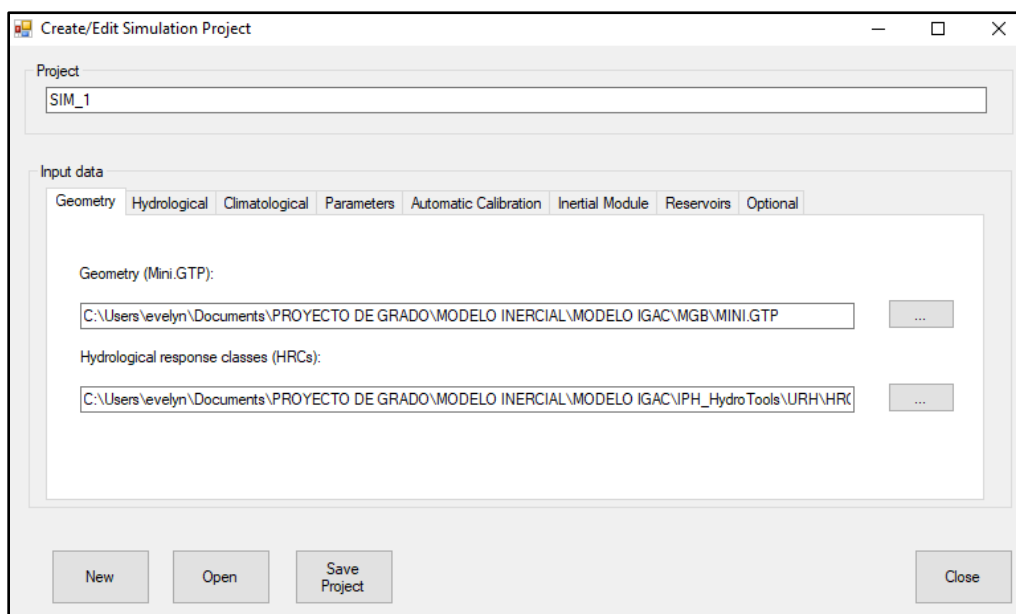
Below the table are 'Number of HRCs: 9' and 'Number of catchments:'. To the right of the table are input fields for CS (10), CI (60), CB (1950 h), and QB (0.01 m<sup>2</sup>/s.km<sup>2</sup>), each with a suggestion. At the bottom left are 'Tools' buttons for copying parameters. On the right is a diagram showing a tree with precipitation (PC), evapotranspiration (ET), infiltration (Pn), and runoff (Dsup, Dint, Dbas).

*Fuente.* Elaboración propia.

### 1.1.22 Primera simulación.

Una vez fueron generados todos los archivos de entrada, se procedió a la creación como tal del proyecto de simulación por medio de la herramienta *Create/ Edit simulation Project* Figura 29. Esta cuenta con una serie de pestañas donde se deben introducir los archivos respectivos y en especial cargar el archivo COTA\_AREA.FLP en el caso de los modelos con propagación por el método hidrodinámico.

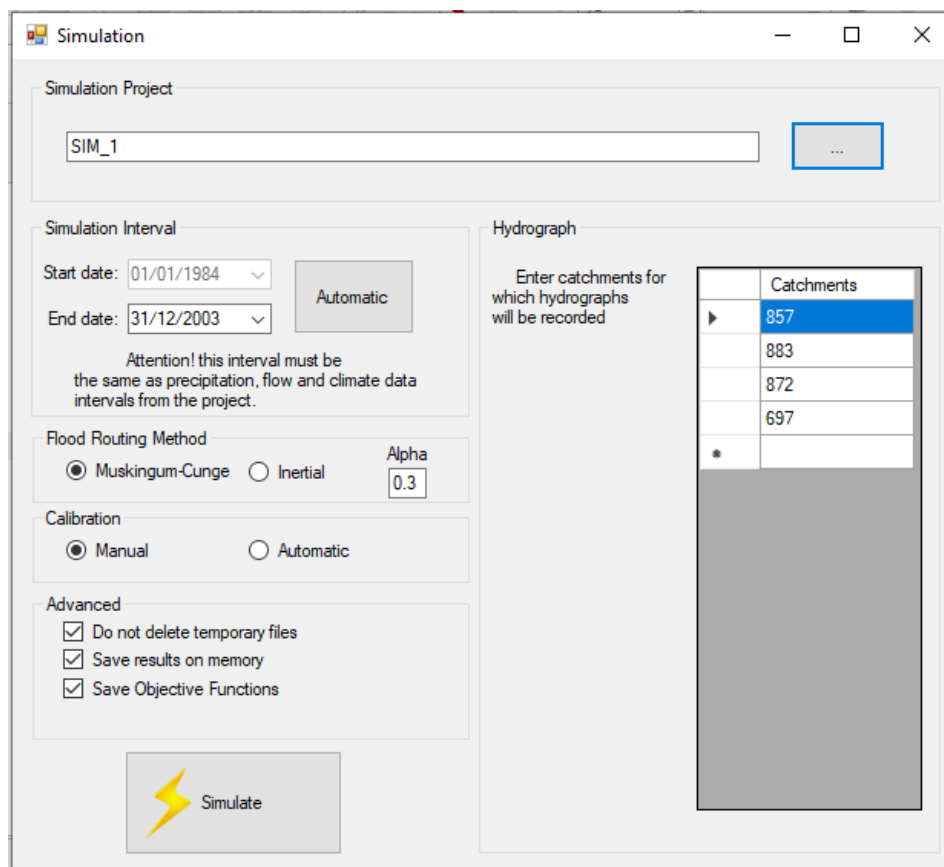
**Figura 29.** Creación de un proyecto para simulación



*Fuente.* Elaboración propia.

Seguidamente, al seleccionar la herramienta *Run Simulation* se procedió a seleccionar el modelo que se ejecutaría indicando el método elegido para la propagación del flujo, así como el tipo de calibración que se haría después. Además, en el espacio derecho como se observa en la Figura 30, se indicaría las mini cuencas de donde se espera obtener resultados de caudal simulado.

**Figura 30.** Primera corrida del modelo, MC AS



*Fuente.* Elaboración propia.

#### 2.4 Etapa IV. Calibración y validación del modelo.

Dados resultados no satisfactorios tras la primera simulación, se pudo establecer la necesidad de modificar los parámetros de suelo a través del proceso de calibración. El cual, en primer lugar, de acuerdo con la recomendación (Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2017), se ejecutó de forma manual dados los bajos valores en los indicadores de desempeño.

## 1.1.23 Calibración Manual.

Como procedimiento previo a la calibración manual se llevó a cabo el análisis de sensibilidad con los parámetros de suelo. De acuerdo el efecto producido en la simulación, se clasificaron como se muestra en la Tabla 12.

**Tabla 13.** Análisis de sensibilidad de los parámetros de suelo

<b>Parámetros</b>	<b>Descripción</b>	<b>Sensibilidad</b>
<b>Wm</b>	Capacidad de almacenamiento del suelo.	Media - Alta
<b>b</b>	Es el parámetro que controla la distribución de la capacidad de almacenamiento del suelo.	Muy Alta
<b>Kbas</b>	Es el parámetro que da la tasa de percolación del agua subterránea en caso de que sea un suelo saturado y cuyas unidades se da en $[mm \Delta t^{-1}]$ .	Alta
<b>Kint</b>	Es semejante a la conductividad hidráulica saturada, un parámetro para controlar el flujo subsuperficial, $[mm \Delta t^{-1}]$ .	Media-Alta
<b>XL</b>	Parámetro que controla la curva de reducción del reservorio subsuperficial.	Parámetro por defecto
<b>CAP</b>	Parámetro de ascensión capilar.	Parámetro por defecto
<b>Wc</b>	Parámetro para el almacenamiento residual.	Parámetro por defecto
<b>CS</b>	Parámetro que corrige la estimación del tiempo de concentración para drenaje superficial, está dados por la ecuación de Kirpich.	Bajo
<b>CI</b>	Parámetro que corrige la estimación del tiempo de concentración para drenaje subsuperficial, está dados por la ecuación de Kirpich.	Bajo
<b>CB</b>	Es el tiempo de residencia del agua subterránea, que puede ser estimado de la curva de recesión considerando un largo periodo de sequía.	Medio
<b>QB</b>	Este no es un parámetro calibrable, sino una condición inicial del modelo.	

*Fuente.* Elaboración propia.

Una vez identificados se procedió a realizar la calibración manual, inicialmente, modificando el parámetro *CB* de acuerdo con las indicaciones del manual (Instituto de Pesquisas Hidráulicas, 2017) y luego se prosiguió a modificar un solo parámetro de aquellos identificados con muy alta y alta sensibilidad. Continuamente se realizaron simulaciones buscando mejorar el desempeño de los modelos. Este proceso comenzó con las subcuencas de la parte alta hacia la media y finalmente la baja.

Asimismo, se realizaron simulaciones con combinaciones de los parámetros con mayor incidencia en la calibración y se procedió a modificar la capacidad de almacenamiento para cada URH. De igual manera se modificó la conductividad hidráulica *Kint*, y los demás parámetros restantes hasta conseguir un mejor valor en los indicadores Nash y PBIAS.

#### 1.1.24 Calibración automática.

La calibración automática se llevó a cabo mediante la herramienta *Automatic Calibration Parameters*, Figura 31. Esta herramienta consta de tres pestañas donde, en respectivo orden, se indican los rangos y modos de calibración, se crean los parámetros de suelo posterior a la calibración automática y se indican los valores recomendados para estos parámetros.

En la pestaña de calibración se indicaron los parámetros calibrados manualmente, se establecieron los rangos y se determinó la calibración de los 35 parámetros de suelo para la subcuenca deseada. Se indicó que estos parámetros se utilizarían para calibrar cada subcuenca por separado junto con la estación respecto a la cual se realizaría la calibración, en este caso, la estación de San Rafael.

Asimismo, se seleccionaron las funciones objetivo Nash-Sutcliff, Nash-Log y PBIAS de entre las cuatro disponibles. Luego se estableció un total de 100 individuos como población inicial para la cual se realizarían como máximo 500 iteraciones.

**Figura 31.** Ventana para creación de parámetros para la calibración automática

Parameters for automatic calibration

Create Automatic Calibration File Create New Soil Parameters File Soil Parameters description

HRCs: C:\Users\levlyn\Documents\PROYECTO DE GRADO\MODELO M-C\MODELO AS\IPH ...

Soil Parameters: C:\Users\levlyn\Documents\PROYECTO DE GRADO\MODELO M-C\MODELO AS\MG ...

Parameters for Automatic Calibration: C:\Users\levlyn\Documents\PROYECTO DE GRADO\MODELO M-C\MODELO AS\MG ...

Save parameter file for automatic calibration

Calibration specifications

Number of individuals in a population: 100

Maximum number of generations: 500

Objective functions

Nash-Sutcliffe efficiency

Nash-Sutcliffe efficiency of the logarithm of the flows

Error module in the total volume

Q90 error

Parameters

HRU	Lower Wm	Average Wm	Highest Wm	Calibrate Wm?	Lower b	Average b	Highest b	Calibrate b?	Lower Kbas	Average Kbas	i
Flor_prof	69.66	232.2	417.96	1	0.12	0.2	0.36	1	1.32	4.4	5
Agr_ras	50	113.9	205.02	1	0.12	0.37	0.666	1	1.431	4.77	5
Agr_prof	58.05	193.5	348.3	1	0.12	0.2	0.36	1	1.32	4.4	5
Cam_res	50	113.9	205.02	1	0.12	0.37	0.666	1	1.431	4.77	5
Cam_prof	69.66	232.2	417.96	1	0.12	0.2	0.36	1	1.32	4.4	5
Varzeas	50	138.6	249.48	1	0.12	0.37	0.666	1	1.221	4.07	5
Sem_ier	50	131.5	236.7	1	0.12	0.2	0.36	1	0.672	2.24	4

Number of HRCs: 9 Number of catchments:

Reference subwatershed: 1

Calibrate which subwatershed?

Subwatershed

Gauge stations used on the calibration

Observed flows file: C:\Users\levlyn\Documents\PROYECTO DE GRADO\MODELO...

Catchment	Gauge Station	Weight 1	Weight 2	Weight 3
857	23197290	0	0	0
883	23197370	1	1	1
872	23197400	0	0	0
697	23197430	0	0	0

CS: 1 19.44 20 Suggestion: Values between 1 and 20

CI: 50 157.8 200 Suggestion: Values between 50 and 200

CB: 1000 3083.6 10000 h Suggestion: Use base flow filter

QB: 0.01 m<sup>3</sup>/s km<sup>2</sup>

Close

Fuente. Elaboración propia.

Al momento de ejecutar la calibración, esta se realizó utilizando el método de propagación de caudales de MC, dada la duración de esta, basado en lo mencionado por Pontes et al., (2015) respecto al modelo HD.

Una vez realizado, se dio prioridad a los resultados para el indicador Nash, a partir del cual se continuó la calibración manual. Los valores definitivos para la validación se presentan en la sección del APÉNDICE C para cada uno de los modelos.

