

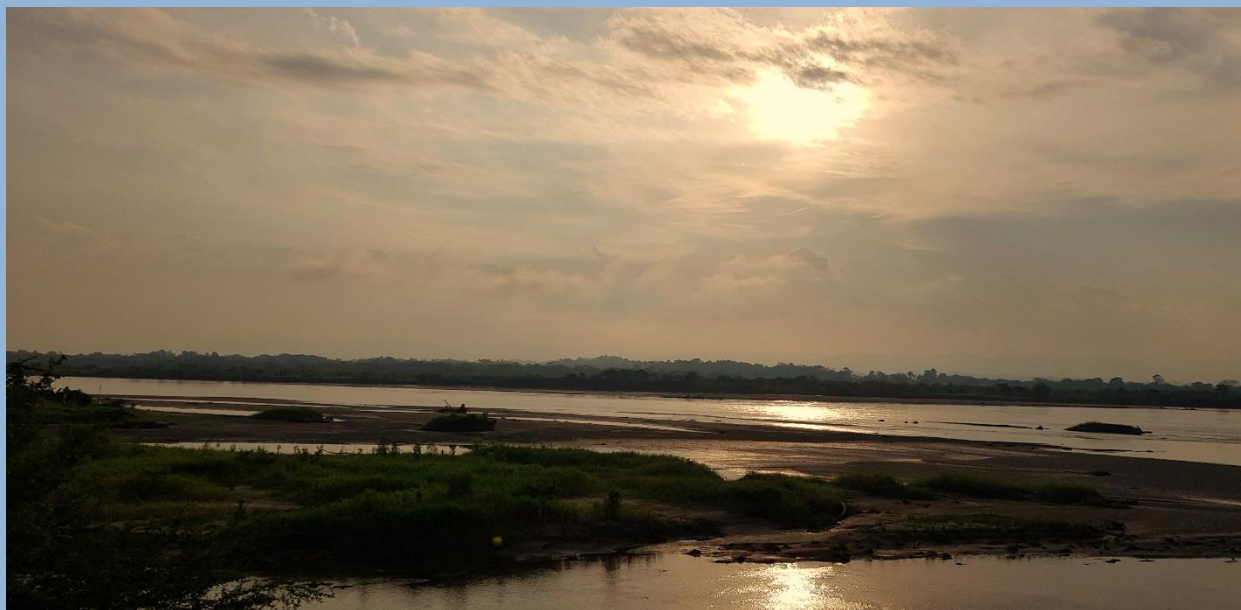


Foto: Río Magdalena - Puerto Triunfo (Antioquia) 15 de

MODELACIÓN DE OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL DEL VMM

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES

SUBDIRECCIÓN DE HIDROLOGÍA

GRUPO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA

2022

Acuerdo de Cooperación ECOPETROL – IDEAM – AC No. 4 (3034153)

PRODUCTO 6

Modelación de oferta hídrica superficial del VMM

	Versión	Nombre	Cargo	Fecha
Autor(es)	2.0	Nicolas Duque Gardeazábal Camilo Sanabria	Contratistas IDEAM	01/09/2022
Revisó		Juan José Montoya, Fabio Andrés Bernal	Líder Técnico Acuerdo AC 04, Coordinador Grupo de Modelación Hidrológica	01/12/2022
Aprobó		Nelson Omar Vargas	Subdirector de Hidrología	15/12/2022



Tabla de Contenidos

1. Introducción	6
1.1 Marco conceptual. El ciclo hidrológico	8
1.2 Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua	10
1.3 Marco institucional y normativo.....	12
1.3.1. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.	12
1.3.2. Instrumentos nacionales y regionales para la evaluación del agua.	13
1.4 Área de estudio.	14
1.4.1. Subzona hidrográfica del río Opón	15
1.4.2. Subzona hidrográfica del río Sogamoso	16
1.4.3. Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena	18
1.5 Unidades de análisis, escalas y resoluciones.	19
2. Evaluación de la oferta hídrica.....	22
2.1. Aspectos conceptuales	22
2.2. Aspectos metodológicos	24
2.2.1. Definición de objetivos de modelación.....	26
2.2.2. Revisión de datos e información disponible	26