#### 1.1.25 Validación del modelo.

A continuación, se efectuó la validación de los cuatro modelos. Para ello se repitieron los pasos mencionados en la Etapa III, esta vez con los datos referentes al periodo de validación.

No obstante, los parámetros de vegetación y de suelo permanecieron fijos y con los resultados obtenidos hasta la calibración.

## **2.5 Etapa V. Evaluación de Escenarios de Clima Futuro**

En esta sección se expone la metodología empleada para la obtención de las proyecciones de clima para los escenarios de forzamiento radiativo planteados en el informe AR5 del IPCC. De acuerdo con el informe se identifican cuatro trayectorias principales (RCP, por sus siglas en inglés) que describen los posibles escenarios futuros de clima al considerar distintas concentraciones de gases efecto invernadero emitidos a final del siglo 21.

Para efectos de este estudio se consideraron los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, donde el primero representa una tendencia intermedia, con un crecimiento inicial el cual se estabiliza alcanzando una potencia de  $4.5 \text{ W.m}^{-2}$ , mientras que el escenario RCP 8.5 es un escenario pesimista en donde esta concentración sigue en aumento y de la que se proyecta un aumento en la temperatura media global de aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$ .

#### 1.1.26 Modelo Climático Global.

El Modelo Climático Global (MCG) es una herramienta que permite la representación de diferentes procesos y propiedades físicas, químicas y biológicas que inciden en el sistema climático. Estos modelos son considerados como fuente de información en lo que respecta al cambio climático. Sin embargo, dadas sus características requieren de gran capacidad

computacional para ser ejecutados y sus salidas son obtenidas generalmente en rejillas de aproximadamente 100 a 200 km de resolución (Chou et al., 2014).

Siendo esta una limitación, se requiere llevar a cabo un proceso de reducción de escala, a fin de poder dar uso a la información provista. En cuanto a ello, se puede decir que existen principalmente dos métodos: la reducción dinámica y la reducción estadística. La reducción dinámica, consiste en la utilización de modelos computacionales denominados Modelos Climáticos Regionales (MCRs), los cuales buscan mediante condiciones frontera y ecuaciones físicas aumentar la resolución mediante ensambles con los MCGs. No obstante, estos modelos siguen siendo costosos en términos computacionales. A diferencia del método anterior, la reducción estadística es realizada mediante diferentes técnicas que consideran estaciones meteorológicas con series observadas como punto de referencia para la reducción del sesgo. Su desventaja radica en que no toma en cuenta los procesos físicos y al no ser dinámicas sino estáticas, presentan problemas cuando surgen cambios como en los escenarios de las trayectorias planteadas.

De acuerdo con la revisión bibliográfica, para el caso de Colombia existen unos MCGs que representan mejor la zona de estudio y que previamente en otras investigaciones han sido validados como son los modelos MIROC5, MPI-ESM-LR y el HadGEM2-ES (D. F. Gómez & Rodríguez, 2018). Estos modelos, en especial los dos primeros se han destacado por su proximidad en la correlación en términos de precipitación y clima para la zona Andina, siendo el MIROC5 el seleccionado para efectos de este trabajo.

El MCG MIROC5, es un modelo interdisciplinar japonés realizado por The University of Tokyo Center for Climate System Research, National Institute for Environmental Studies, Japan, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology Frontier Research Center for Global Change

(Chou et al., 2014). El modelo cuenta con una rejilla de  $1.41^{\circ} \times 1.41^{\circ}$  de resolución, lo que equivale a aproximadamente 150km en horizontal y 40 niveles atmosféricos verticales.

#### 1.1.27 Modelo Climático Regional.

Con el fin de mejorar la resolución para los datos de entrada del modelo hidrológico, se consideró el utilizar un ensamble modelo de circulación MIROC5 con el MCR Eta-INPE (Chou et al., 2014; Chou et al., 2014; Lyra et al., 2018), operado por el CPTEC – INPE de Brasil. Este modelo fue modificado y validado para el estudio del cambio climático y puesto a disposición en la plataforma PROJETA (Hölbjg et al., 2018), además de ser referenciado por la misión CORDEX para América del Sur (CORDEX, 2020).

La metodología consistió en la obtención de las series de precipitación de resolución temporal diaria, además de las series de temperatura media 2m, humedad relativa, velocidad del viento a 10 m, presión atmosférica y radiación de onda corta para la entrada de brillo solar. Esta información se obtuvo para el área de la cuenca con una resolución espacial de aproximadamente 20 km. Las series de precipitación se compararon con las estaciones más cercanas a los centroides de píxel del MCR, y la información climatológica fue comparada con las medias de clima CRU utilizadas como entrada en el modelo hidrológico con el fin de disminuir la incertidumbre y realizar los ajustes respectivos (F. M. Fan & Bravo, 2016). La información descargada corresponde a un periodo histórico y unos periodos para la simulación de los escenarios como se muestra en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Periodos para simulación de escenarios RCP

<b>Características</b>	<b>Periodo</b>
Periodo Histórico	1984-2004

---

Escenario RCP 4.5	2011-2040
	2041-2070
Escenario RCP 8.5	2071-2099

---

*Fuente.* Elaboración propia.

#### 1.1.28 Corrección del sesgo.

Dado que existe una diferencia entre las series observadas y el periodo histórico simulado por el MCR, se recurrió a dos estrategias para la reducción del sesgo mediante técnicas estadísticas.

Para las series de precipitación se aplicaron los métodos conocidos como *Linear Scaling (LS)*, *Local Intensity Scaling (LOCI)*, *Power Transformation (PWTR)* y *Distribution Mapping (DM)* (Teutschbein & Seibert, 2012). Mientras que, para las series climatológicas se aplicó directamente el método *Linear Scaling*.

En el caso de la precipitación el procedimiento consistió en identificar las estaciones cercanas a los centros de píxel del modelo y con ayuda de la herramienta CMHyd (Rathjens et al., 2016), se realizaron las correcciones. Sin embargo, se evidenciaron ciertos valores anormales para una estación virtual (centro de píxel) en sus factores de corrección. Esto permitió identificar que para ciertos puntos era evidente la sobre estimación en la precipitación. Se aplicaron los diferentes métodos con el fin de determinar el óptimo para efectuar la corrección que se aplicaría también a las series de los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, para ello se evaluó el desempeño de la serie del píxel correlacionado a su punto más cercano mediante los criterios o indicadores expuestos en la Tabla 15.

El proceso con la información climatológica consideró la ubicación de los centroides para cada mini cuenca a los que fue asignado el valor del píxel más cercano, *Nearest Neighbor method*.

Seguidamente, los valores fueron comparados con los valores de las medias mensuales de clima CRU, realizando la corrección por escalamiento lineal, de tipo aditivo.

**Tabla 15.** Indicadores estadísticos para la evaluación del desempeño de los procedimientos de corrección de sesgo

Indicador	Fórmula	Descripción
Coefficiente de correlación de Pearson de [-]	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}$	Mide el grado de asociación lineal entre la serie observada y la simulada. Donde los valores -1 y 1 son óptimos y disminuye al aproximarse a 0, siendo este valor el indicador de ausencia de relación.
Coefficiente de determinación de [-]	$r^2$	Mide la fracción de varianza para una variable x e y. Tiene como valor óptimo 1.  Su valor óptimo es 0. A diferencia de los indicadores $r$ y $r^2$ permite tener mejor información acerca del modelo simulado respecto al valor observado puesto que utiliza el valor absoluto de manera que se consideren ambos, errores por exceso y por defecto.
Error medio absoluto de [mm]	$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  P_i - O_i $	Este indicador es similar al MAE, con la diferencia de que es más sensible frente a grandes errores. Tiene como valor óptimo 0. El valor óptimo para este indicador es 1; un valor de 0.5 indica que el MAE equivale a la mitad del MAD (Desviación media absoluta de los datos observados). Valores negativos indican que el MAE es mayor que el doble del MAD.
Raíz del error medio cuadrático de [mm]	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$	
Índice de concordancia de [-]	$d_r = \begin{cases} 1 - \frac{MAE}{2MAD}, & MAE \leq 2MAD \\ \frac{2MAD}{MAE} - 1, & MAE > 2MAD \end{cases}$	

---

BIAS, error  
sistemático o  
error medio de  
sesgo

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

Considera el promedio de los valores. A diferencia del MAE, conserva el signo. Este indicador debe examinarse en consideración de los anteriores mencionados, pues un valor óptimo de 0, no indica necesariamente ausencia de error.

---

*Fuente.* Adaptado de *Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del Proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia*, Bonilla-Ovallos and Mesa Sánchez 2017.

Una vez realizadas las respectivas correcciones de las series se procedió a realizar las simulaciones para los escenarios actual y futuros, así como a realizar la estimación de la oferta hídrica.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del proceso de modelamiento de la CRL desde la caracterización morfológica hasta los resultados para los periodos de calibración y validación.

#### 3.1 Características Morfológicas de la Cuenca Hidrográfica del Río Lebrija

A partir del MDE, con ayuda de las herramientas topológicas de QGIS y el archivo MINI.gtp se trabajaron los parámetros de mencionados en la Tabla 16.

**Tabla 16. Parámetros morfológicos de la cuenca del Río Lebrija.**

<b>Parámetros</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
<b>Parámetros generales</b>		
Área de la Cuenca	km <sup>2</sup>	9064.781
Perímetro	km	731.211
Longitud Axial	km	150.492
Longitud del Cauce Principal	km	295.281
Ancho promedio de la cuenca	km	59.838
<b>Parámetros asociados a la forma</b>		
Índice de Compacidad	-	2.158
Factor de Forma	-	0.398
<b>Parámetros asociados al relieve</b>		
Cota máxima	msnm	4208
Cota mínima	msnm	18
Elevación media	msnm	267
Pendiente Media de la Cuenca	%	19.727
<b>Parámetro asociado a la red de drenaje</b>		
Pendiente Media del Cauce Principal	%	11.473

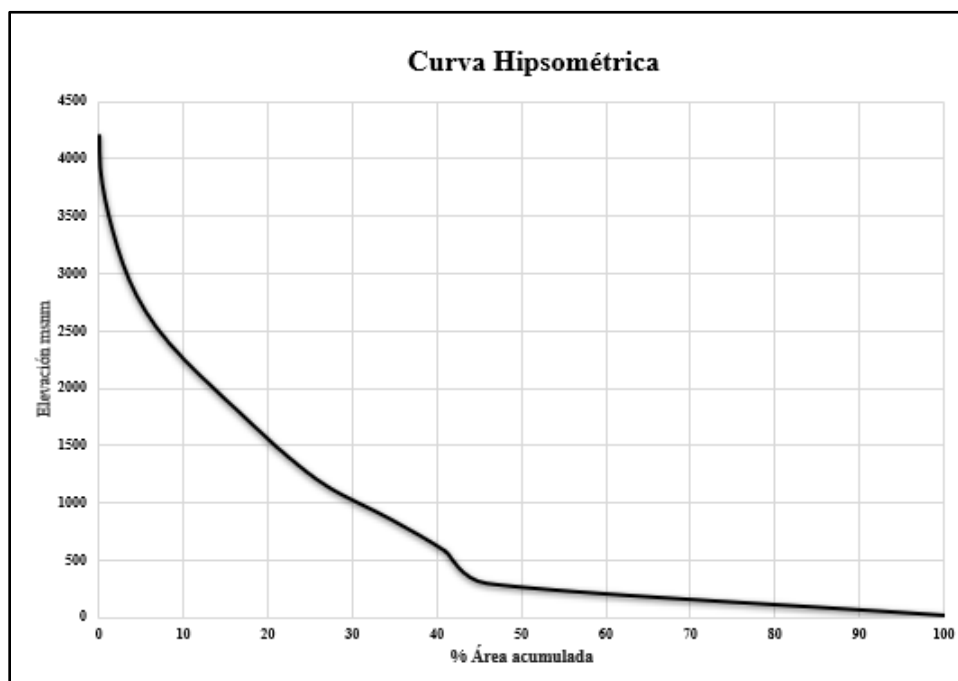
*Fuente.* Elaboración propia.

Con base en estos resultados se puede decir que la CRL presenta un índice de compacidad que la ubica en el tipo de “oval oblonga a rectangular oblonga” y un factor de forma tal que permite interpretar que se trata de una cuenca ligeramente alargada, lo que se indica un tiempo de

concentración relativamente alto de manera que la tendencia a presentar crecidas súbitas es menor.

Adicionalmente, a partir de la información presentada en la Figura 32 se puede decir que la cuenca se encuentra más bien en una fase de vejez. En su recorrido se presentan diferentes relieves, desde el montañoso hasta penillanuras y planicies inundables.

**Figura 32.** Curva de área-elevación para la totalidad de la cuenca del Río Lebrija



*Fuente.* Elaboración propia.

Esta distribución coincide con el hecho de que, hacia la región de los municipios de Sabana de Torres y San Martín, se encuentran los terrenos de menor pendiente (del 1-3%). Es precisamente en esta zona del valle del Magdalena medio donde se localizan los complejos de humedales y las llanuras inundables, las cuales representan un gran reto para los modeladores.

### 3.2 Resultados Obtenidos del Modelamiento

En seguida, en la Tabla 17 se presentan los resultados obtenidos tras la primera simulación en el punto donde se localiza la estación de San Rafael. Como se observa, estos valores no son satisfactorios, algunos de ellos más bajos, aunque se detalla una tendencia de valores más altos para los modelos cuyas URHs fueron generadas a partir de los mapas del IGAC.

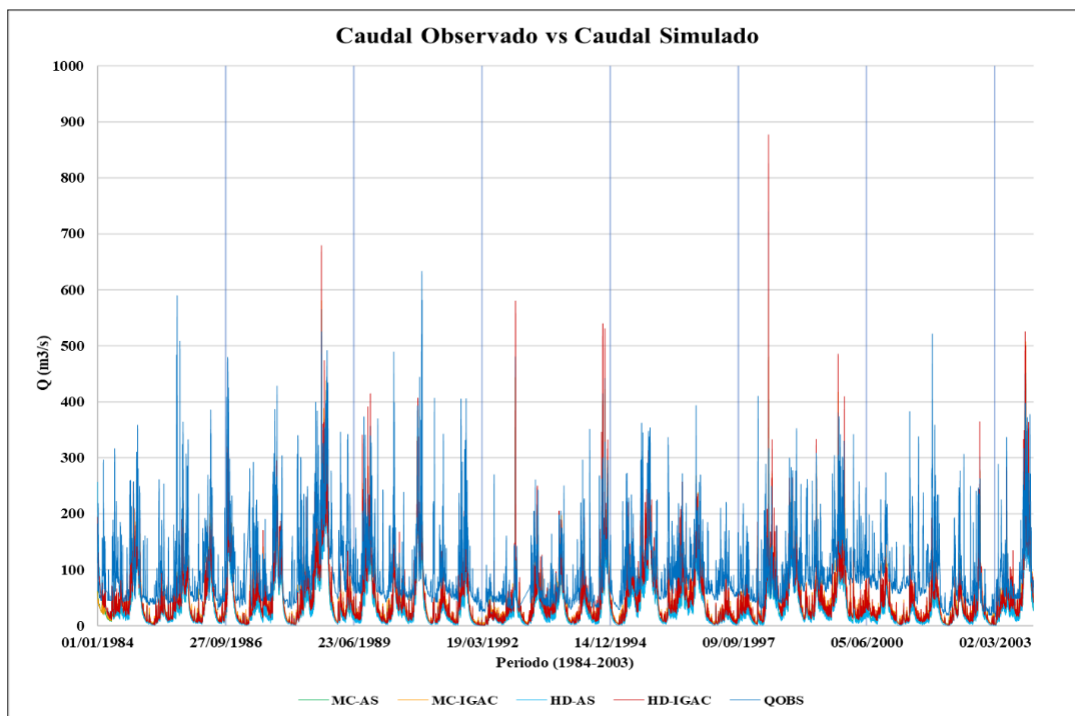
**Tabla 17.** Desempeño de los modelos tras la primera simulación para paso diario

<b>Desempeño del modelo</b>	<b>RSR</b>	<b>NSE</b>	<b>PBIAS</b>
<b>MC-AS</b>	1.120	-0.255	-59.323
<b>MC- IGAC</b>	0.959	0.080	-42.166
<b>HD-AS</b>	1.190	-0.422	-60.849
<b>HD- IGAC</b>	1.100	-0.208	-48.126

*Fuente.* Elaboración propia.

De acuerdo con lo que se muestra en la Figura 33, hay una subestimación en general de los caudales, exceptuando ciertos picos. Esto permitió pensar que se estaba considerando una capacidad de almacenamiento en el suelo superior a la presente en la cuenca, además de una subestimación en el flujo base. Por esta razón se dio paso a la revisión del parámetro CB, partiendo de los caudales observados en los periodos secos de donde se obtuvo un valor promedio de 2600 h. De esta manera se dio paso al proceso de calibración manual de los cuatro modelos manteniendo uniformes los valores para los respectivos mapas de URH y detallando que eran dos casos particulares, que no solo contaban con una resolución distinta sino con una distribución espacial diferente.

**Figura 33.** Gráfico de caudal observado vs caudal simulado para los cuatro modelos en el punto de aforo de San Rafael, primera simulación



*Fuente.* Elaboración propia.

A continuación, se presentan en la Tabla 18 los valores de desempeño para cada configuración de modelo. De estos se puede decir que es evidente una mejoría producto de la calibración de los parámetros del suelo con relación a los resultados previos. Se puede resaltar que, para el periodo de calibración, los modelos MC-AS y MC-IGAC se comportaron de manera satisfactoria de acuerdo con los indicadores NSE y PBIAS. No obstante, sólo los modelos hidrológicos se clasificaron dentro del rango satisfactorio para RSR para el periodo de validación, lo que indica que en general, el desempeño de los modelos no fue precisamente óptimo respecto a este indicador. Esto permite tener en mente, la existencia de error entre los valores simulados y observados, y respecto a la desviación de estos.

**Tabla 18.** Desempeño de los modelos para los periodos de calibración y validación en escala diaria

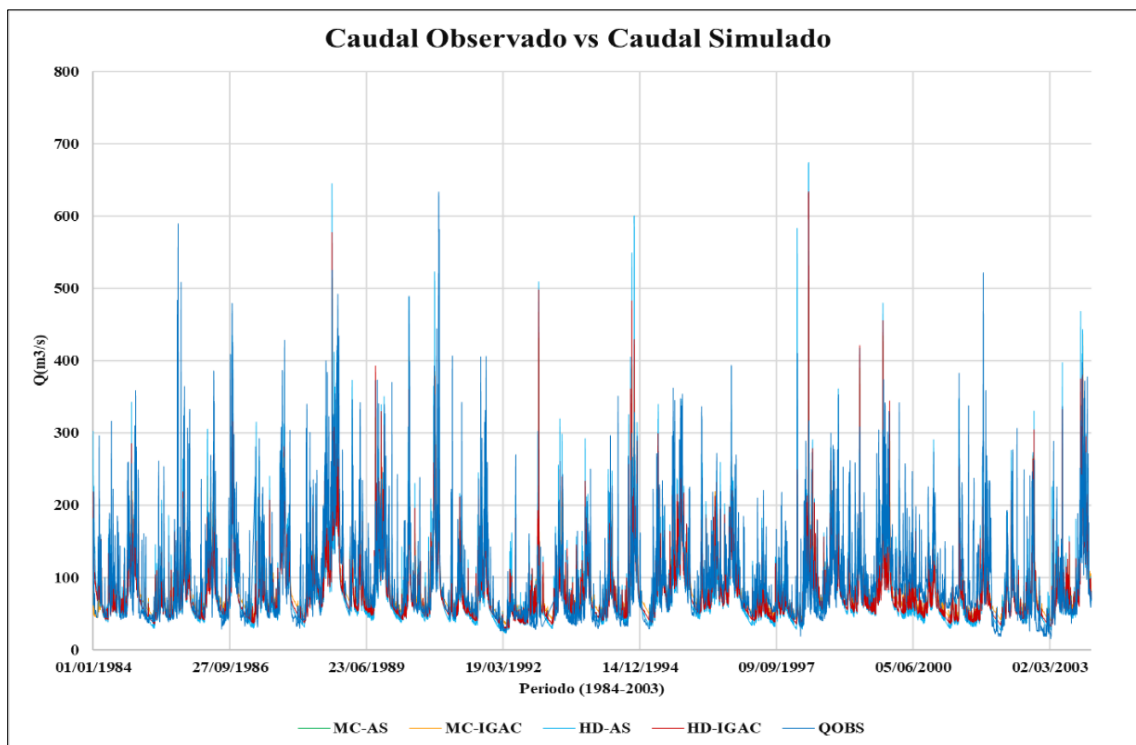
Desempeño del modelo	Calibración			Validación		
	RSR	NSE	PBIAS	RSR	NSE	PBIAS
<b>MC-AS</b>	0.71	0.49	12.42	0.64	0.59	0.96
<b>MC-IGAC</b>	0.70	0.51	-6.51	0.65	0.57	-7.17
<b>HD- AS</b>	0.87	0.25	-15.66	0.76	0.42	-1.77
<b>HD-IGAC</b>	0.82	0.33	-16.69	0.72	0.48	-2.90

*Fuente.* Elaboración propia.

En cuanto al periodo de validación, los modelos MC-AS y MC-IGAC presentaron resultados satisfactorios para todos los indicadores. Adicionalmente los modelos HD-AS y HD-IGAC mejoraron sustancialmente llegando casi al umbral de satisfactorio. Es de resaltar que para estos mismos modelos el PBIAS se localizó dentro del rango muy bueno de manera que se puede decir que los modelos en general tuvieron un comportamiento satisfactorio para dicho periodo.

En las Figura 34 y Figura 35 se presenta la comparación de los caudales simulados por los cuatro modelos frente al caudal observado para los periodos de calibración y validación respectivamente. En estos se detalla la presencia de ciertos picos de caudal, algunos de estos muy superiores al caudal observado, de donde al compararlos con la precipitación se pudo identificar una posible anomalía en los datos observados en los primeros días de diciembre de 1992. De igual manera se observó que los modelos con propagación local inercial, en un análisis grueso, respondieron con caudales pico más altos, principalmente después de periodos con menor precipitación.

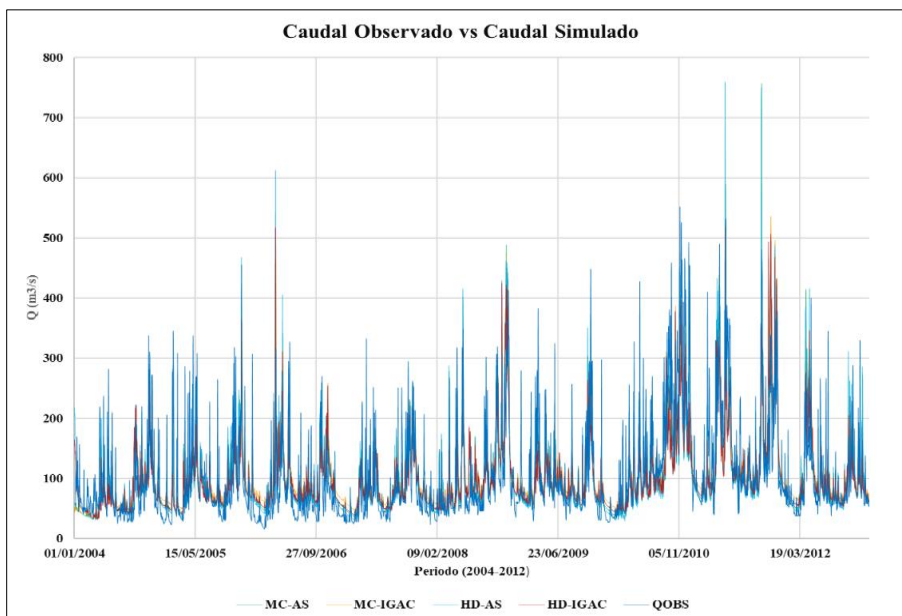
**Figura 34.** Caudal observado vs caudal simulado, Estación San Rafael periodo (1984-2003)



*Fuente.* Elaboración propia.

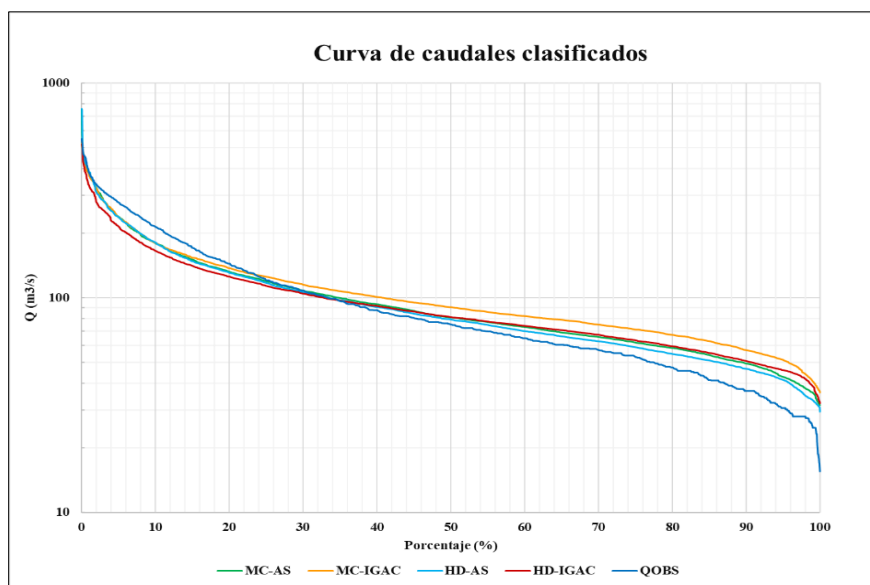
Adicionalmente, en la Figura 36 se presentan las curvas de duración o de caudales clasificados para el periodo de validación, donde se observa una tendencia general a la sobreestimación de los caudales, además de una subestimación para los caudales superiores al  $Q_{25}$ . Esta tendencia es mayor en el caso de las representaciones hidrodinámicas y se atribuye a múltiples causas como la calidad del MDE utilizado, la calibración de los parámetros relacionados a la geometría del canal, entre otras.