2.2.3.	Definición de las escalas características	32
2.2.4.	Análisis de calidad de los datos e información	34
2.2.5.	Construcción del modelo conceptual	39
2.2.6.	Selección del modelo a emplear	46
2.2.7.	Selección de criterios de desempeño	52
2.2.8.	Análisis de sensibilidad.....	54
2.3.	Resultados de la modelación hidrológica	58
2.3.1.	Ajuste de parámetros y calibración, validación	58
2.3.2.	Desempeño del modelo, validación y evaluación diagnóstica de las simulaciones	79
2.3.3.	Evaluación de la incertidumbre	111
2.4.	Posibles escenarios de caudal a 5 y 10 años	117
2.4.1.	Subzona hidrográfica del río Lebrija	118
2.4.2.	Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso	120
3.	Indicadores hídricos	125
3.1.	Oferta hídrica total superficial	125
3.1.1.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija.....	125
3.1.2.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Opón	133
3.1.3.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Sogamoso.....	139

3.2.	Índice de regulación hídrica e índice de aridez	146
3.2.1.	Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija.....	147
3.2.2.	Resultados en la subzona hidrográfica de los ríos Opón y Sogamoso.....	150
3.3.	Caudal ambiental	153
4.	Bibliografía.....	157

1. Introducción

La evaluación y conocimiento de los recursos hídricos tanto superficiales, como subterráneos, es un proceso continuo y sistemático, necesario para una adecuada gestión integral de los recursos hídricos y la toma de decisiones. Estas actividades se encuentran consagradas en la normatividad colombiana, asignando responsabilidades a nivel nacional, al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM-, mientras que, a nivel regional, le compete a las Autoridades Ambientales.

Esta evaluación debe regirse por métodos y técnicas estandarizados y adecuados, que permitan conocer en determinada región, la oferta, demanda y la calidad del agua. Buscando esa estandarización, surgen las Evaluaciones Regionales del Agua (ERA), como un proceso de evaluación del agua en las regiones, a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. Se pretende que se constituya en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que la integran. Se busca que se genere información en forma sistemática y que facilite la articulación de los Sistemas de Información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales. En el año 2013, el IDEAM publicó el documento titulado “Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua-ERA”, donde se presentan los elementos conceptuales necesarios para abordar la estimación y análisis de la oferta, demanda, calidad y el riesgo del agua en la región, en coherencia con lo abordado en el del Estudio Nacional del Agua. A partir de estos conceptos y procedimientos, las Autoridades Ambientales deben continuamente realizar la Evaluación del Agua, teniendo en cuenta los factores naturales y antrópicos regionales en el área de su jurisdicción y soportados en un monitoreo adecuado.

Una de estas áreas corresponde a la llamada región del Valle Medio del Magdalena, donde confluyen la totalidad del departamento de Santander y parte de Antioquia, Bolívar y Boyacá. Es una región que alberga importantes recursos hídricos, tanto superficiales, como subterráneos, que se utilizan para abastecimiento humano, agricultura, ganadería, actividades industriales y de

producción de hidrocarburos, por lo tanto, es pertinente la evaluación integral del recurso hídrico, para su adecuado manejo.

En este contexto de generación de conocimiento, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM- y ECOPETROL firmaron el acuerdo de cooperación AC No. 4 3034153 2020, con objeto de “Actualización y seguimiento de la línea base ambiental hidrológica y de calidad de agua superficial del Valle Medio del Magdalena – VMM”, bajo el Convenio Marco No. 52112957 cuyo objeto es “Aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para el intercambio de conocimiento científico e información, y el desarrollo de productos y servicios que contribuyan al cumplimiento de las funciones, objetivos e intereses de las partes”, suscrito por ECOPETROL y el IDEAM el 22 de enero de 2014 y con un plazo de diez (10) años, esto es hasta el 22 de enero de 2024.