**Figura 35.** Caudal observado vs caudal simulado, Estación San Rafael periodo (2004-2012)



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 36.** Curva de caudales clasificados para el periodo 2004-2012



Fuente. Elaboración propia.

### 1.1.29 Estimación de la Oferta Hídrica.

A partir de los resultados obtenidos del modelo calibrado MC-IGAC, se realizó la estimación de la oferta hídrica considerando el periodo simulado (1985-2003), excluyendo el periodo de calentamiento. La estimación consideró los datos agregados de caudal medio mensual interanual en el punto de salida de cada subcuenca (corresponde al valor acumulado, ver Tabla 19) y el caudal al punto de salida sin considerar las contribuciones de las subcuencas vecinas, Tabla 20.

El caudal promedio estimado por el modelo en el punto de aforo de San Rafael se acerca a los valores reportados de cerca de 90 m<sup>3</sup>/s (CDBM, n.d.; IDEAM & Cormagdalena, 2001).

Adicionalmente se simuló un caudal máximo de 514.03 m<sup>3</sup>/s y un mínimo de 34.87 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 19.** Oferta hídrica promedio medida al punto de salida de cada subcuenca

Mes	C. Alta (Q m3/s)	Cáchira S (Q m3/s)	Afluentes (Q m3/s)	C. Media (Q m3/s)	C. Baja (Q m3/s)	San Rafael (Q m3/s)
Enero	27.82	10.90	11.10	82.39	119.58	64.55
Febrero	26.78	9.51	10.99	76.37	107.54	59.50
Marzo	26.47	9.05	14.24	80.71	115.05	59.60
Abril	29.94	12.51	28.10	122.67	186.57	81.50
Mayo	33.75	16.67	41.80	171.47	279.90	106.56
Junio	30.64	13.43	37.93	146.39	235.51	87.91
Julio	27.41	11.17	30.10	117.61	183.73	72.27
Agosto	27.13	11.21	32.86	121.81	180.80	73.34
Septiembre	30.50	14.17	40.44	149.59	231.01	89.07
Octubre	41.13	25.29	52.68	221.86	341.49	142.09
Noviembre	43.12	22.19	48.03	213.88	340.71	135.73
Diciembre	33.75	14.82	24.30	134.29	213.73	93.71
<b>Promedio</b>	31.54	14.24	31.05	136.59	211.30	88.82

*Fuente.* Elaboración propia.

**Tabla 20.** Oferta hídrica promedio para cada subcuenca (excluyente)

Mes	C. Alta (Q m3/s)	Cáchira S (Q m3/s)	Afluentes (Q m3/s)	C. Media (Q m3/s)	C. Baja (Q m3/s)
Enero	27.82	10.90	11.10	43.67	26.08
Febrero	26.78	9.51	10.99	40.09	20.18
Marzo	26.47	9.05	14.24	45.19	20.10
Abril	29.94	12.51	28.10	80.22	35.80
Mayo	33.75	16.67	41.80	121.06	66.63
Junio	30.64	13.43	37.93	102.32	51.19
Julio	27.41	11.17	30.10	79.03	36.02
Agosto	27.13	11.21	32.86	83.47	26.13
Septiembre	30.50	14.17	40.44	104.92	40.98
Octubre	41.13	25.29	52.68	155.44	66.95
Noviembre	43.12	22.19	48.03	148.57	78.80
Diciembre	33.75	14.82	24.30	85.72	55.14
<b>Promedio</b>	31.54	14.24	31.05	90.81	43.67
<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	2144.596	677.256	1147.05	2145.25	2890.993

*Fuente.* Elaboración propia.

### 1.1.30 Análisis Sobre las URHs.

Al finalizar el proceso de calibración de los parámetros de suelo y partiendo de las diferencias no sólo a nivel de detalle, sino en distribución de las Unidades de Respuesta Hidrológica se puede afirmar que se trata de productos o resultados completamente distintos. Si bien, los modelos obtuvieron indicadores de desempeño similares, internamente los procesos que ocurren no fueron necesariamente los mismos. Las principales diferencias entre las configuraciones consistieron en las capacidades de almacenamiento de suelo, la relación entre el almacenamiento y la saturación  $b$ , y el parámetro de corrección para el tiempo de concentración del drenaje subsuperficial. Algunas de estas resultaron discordantes respecto a la descripción del tipo de

suelo y sus características y se atribuye a un bajo nivel de detalle tanto en la cantidad de URHs, como en la escala (principalmente para el mapa de América del sur) (F. M. Fan et al., 2015).

Claramente, las URH- AS son un recurso de gran provecho en términos de modelamiento hidrológico a gran escala y puede ser utilizado en casos en los que la información de primera mano no se encuentre disponible. No obstante, es recomendable utilizarlo con discreción.

Dado que en este caso se dispone de una información un poco más detallada, se considera, por ende, un tanto más fiable los resultados obtenidos con el denominado mapa de URHs IGAC en este documento.

### **3.3 Resultados de la Simulación para escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5**

En esta sección se presentan los resultados de las simulaciones para los escenarios histórico y futuro bajo las condiciones anteriormente mencionadas.

#### **1.1.31 Corrección del Sesgo.**

De acuerdo con los indicadores para la evaluación en la corrección del sesgo en las series de precipitación, el método que proporcionó un mejor ajuste para los valores medios mensuales fue el de *Local Intensity Scaling*. Aunque su aproximación fue buena de acuerdo con los resultados obtenidos (ver APÉNDICE C), puntualmente para el caso del píxel con identificador PCP0045 se identificaron valores muy altos (anormales) en los factores de corrección empleados, puesto que, para ese punto la serie del Eta-MIROC5 subestima la precipitación de la zona. De esta forma, al aplicar la corrección, se produjeron algunos picos en la precipitación que se tradujeron en el aumento del caudal medio (en la escala diaria).

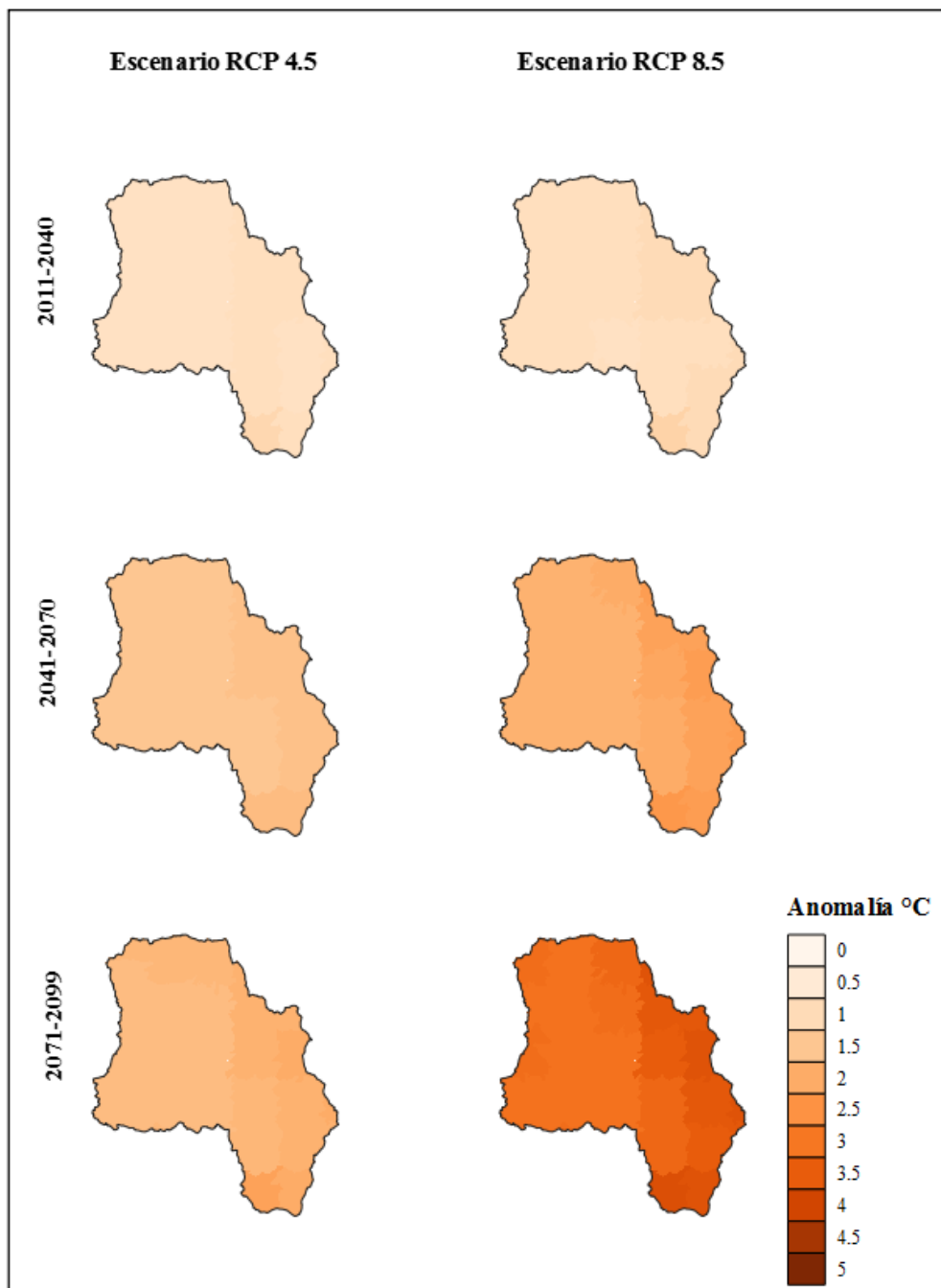
### 1.1.32 Impacto en las Variables de Precipitación y Temperatura.

En seguida se presenta en la Figura 37 y Figura 38 la evaluación de las anomalías sobre los valores medios para temperatura y precipitación media multianual. Estos surgen de la comparación de los periodos (2011-2040), (2041-2070) y (2071-2099), respecto al periodo actual (1984-2005) de los resultados obtenidos tras la corrección de sesgo del MCR Eta-MIROC5.

En ellas se puede observar, en cuanto a la variable de temperatura un incremento bajo ambos escenarios, siendo el RCP 8.5 aquel para el cual se produce una mayor elevación a finales de siglo. Aunque para el primer periodo ambos escenarios se comportan de manera similar, con anomalías que oscilan entre los 0.8 y 1.2 °C, el incremento es más evidente para el escenario RCP 8.5 llegando aproximadamente a valores de 3.8°C. Asimismo, el aumento en la temperatura media se observa inicialmente hacia el sector oriental de la cuenca, siendo localizado más hacia el sector de Norte de Santander y hacia Bucaramanga y su Área Metropolitana.

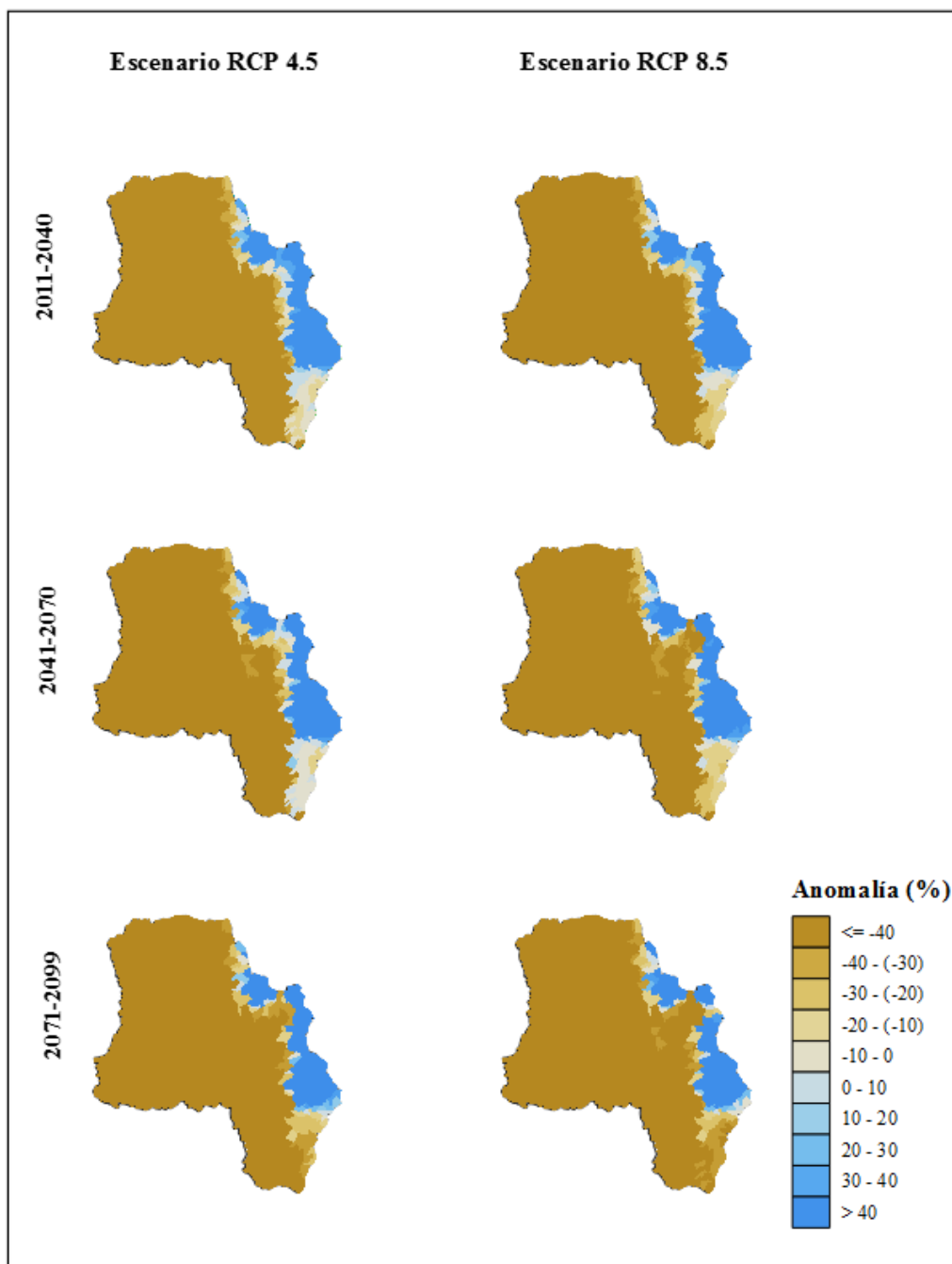
En cuanto a la precipitación, se observa una disminución importante, superior al 40% para la mayor parte del territorio que comprende la cuenca que puede alcanzar valores de cerca del 80% respecto al periodo actual. Sin embargo, se observa también un gran incremento en la precipitación hacia el sector oriental, coincidiendo en el sector de Norte de Santander donde se presenta el aumento en la temperatura. Este aumento se produce en más del 2000%.

**Figura 37.** Cambios en la temperatura media de la cuenca para escenarios proyectados



Fuente. Elaboración propia.

**Figura 38.** Anomalía en la precipitación media de la cuenca para escenarios proyectados



Fuente. Elaboración propia.

### 1.1.33 Impacto Sobre la Descarga del Río.

A continuación, en la Tabla 21 se presentan las anomalías sobre la descarga del río medidas en los puntos de salida de las cinco subcuencas principales y de la salida de la mini cuenca donde se sitúa la estación de San Rafael. De acuerdo con los escenarios de forzamiento radiativo, se produciría una disminución superior al 50% en la descarga, presentándose un comportamiento similar bajo ambos escenarios RCP, donde los resultados más críticos se presentan en Afluentes.

**Tabla 21.** Impacto del cambio climático sobre el caudal medio en los puntos de salida de las subcuencas y en San Rafael.

Medición	RCP 4.5					
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)
C. Alta	16.73	-50.46	16.76	-50.46	11.92	-64.71
Cáchira S	8.69	-51.60	8.66	-51.60	6.86	-61.78
Afluentes	9.08	-69.49	10.16	-69.49	9.92	-66.67
C. Media	57.35	-61.06	61.24	-61.06	50.52	-65.70
C. Baja	84.46	-62.10	89.92	-62.10	74.22	-66.69
San Rafael	43.51	-57.03	45.49	-57.03	35.63	-64.81

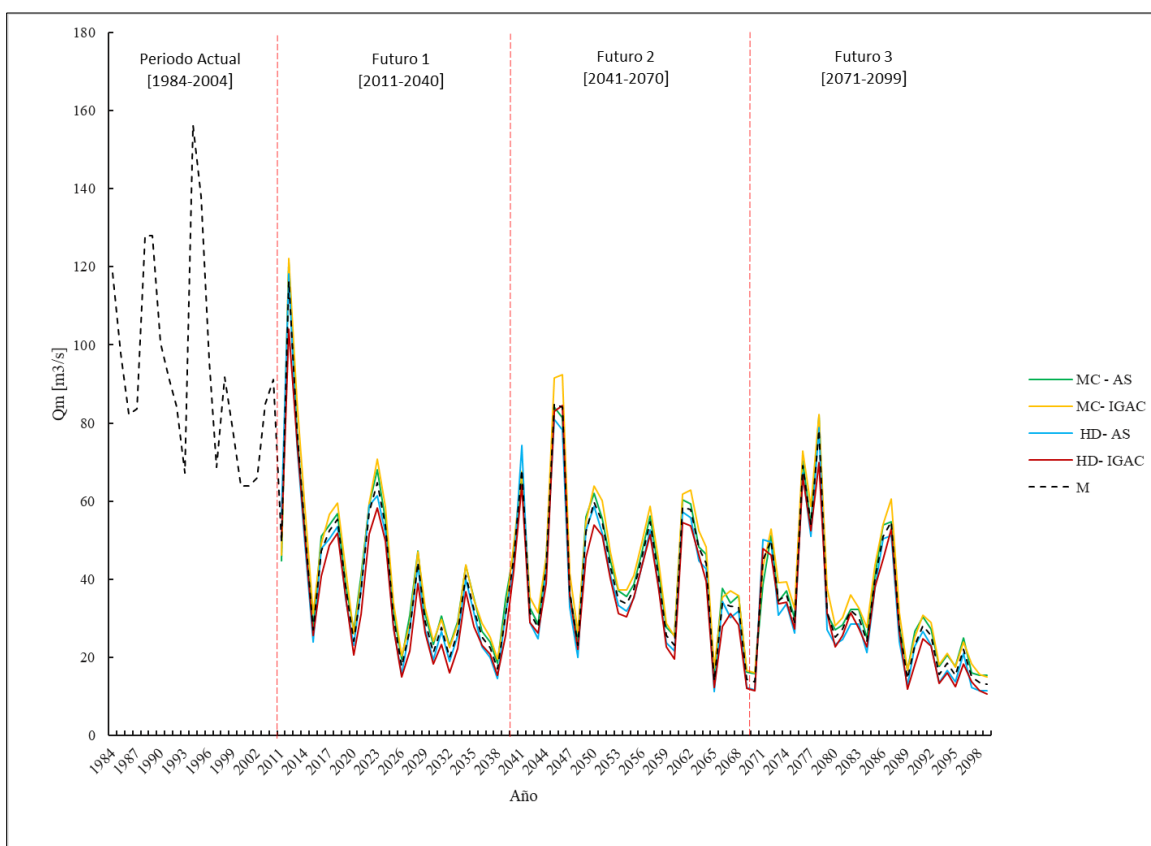
Medición	RCP 8.5					
	2011-2040		2041-2070		2071-2099	
	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)	(m <sup>3</sup> /s)	ΔQ (%)
C. Alta	16.60	-50.86	14.49	-57.12	12.47	-63.08
Cáchira S	8.84	-50.79	7.99	-55.50	7.26	-59.59
Afluentes	9.00	-69.76	11.41	-61.68	11.00	-63.05
C. Media	57.04	-61.27	59.07	-59.90	53.37	-63.77
C. Baja	83.18	-62.67	89.56	-59.81	80.48	-63.88
San Rafael	43.17	-57.36	41.70	-58.81	36.90	-63.56

*Nota.* Resultados obtenidos tras la simulación con el modelo MC-IGAC. Elaboración propia.

Ahora bien, en comparación con Afluentes las cuencas de Cáchira Sur y la cuenca Alta muestran una diferencia positiva. Esto puede estar relacionado con los incrementos proyectados para la precipitación de la zona, puesto que al analizar los caudales máximos reportados para algunas de las mini cuencas que las conforman, se detallaron aumentos en cerca del 20%.

Como se muestra en la información en la Tabla 21 y en la Figura 39 y Figura 40, tiende a haber una mayor irregularidad en los caudales bajo el escenario RCP 4.5, bajo el cual a finales del periodo 2071-2099 continúan disminuyendo los caudales de descarga, reportando valores aún más bajos que los simulados bajo el otro escenario.

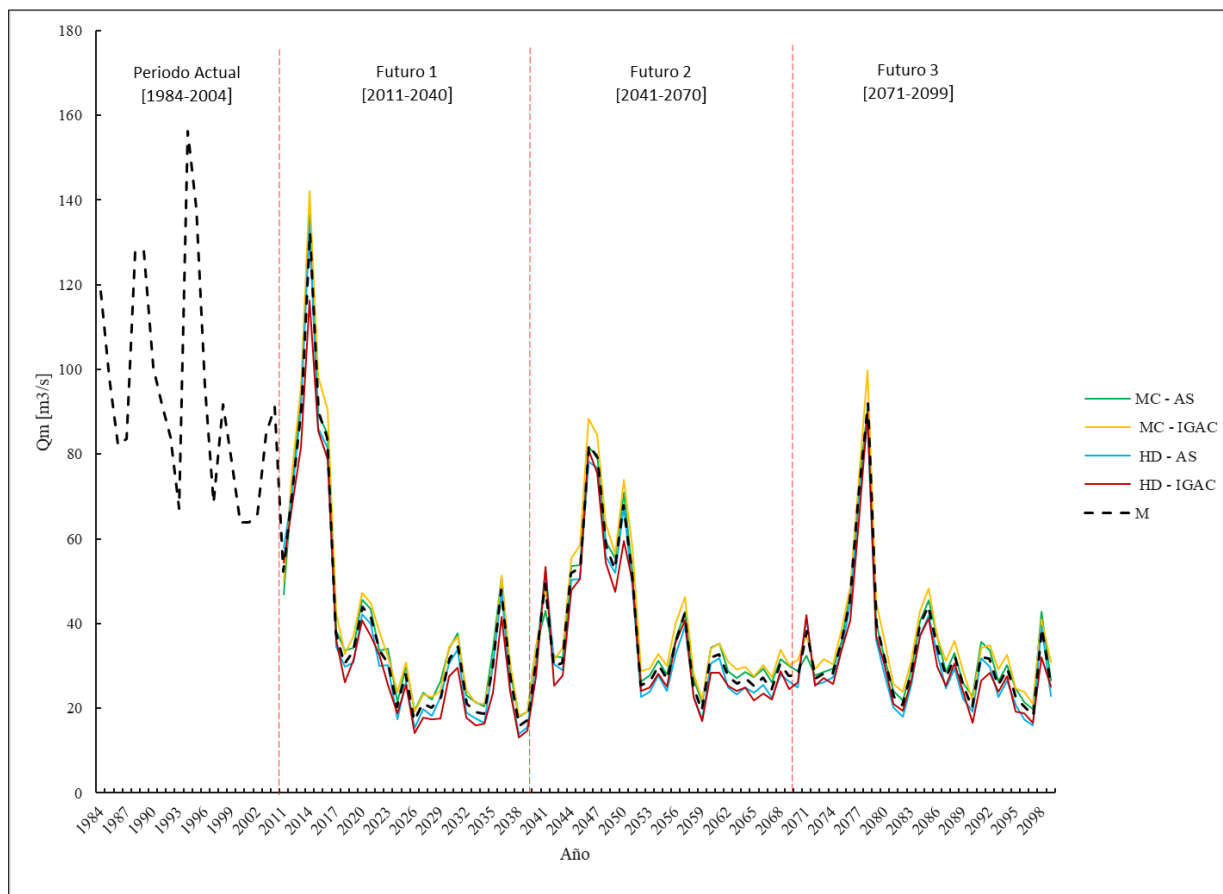
**Figura 39.** Caudal simulado bajo escenario futuro RCP 4.5, San Rafael



*Fuente.* Elaboración propia.

De igual manera se observa que bajo el escenario RCP 8.5 se presentan años con aumentos de caudal promedio anual más elevados que en los del RCP 4.5, esto podría estar relacionado a la intensidad con que en las simulaciones del MCR se proyecte el ENOS.

**Figura 40.** Caudal simulado bajo escenario futuro RCP 8.5, San Rafael



*Fuente.* Elaboración propia.

En la Figura 41 se presentan los mismos resultados, pero esta vez agrupados mensualmente. Esto permitió adquirir una perspectiva sobre lo que sucede con el ciclo anual. De esta manera se pudo evidenciar que además de la disminución del caudal promedio, existe una tendencia al “aplanamiento” de la curva para el periodo que comprende los meses de septiembre a noviembre

el cual corresponde al segundo periodo lluvioso, dado el régimen bimodal de la cuenca. Asimismo, se evidenció que para el escenario RCP 8.5 la transición hacia los caudales pico del periodo abril-junio es más brusca, resaltando los caudales máximos en el mes de mayo. Durante el periodo seco DJF se registran caudales de flujo base bastante bajos, reducidos en algunos puntos de la cuenca en más del 70%. En la se presentan los valores del Q90, es decir, el caudal medio multianual superado el 90% del tiempo para los diferentes periodos.

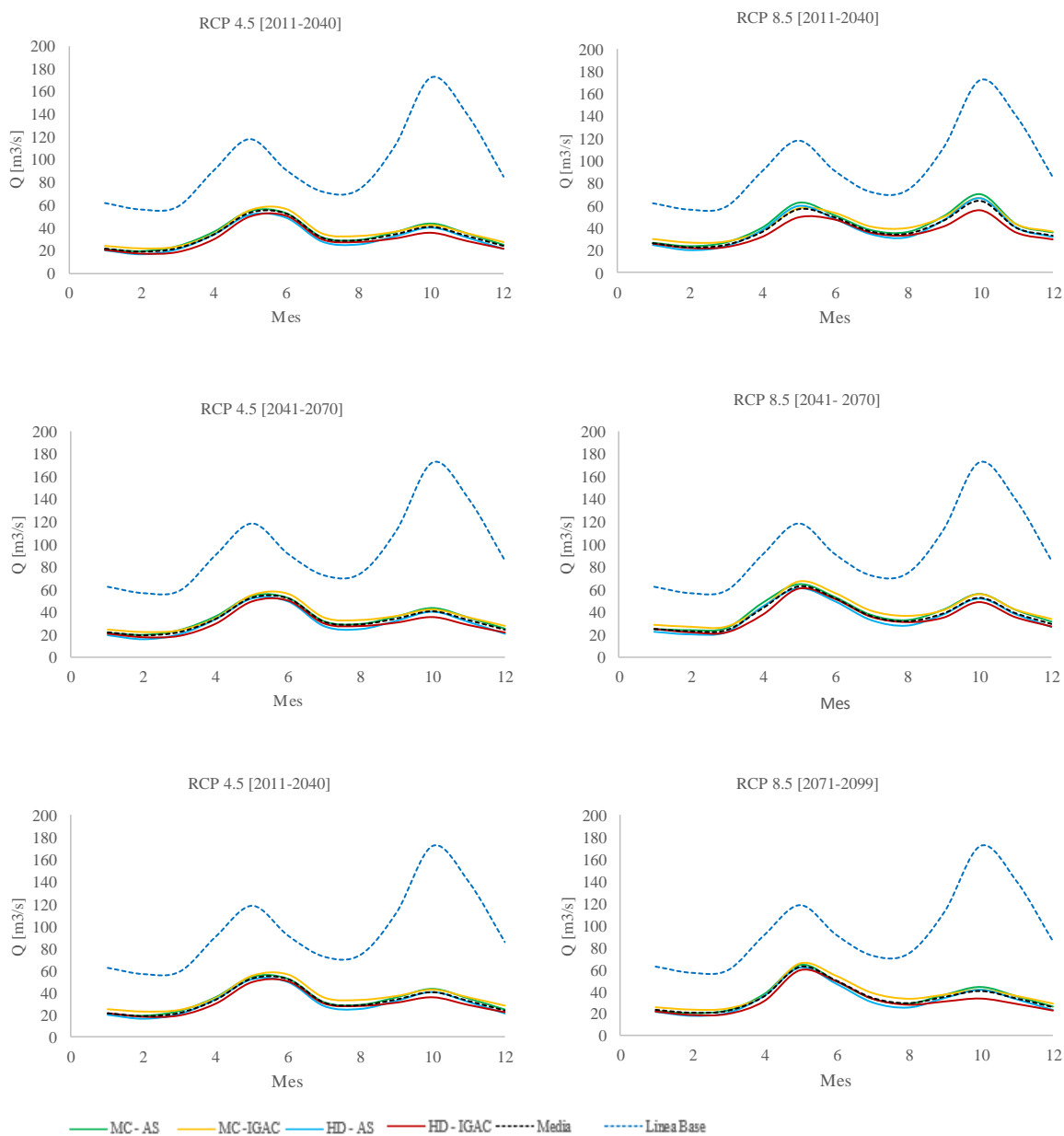
**Tabla 22.** Q90 en los diferentes periodos de simulación, caudal de salida en las subcuencas

Cuenca	Histórico 1984-2004	RCP 4.5			RCP 8.5		
		2011-2040	2041-2070	2071-2099	2011-2040	2041-2070	2071-2099
<b>C. Alta</b> (Q m <sup>3</sup> /s)	20.19	7.425	7.21	5.591	6.699	7.511	6.519
<b>Cáchira</b> <b>Sur (Q</b> <b>m<sup>3</sup>/s)</b>	8.806	3.716	3.633	3.074	3.428	3.978	3.563
<b>Afluentes</b> (Q m <sup>3</sup> /s)	8.623	2.037	2.119	1.857	1.869	3.148	2.938
<b>C. Media</b> (Q m <sup>3</sup> /s)	66.643	22.123	21.338	18.192	20.171	25.158	22.203
<b>C. Baja</b> (Q m <sup>3</sup> /s)	94.443	28.385	27.015	22.035	25.624	33.55	29.013

*Nota.* Resultados obtenidos tras la simulación con el modelo MC-IGAC.

*Fuente.* Elaboración propia.

**Figura 41.** Caudal medio mensual interanual simulado, comparación de escenarios



*Nota.* En la columna izquierda (derecha) se encuentran las simulaciones para el escenario RCP 4.5(8.5) ordenada de manera descendente en sus tres periodos futuros. La línea azul punteada representa la línea base, es decir, el periodo (1984-2004).

#### 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este documento consistió en el modelamiento hidrológico de la CRL empleando la herramienta MGB-*Modelo de Grandes Bacías* y consideró su aplicación para la evaluación del impacto del cambio climático sobre la cuenca bajo los escenarios planteados en el AR5 del IPCC.

Los resultados de la calibración apenas se clasifican dentro del rango satisfactorio para el indicador NASH para periodos de calibración y validación, obteniendo un puntaje superior para el periodo de validación y presentando valores menores a los obtenidos mediante el modelo HydroBID (Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez et al., 2018). Sin embargo, se considera que estos resultados pueden ser mejorados mediante ajustes de las entradas como el MDE y el detalle del mapa de URH, así como mediante la calibración.

Una de las grandes dificultades que se experimentó ocurrió durante el proceso de calibración, principalmente debido a la limitada información que se tiene sobre la parte baja de la cuenca y el sector de Afluentes. La calibración fue desarrollada mediante la comparación de los caudales simulados con los caudales observados en la estación de San Rafael, realizando una calibración global. Aunque se utilizaron las estaciones de Angosturas y Café Madrid, estas no se tomaron en cuenta al realizar la calibración automática. Por consiguiente, para analizar los caudales en las áreas de las cuencas sin medición de caudal se recurrió a comparaciones de caudales medios mensuales multianuales y anuales reportados en diferentes estudios incluyendo los diagnósticos de los POMCA (CDMB, n.d.; IDEAM & Cormagdalena, 2001). Esto permitió ver la necesidad que existe de continuar instrumentado la cuenca y de levantar información para periodos futuros de manera que los estudios que se realicen tengan una menor incertidumbre y con el fin de poder generar una mejor gestión hídrica.

De acuerdo con los resultados obtenidos a través de las cuatro configuraciones, se pudo concluir que los modelos cuyos mapas de Unidades de Respuesta Hidrológica basados en la información del IGAC, presentaron caudales simulados próximos a los reportados en los estudios. Esto se debe principalmente a su nivel de detalle y a variaciones que se pueden presentar respecto al mapa de América del Sur (F. M. Fan et al., 2015). Por esta razón se recomienda trabajar de ser posible en primer lugar con la información generada por las entidades locales y considerar esta segunda opción como una alternativa en caso de no contar con ella.

Las proyecciones climáticas fueron realizadas a partir de los datos obtenidos del ensamble del modelo Eta con el modelo climático global MIROC5 para una resolución de 20km. Se analizaron los resultados bajo los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, donde se indicó una reducción de los caudales medios de manera general para toda la cuenca con anomalías entre -24 y el -90%. La subcuenca más afectada de acuerdo con las proyecciones sería la correspondiente a Afluentes. Cabe mencionar, que la alta variabilidad bajo dichos escenarios se espera para un futuro próximo, y que las condiciones se mantendrían relativamente estables bajo dichos escenarios para final de siglo.

Se distinguen tres fuentes principales de incertidumbre: el modelamiento hidrológico, el MCR y el MCG. A lo largo del trabajo se buscó reducirla al tomar en cuenta las recomendaciones por parte de investigadores y del IDEAM (Bonilla-Ovallos & Mesa Sánchez, 2017; D. F. Gómez & Rodríguez, 2018) en cuanto a la selección del MCG y los procedimientos para el escalamiento como la corrección del sesgo de los datos obtenidos del MCR para ambos escenarios RCP. Por lo tanto, se espera que los resultados obtenidos sean útiles para la gestión hídrica de la cuenca.

En la cuenca se utilizó el modelo hidrológico basado en el método de propagación *Muskingum-Cunge* y el acoplado modelo hidrodinámico. No obstante, este último se trabajó como si se

tratara de un modelo hidrológico ya que requiere de una serie de ajustes y calibraciones especiales ligadas a la geometría del canal y demás detalles que han de ser tenidos en cuenta al realizar un modelamiento hidráulico los cuales son mencionados por Vinicius Siqueira et al. (2018), y que no fueron evaluadas en este trabajo. Se sugiere continuar y evaluar el desempeño de este modelo hidrodinámico para la cuenca, así como su aplicación para escenarios de inundación.

## 5 REFERENCIAS

- Banco Interamericano de Desarrollo. (n.d.). *HydroBID*. Retrieved April 19, 2021, from <https://www.hydrobidlac.org/>
- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1–2), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling* (The primer). John Wiley & Sons . <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- Bonilla-Ovallos, C. A., & Mesa Sánchez, O. J. (2017). Validación de la precipitación estimada por modelos climáticos acoplados del proyecto de intercomparación CMIP5 en Colombia. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158), 107. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.427>
- Breña, A., & Jacobo, M. (2006). *Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial*.
- CDMB. (n.d.). *POMCAS*. Retrieved April 13, 2021, from <http://www.cdm.gov.co/web/planes-de-ordenacion-pomcas>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>

- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., & Marengo, J. (2014). Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 438–454. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- Chow, V. te, Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
- Collischonn, W., Allasia, D., da Silva, B. C., & Tucci, C. E. M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878–895. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>
- Collischonn, W., & Tucci, C. E. M. (2001). Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 6(1), 95–118.
- CORDEX. (2020, November 26). *Regional Climate Change simulations for CORDEX domains – Cordex*. <https://cordex.org/data-access/regional-climate-change-simulations-for-cordex-domains/>
- CORDEX RCM List – Cordex*. (n.d.). Retrieved April 13, 2021, from <https://cordex.org/data-access/cordex-rcm-list/>
- CPTEC- INPE. (n.d.). *Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE*. Retrieved April 19, 2021, from <https://www.cptec.inpe.br/sobreocptec/pt>
- da Silva, M. K. A., & Rosa, R. (2017). Metodologia para simulação de vazão em bacias hidrográficas: o caso da sub-bacia hidrográfica Fazenda Letreiro - MG / Methodology for flow simulation in river basins: study case of the sub-basin of Fazenda Letreiro - MG. *Caderno de Geografia*, 27(48), 44–72. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27n48p44>

- de Paiva, R., Buarque, D. C., Collischonn, W., Bonnet, M.-P., Frappart, F., Calmant, S., & Mendes, C. A. B. (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. *Water Resources Research*, 49(3), 1226–1243. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20067>
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001–1007. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>
- Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER. (n.d.). Esgurrimiento Superficial. In *Tecnología de Tierras y Aguas I*. Retrieved April 18, 2021, from <http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/riego/Archivos/Cap%2006%20-%20Esgurrimiento%20Superficial.pdf>
- Fan, F. M., & Bravo, J. M. (2016). *MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO PRATA UTILIZANDO O MODELO HIDROLÓGICO DE GRANDES BACIAS-MGB-IPH: IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA BACIA DO PRATA*. <https://www.researchgate.net/publication/305346100>
- Fan, F. M., Buarque, D., Pontes, P., & Collischonn, W. (2015, November). Um mapa de unidades de resposta hidrológica hidrológica para a América do Sul. *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. <http://mapas.mma.gov.br/geonetwork>
- Fan, F. M., & Collischonn, W. (2014). Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(1), 243–254.
- Fan, F., Pontes, P., Paiva, R., & Collischonn, W. (2014). Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(4), 137–147. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p137-147>

- FAO. (n.d.). *Acerca de - Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Retrieved April 19, 2021, from <http://www.fao.org/about/es/>
- Fleischmann, A., Paiva, R., & Collischonn, W. (2019). Can regional to continental river hydrodynamic models be locally relevant? A cross-scale comparison. *Journal of Hydrology*, *X*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2019.100027>
- Gómez, W. (2010). *Texto Básico de Hidrología* (1st ed.). Universidad Nacional Agraria.
- Giorgetta, M. A., Jungclaus, J., Reick, C. H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.-D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornbluh, L., Matei, D., Mauritsen, T., ... Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *5*(3), 572–597. <https://doi.org/10.1002/jame.20038>
- Gómez, D. F., & Rodríguez, A. D. (2018). *APLICABILIDAD DE DATOS CLIMATOLÓGICOS ESCALADOS PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO TONA EN SANTANDER*.
- Gómez, S., & Gómez, V. L. (2016). Análisis de flujo base usando curvas maestras de recesión y algoritmos numéricos en cuencas de montaña: Cuenca del río Suratá y cuenca del Río de Oro (Santander, Colombia). *DYNA (Colombia)*, *83*(196), 213–222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>
- Gómez, S., & Guzmán, J. (2011). Separación de flujo base en la cuenca superior del río Lebrija Separation of base flow in upper part of the Lebrija river basin. In *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º* (Vol. 61). Diciembre.

- Guzmán, D., Carrillo, G., Peña, S., Villamizar, A., & Zabala, A. (2019). *Modelamiento hidrológico del Río Lebrija: implementación de la herramienta HydroBID en la subcuenca baja*.
- Guzmán, J., Gómez, S., Niño, E., & Anaya Archila, Á. A. (2008). Modelos hidrológicos en la cuenca experimental de Río Sucio, municipio de Tona, Santander. *Revista UIS Ingenierías*, 7, 23–39. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6299794>
- Hingray, B., Picouet, C., & Musy, A. (2015). *HYDROLOGY A Science for Engineers* (1st ed.). Taylor & Francis Group.
- Hölbig, C. A., Mazzonetto, A., Borella, F., Pavan, W., Fernandes, J. M. C., Chagas, D. J., Gomes, J. L., & Chou, S. C. (2018). PROJETA platform accessing high resolution climate change projections over Central and South America using the Eta model. *Agrometeoros*, 26(1), 71–81.
- IDEAM. (n.d.). *GLOSARIO - IDEAM*. Retrieved November 9, 2020, from <http://meteorologia.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>
- IDEAM. (2018). *Protocolo de modelación de la dinámica del agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, & Cormagdalena. (2001). *Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su Ordenamiento Territorial*.
- Instituto de Pesquisas Hidráulicas. (2017). *Manual Expresso de Calibração dos Parâmetros do MGB-IPH Em elaboração Outubro de 2017*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (n.d.). *Datos Abiertos Agrología | GEOPORTAL*. Retrieved January 18, 2021, from <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>

- IPCC. (n.d.). *IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved April 19, 2021, from <https://www.ipcc.ch/>
- Jardim, P., Fleischmann, A., Siqueira, V., Fan, F., & Collischonn, W. (2014). *Manual de Exemplo de Aplicação do Pacote de Ferramentas IPH HydroTools*. <https://drive.google.com/file/d/0B1CDpnDPA5HMb1V2WXIIOWRyVm8/view>
- Jiménez, C. (2017). *Caracterización Morfométrica y Diagnóstico del Recurso Hídrico del Río Lindo en el Municipio de Viotá Cundinamarca*.
- Jorge Virgilio Rivera Gutiérrez, A., Andrés Durán Daza, F., Jazmín Rocío Jimenez Jaimes, I., & Andrés Velosa Montañez Ing Carlos Tavera, M. (2018). *Evaluación del efecto del cambio climático con la disponibilidad de agua en la cuenca del Lebrija Media*.
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S. C., Sueiro, G., Dereczynski, C., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2018). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(1–2), 663–682. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>
- Martínez, D. (2019). *Determinación de oferta hídrica de la cuenca Río Lebrija para el abastecimiento de agua para actividades de extracción de hidrocarburos mediante la técnica de fracturamiento hidráulico en el municipio de San Martín, Cesar*. [https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2760/Mart%C3%ADnez\\_Rodríguez\\_Diana\\_Carolina\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/2760/Mart%C3%ADnez_Rodríguez_Diana_Carolina_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Medeiros, M., Ayan, F., Oliveira, A., Corati, B., Fan, F., Martinbuancho, G., Jardim, P., Correa, S. W., Siqueira, V., & Collischonn, W. (2018). *Manual de Exemplo de Aplicação do Modelo MGB 2018 Utilizando o IPH-Hydro Tools*.

- Mejía, O. (2010). Los procesos de gestión integral del recurso hídrico. In *Hidrogeología para la gestión del Recurso Hídrico* (pp. 99–108). Universidad de Antioquia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Gobernanza del agua | Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Gobernanza Del Agua. Retrieved October 1, 2019, from <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1957-gobernanza-del-agua>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Nalesso, M. (2019, July 3). *El Departamento de Santander en Colombia ya cuenta con HydroBID*. Volviendo a La Fuente. <https://blogs.iadb.org/agua/es/el-departamento-de-santander-en-colombia-ya-cuenta-con-hydrobid/>
- NASA. (n.d.). *POWER Data Access Viewer*. Retrieved August 3, 2020, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- New, M., Lister, D., Mike Hulme, & Makin, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Clim Res - CLIMATE RESEARCH*, 21, 1–25. [www.iwmi.org](http://www.iwmi.org)
- OCDE. (2015). *OCDE Principles on Water Governance, 2015*. Organización Europea para la Cooperación Económica (OECE).
- Pinilla, D., & Peñaloza, M. (2017). *Aplicación del modelo SWAT en la parte superior del Río de Oro, parte alta*.
- Ponce, V. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices* (1st ed.). Prentice Hall.
- Pontes, Paulo R M, Collischonn, W., Fan, F. M., Paiva, R. C. D., & Buarque, D. C. (2015). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Modelagem hidrológica e hidráulica de grande*

escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4), 888–904.

Pontes, Paulo Rógenes Monteiro, Fan, F. M., Fleischmann, A. S., de Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., Jardim, P. F., Sorribas, M. V., & Collischonn, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling and Software*, 94, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.029>

Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). *CMhyd User Manual Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies*. <https://riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro>

Salmona, Y. (n.d.). *Artigo*. O Que é o Índice de Área Foliar e Qual Sua Relação Com o Sensoriamento Remoto? Retrieved April 18, 2021, from <https://www.espectrogeo.com.br/o-que-e-o-indice-de-area-foliar-e-qual-sua-relacao-com-o-sensoriamento-remoto/>

Shukla, [ P R, Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., van Diemen, R., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J. P., Vyas, P., Huntley, E., ... Benton, T. (n.d.). *IPCC, 2019: Annex I: Glossary [van Diemen, R. (ed.)]. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

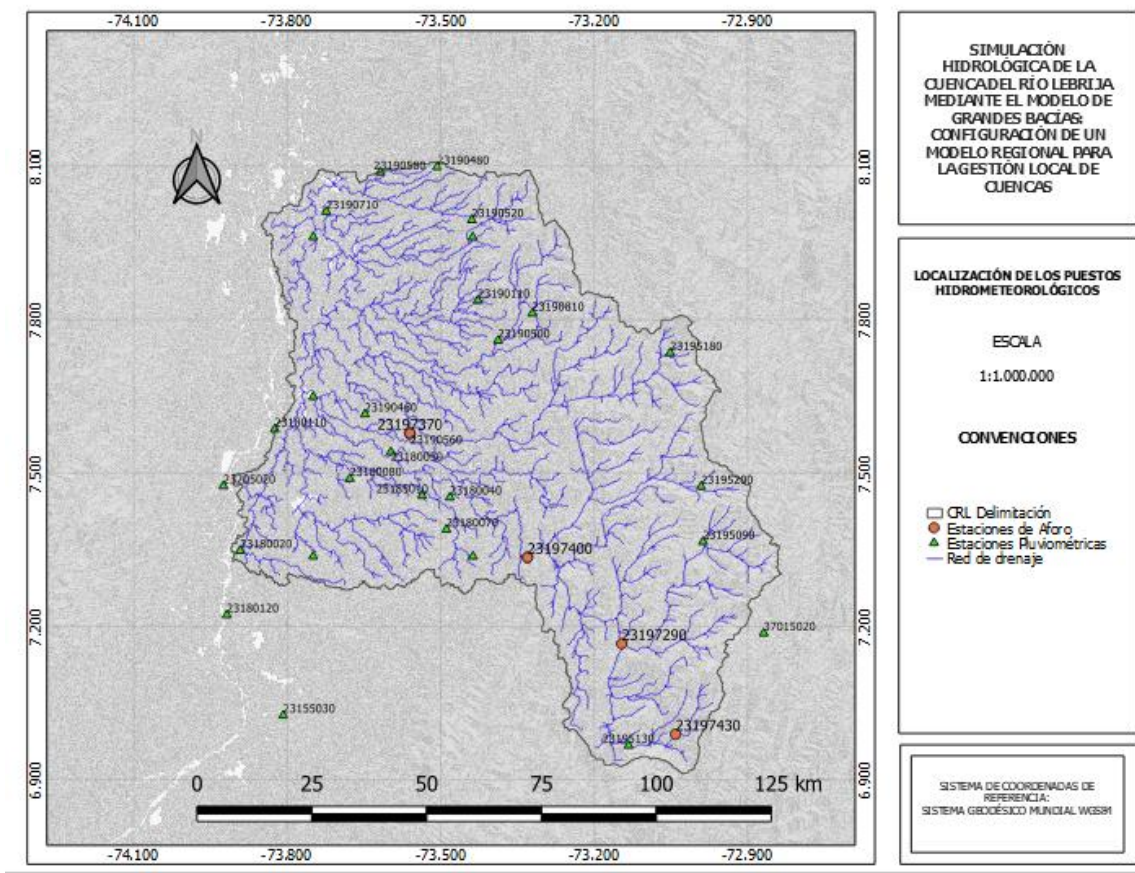
Siqueira, V. A., Fleischmann, A., Jardim, P. F., Fan, F. M., & Collischonn, W. (2016). IPH-Hydro Tools: a GIS coupled tool for watershed topology acquisition in an open-source environment. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(1), 274–287.

- Siqueira, Vinicius, Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R. M., Paris, A., Calmant, S., & Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- Siqueira, Vinicius, Paiva, R., Fleischmann, A., Fan, F., Ruhoff, A., Pontes, P., Paris, A., Calman, S., & Collischonn, W. (2018). Supplement of Toward continental Hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, undefined.
- Sokolov, A. A., & Chapman, T. G. (1981). *Métodos de cálculo del balance hídrico: guía internacional de investigación y métodos*. Inst. de Hidrología de España.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 93, Issue 4, pp. 485–498). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- UFRGS. (2020, November 5). *Hidrologia de Grande Escala*. <https://www.ufrgs.br/hge/>
- University of East Anglia. (n.d.). *About the Climatic Research Unit*. Retrieved April 19, 2021, from <https://lr1.uea.ac.uk/cru/about-cru>
- Villamizar, S. R., Pineda, S. M., & Carrillo, G. A. (2019). The effects of land use and climate change on the water yield of a watershed in Colombia. *Water (Switzerland)*, 11(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w11020285>
- Villón, M. (2002). *Hidrología* (2nd ed.). Editorial Villón.

Yapo, P., Gupta, H., & Sorooshian, S. (1998). Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204, 83–97. [https://doi.org/https://doi-org.consultaremota.upb.edu.co/10.1016/S0022-1694\(97\)00107-8](https://doi.org/https://doi-org.consultaremota.upb.edu.co/10.1016/S0022-1694(97)00107-8)

APÉNDICE A

Figura 42. Mapa de localización de los puestos hidrometeorológicos sobre la cuenca de estudio



Fuente. Elaboración propia.

## APÉNDICE B

### Parámetros de suelo URH AS

**Tabla 23.** Parámetros de suelo Subcuenca 1

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Flor_ras	151.8	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Flor_prof	232.2	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Agr_ras	113.9	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Agr_prof	193.5	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Cam_ras	113.9	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Cam_prof	232.2	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Varzeas	138.6	0.25	4.07	27.48	0.67	0	0.1
Sem_per	131.5	0.26	2.24	11.94	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.44						
<b>CI</b>	157.8						
<b>CB</b>	3083.6						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 24.** Parámetros de suelo Subcuenca 2

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Flor_ras	151.8	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Flor_prof	232.2	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Agr_ras	113.9	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Agr_prof	193.5	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Cam_ras	113.9	0.26	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Cam_prof	232.2	0.14	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Varzeas	138.6	0.25	4.07	27.48	0.67	0	0.1
Sem_per	131.5	0.26	2.24	11.94	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.44						
<b>CI</b>	157.8						
<b>CB</b>	1423.2						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 25.** Parámetros de suelo Subcuenca 3

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Flor_ras	151.8	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Flor_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Agr_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Agr_prof	193.5	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Cam_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Cam_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Varzeas	138.6	0.37	4.07	27.48	0.67	0	0.1
Sem_per	131.5	0.37	2.24	11.94	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.44						
<b>CI</b>	157.8						
<b>CB</b>	2312.7						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 26.** Parámetros de suelo Subcuenca 4

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Flor_ras	151.8	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Flor_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Agr_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Agr_prof	193.5	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Cam_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Cam_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Varzeas	138.6	0.37	4.07	27.48	0.67	0	0.1
Sem_per	131.5	0.37	2.24	11.94	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.44						
<b>CI</b>	157.8						
<b>CB</b>	2312.7						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 27.** Parámetros de suelo Subcuenca 5

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
Flor_ras	151.8	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Flor_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Agr_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Agr_prof	193.5	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Cam_ras	113.9	0.37	4.77	33.95	0.67	0	0.1
Cam_prof	232.2	0.2	4.4	30.87	0.67	0	0.1
Varzeas	138.6	0.37	4.07	27.48	0.67	0	0.1
Sem_per	131.5	0.37	2.24	11.94	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.44						
<b>CI</b>	157.8						
<b>CB</b>	2312.7						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Parámetros de suelo URH IGAC****Tabla 28.** Parámetros de suelo Subcuenca 1

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
FlorProf	768.4	0.13	4.57	26.25	0.67	0	0.1
FlorRas	284.3	0.13	2.1	39.69	0.67	0	0.1
ASI	319.8	0.18	4.15	22.6	0.67	0	0.1
AgrProf	269.5	0.15	3.67	31.89	0.67	0	0.1
AgrRas	61.4	0.13	4.42	34.73	0.67	0	0.1
Varzea	253	0.3	4.86	32.96	0.67	0	0.1
CampProf	56	0.13	3.39	21.08	0.67	0	0.1
CampRas	130.7	0.26	3.56	35.26	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.71						
<b>CI</b>	51.2						
<b>CB</b>	2680						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 29.** Parámetros de suelo Subcuenca 2

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
FlorProf	185.9	0.16	4.57	39	0.67	0	0.1
FlorRas	481.4	0.25	4.47	37.36	0.67	0	0.1
ASI	319.8	0.15	4.15	32.57	0.67	0	0.1
AgrProf	247.7	0.15	3.67	25.59	0.67	0	0.1
AgrRas	61.9	0.17	4.42	16.58	0.67	0	0.1
Varzea	163.3	0.3	3.5	13.49	0.67	0	0.1
CampProf	56	0.13	3.39	39.02	0.67	0	0.1
CampRas	115.1	0.24	3.47	22.8	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	18.32						
<b>CI</b>	85.96						
<b>CB</b>	2680						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 30.** Parámetros de suelo Subcuenca 3

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
FlorProf	185.9	0.18	4.81	37.35	0.67	0	0.1
FlorRas	286.2	0.2	4.64	36.65	0.67	0	0.1
ASI	319.8	0.18	4.15	22.57	0.67	0	0.1
AgrProf	247.7	0.15	4.46	36.78	0.67	0	0.1
AgrRas	61.9	0.2	4.42	34.73	0.67	0	0.1
Varzea	199.8	0.25	4.34	32.34	0.67	0	0.1
CampProf	56	0.14	4.1	39.02	0.67	0	0.1
CampRas	224	0.25	4.29	31.15	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.51						
<b>CI</b>	79.84						
<b>CB</b>	2355						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 31.** Parámetros de suelo Subcuenca 4

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
FlorProf	185.9	0.18	4.81	37.35	0.67	0	0.1
FlorRas	286.2	0.2	4.64	36.65	0.67	0	0.1
ASI	319.8	0.18	4.15	22.57	0.67	0	0.1
AgrProf	247.7	0.15	4.46	36.78	0.67	0	0.1
AgrRas	61.9	0.2	4.42	34.73	0.67	0	0.1
Varzea	199.8	0.25	4.34	32.34	0.67	0	0.1
CampProf	56	0.14	4.1	39.02	0.67	0	0.1
CampRas	224	0.25	4.29	31.15	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.51						
<b>CI</b>	79.84						
<b>CB</b>	2355						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

**Tabla 32.** Parámetros de suelo Subcuenca 5

<b>use</b>	<b>Wm</b>	<b>b</b>	<b>Kbas</b>	<b>Kint</b>	<b>XL</b>	<b>CAP</b>	<b>Wc</b>
FlorProf	185.9	0.18	4.81	37.35	0.67	0	0.1
FlorRas	286.2	0.2	4.64	36.65	0.67	0	0.1
ASI	319.8	0.18	4.15	22.57	0.67	0	0.1
AgrProf	247.7	0.15	4.46	36.78	0.67	0	0.1
AgrRas	61.9	0.2	4.42	34.73	0.67	0	0.1
Varzea	199.8	0.25	4.34	32.34	0.67	0	0.1
CampProf	56	0.14	4.1	39.02	0.67	0	0.1
CampRas	224	0.25	4.29	31.15	0.67	0	0.1
Agua	0	0	0	0	0	0	0
<b>CS</b>	19.51						
<b>CI</b>	79.84						
<b>CB</b>	2355						
<b>QB_M3/SKM2</b>	0.01						

## APÉNDICE C

En la Tabla 33 se exponen los valores de los indicadores obtenidos para cada centro de píxel relacionado a las estaciones cercanas realizando la comparación entre la serie sin corrección y la corrección empleada.

**Tabla 33.** Evaluación del método de corrección de sesgo

<b>Píxel</b>	<b>Estación</b>	<b>Método</b>	<b>r</b>	<b>r2</b>	<b>MAE</b>	<b>RMSE</b>	<b>dr</b>	<b>BIAS</b>
PCP0017	23155030	RAW	0.57	0.32	79.63	92.43	0.56	19.35
		LS	1.00	1.00	0.07	0.25	1.00	-0.07
		LOCI	1.00	1.00	0.06	0.21	1.00	-0.06
		PWTR	1.00	1.00	0.06	0.20	1.00	-0.06
		DM	1.00	1.00	20.69	22.74	0.88	20.69
PCP0020	23195130	RAW	0.26	0.07	48.85	67.84	0.01	43.68
		LS	1.00	1.00	1.15	1.35	0.98	-0.08
		LOCI	1.00	1.00	1.32	1.55	0.97	-0.02
		PWTR	1.00	0.99	1.58	2.07	0.97	-0.01
		DM	1.00	0.99	5.50	6.12	0.89	5.50
PCP0028	23180120	RAW	0.58	0.34	117.32	128.33	0.38	90.19
		LS	1.00	1.00	0.06	0.22	1.00	-0.06
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.01	1.00	0.00
		DM	1.00	1.00	5.52	6.02	0.97	5.52
PCP0034	37015020	RAW	0.60	0.36	28.23	35.70	0.37	-28.23
		LS	1.00	1.00	0.84	1.02	0.98	0.00
		LOCI	1.00	1.00	0.85	1.03	0.98	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.99	1.23	0.98	0.00
		DM	1.00	1.00	1.12	1.51	0.97	0.75
PCP0040	23205020	RAW	0.81	0.66	120.48	139.01	0.46	118.09
		LS	1.00	1.00	0.06	0.18	1.00	-0.05
		LOCI	1.00	1.00	0.04	0.15	1.00	-0.04
		PWTR	1.00	1.00	0.03	0.10	1.00	-0.03
		DM	1.00	1.00	14.67	16.70	0.93	14.67
PCP0041	23180020	RAW	0.82	0.68	63.46	79.09	0.68	33.65
		LS	1.00	1.00	0.07	0.22	1.00	-0.06
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.02	0.07	1.00	-0.02

PCP0042	23180080	DM	1.00	1.00	8.86	9.72	0.95	8.86		
		RAW	0.78	0.60	77.94	93.61	0.55	63.92		
		LS	0.95	0.90	25.97	33.14	0.85	-0.21		
		LOCI	0.95	0.90	26.00	33.16	0.85	-0.17		
		PWTR	0.95	0.90	26.01	33.17	0.85	-0.17		
		DM	0.95	0.90	28.06	38.47	0.84	17.44		
		23185010	RAW	0.61	0.37	94.50	103.16	0.43	64.05	
		LS	1.00	1.00	0.08	0.26	1.00	-0.07		
		LOCI	1.00	1.00	0.04	0.13	1.00	-0.04		
		PWTR	1.00	1.00	0.03	0.10	1.00	-0.03		
		DM	1.00	1.00	17.57	19.20	0.89	17.57		
		PCP0043	23180040	RAW	0.52	0.27	242.76	267.13	-0.29	242.76
		LS	0.98	0.97	38.73	44.40	0.77	38.73		
		LOCI	0.98	0.97	38.74	44.40	0.77	38.74		
		PWTR	0.98	0.97	38.78	44.42	0.77	38.78		
		DM	0.99	0.97	48.84	54.66	0.72	48.84		
	23180070	RAW	0.54	0.29	207.39	233.65	-0.10	203.96		
		LS	1.00	1.00	0.08	0.26	1.00	-0.08		
		LOCI	1.00	1.00	0.07	0.22	1.00	-0.07		
		PWTR	1.00	1.00	0.02	0.07	1.00	-0.02		
		DM	1.00	1.00	10.04	11.46	0.95	10.04		
		PCP0045	23195200	RAW	0.66	0.44	82.26	97.26	0.11	-82.26
		LS	0.96	0.92	13.95	15.75	0.85	2.33		
		LOCI	0.96	0.92	13.94	15.75	0.85	2.32		
		PWTR	0.96	0.92	13.95	15.75	0.85	2.32		
		DM	0.97	0.94	12.75	15.08	0.86	-1.62		
		23195090	RAW	0.69	0.48	84.67	96.32	0.04	-84.67	
		LS	1.00	1.00	0.09	0.27	1.00	-0.08		
		LOCI	1.00	1.00	0.09	0.30	1.00	-0.09		
		PWTR	1.00	1.00	0.09	0.28	1.00	-0.09		
		DM	0.99	0.98	4.45	7.59	0.95	-4.03		
		PCP0053	23180110	RAW	0.88	0.78	65.67	79.29	0.71	24.12
		LS	1.00	1.00	0.03	0.11	1.00	-0.03		
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00		
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	-0.01		
		DM	1.00	1.00	3.43	4.14	0.98	3.39		
	23180050	RAW	0.80	0.63	78.55	87.05	0.56	59.93		
		LS	0.99	0.97	16.19	19.30	0.91	2.35		
		LOCI	0.99	0.97	16.25	19.31	0.91	2.40		
		PWTR	0.99	0.97	16.25	19.31	0.91	2.40		
		DM	0.99	0.97	17.91	21.74	0.90	7.64		
		23190460	RAW	0.77	0.59	86.71	93.94	0.56	55.77	
		LS	0.99	0.98	13.56	15.51	0.93	-1.82		

		LOCI	0.99	0.98	13.62	15.57	0.93	-1.76
		PWTR	0.99	0.98	13.61	15.56	0.93	-1.77
		DM	0.99	0.98	12.38	15.01	0.94	3.48
	23190560	RAW	0.79	0.62	81.23	90.46	0.57	57.53
		LS	1.00	1.00	0.06	0.20	1.00	-0.06
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	-0.01
		DM	1.00	1.00	5.33	6.12	0.97	5.24
PCP0067	23190110	RAW	0.55	0.31	79.30	93.64	0.44	48.69
		LS	0.98	0.97	15.22	17.49	0.89	-7.82
		LOCI	0.98	0.97	15.27	17.53	0.89	-7.77
		PWTR	0.98	0.97	15.27	17.53	0.89	-7.77
		DM	0.98	0.97	14.14	15.97	0.90	-3.74
	23190810	RAW	0.27	0.07	87.84	108.79	0.34	46.25
		LS	0.94	0.88	26.05	29.85	0.81	-10.27
		LOCI	0.94	0.88	26.00	29.80	0.81	-10.21
		PWTR	0.94	0.88	26.00	29.81	0.81	-10.22
		DM	0.94	0.88	24.94	29.10	0.81	-6.18
	23190500	RAW	0.51	0.26	80.81	99.40	0.44	56.46
		LS	1.00	1.00	0.05	0.18	1.00	-0.05
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.01	1.00	0.00
		DM	1.00	1.00	4.03	4.44	0.97	4.03
PCP0069	23195180	RAW	0.41	0.16	75.03	86.02	0.00	-75.03
		LS	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	-0.01
		LOCI	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	-0.01
		DM	1.00	0.99	4.00	5.49	0.95	-2.87
PCP0077	23190710	RAW	0.93	0.87	107.84	114.26	0.44	107.84
		LS	1.00	1.00	0.01	0.04	1.00	-0.01
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		DM	1.00	1.00	3.52	4.37	0.98	3.44
PCP0078	23190480	RAW	0.81	0.65	151.83	164.61	-0.13	151.83
		LS	0.95	0.91	19.83	24.90	0.85	-2.72
		LOCI	0.95	0.91	19.79	24.88	0.85	-2.68
		PWTR	0.95	0.91	19.79	24.88	0.85	-2.69
		DM	0.95	0.91	19.83	25.39	0.85	0.13
	23190580	RAW	0.90	0.80	154.51	162.06	-0.02	154.51
		LS	1.00	1.00	0.04	0.12	1.00	-0.03
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.01	1.00	-0.01
		DM	1.00	1.00	2.84	3.47	0.98	2.81

---

PCP0079	23190520	RAW	0.55	0.30	75.12	95.19	0.57	-36.20
		LS	1.00	1.00	0.06	0.18	1.00	-0.05
		LOCI	1.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00
		PWTR	1.00	1.00	0.01	0.02	1.00	-0.01
		DM	1.00	1.00	4.28	4.86	0.98	4.20

---