El Otrosí No. 1 del acuerdo de cooperación AC No. 4 contiene el documento técnico – Anexo 1 que define, entre otros, los productos a entregar y los contenidos de estos productos y se plantean cuatro objetivos específicos:

1. Monitoreo, pronóstico y generación de alertas hidrometeorológicas y de calidad de agua superficial en el Valle Medio del Magdalena – VMM.
2. Determinación del estado del recurso hídrico superficial en el Valle Medio del Magdalena – VMM.
3. Fortalecimiento de la capacidad técnica de la Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS en el monitoreo del recurso hídrico superficial.
4. Diseño e implementación del plan de divulgación y comunicaciones de monitoreo, pronóstico y alertas hidrometeorológicas y de calidad de agua superficial del VMM.

La Figura 1.1 muestra el esquema general del acuerdo AC 04 en la que se relacionan los cuatro objetivos con los ejes principales del acuerdo: monitoreo; modelación, estimación y análisis; fortalecimiento institucional; y divulgación y comunicaciones. Se observa que lo plasmado en este documento se basa en el monitoreo y la modelación, estimación y análisis.

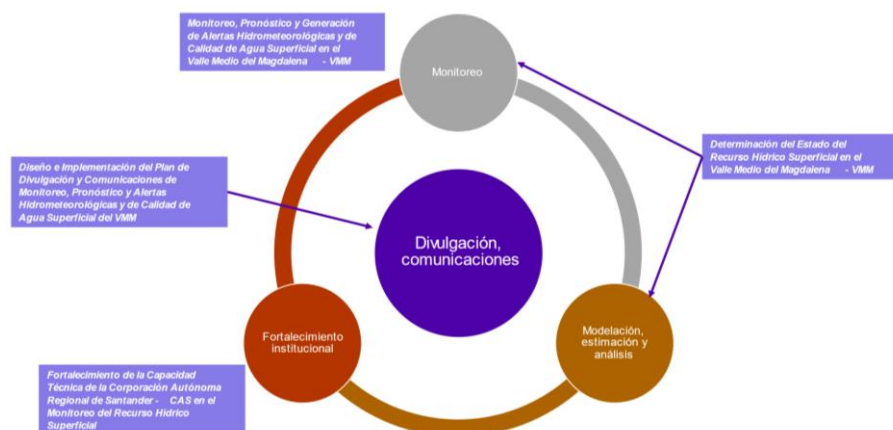


Figura 1.1. Esquema general del acuerdo AC 04 entre el IDEAM y ECOPETROL

Este documento se construye con el objeto de establecer la oferta hídrica superficial del VMM a partir de un esquema conceptual y metodológico de modelación, el cual se enmarca entre los contenidos entregables pactados para el producto 4 del AC 04. Este documento presenta el resumen conceptual y metodológico, los resultados y análisis de los componentes temáticos que definen el estado del recurso hídrico: oferta. Está apoyado en otros documentos que presentan de forma detallada y extensa cada componente temático y los cuales se anexan.

El documento se estructura en cuatro capítulos, incluyendo la introducción y la bibliografía. El segundo capítulo trata de la oferta hídrica, en el tercer capítulo se presentan los indicadores hídricos dependientes de la oferta.

1.1 Marco conceptual. El ciclo hidrológico

La evaluación de la oferta en el Valle Medio del Magdalena está soportada en un marco general basado en los flujos y posibles conexiones de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico se define como la “sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma: evaporación del agua del suelo, del mar y de las aguas continentales, condensación en forma de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o en masas de agua y reevaporación” (OMM, 2012) (Figura 1.2). Se constituye como un modelo

básico para entender el funcionamiento de los sistemas hídricos. Las principales variables naturales de los procesos del ciclo hidrológico son: precipitación, infiltración, escurrimiento, evaporación y transpiración. Las actividades humanas (localización de asentamientos humanos, industria, ganadería, agricultura, entre otros) pueden alterar los componentes del ciclo natural mediante afectaciones del uso del suelo y a través de la utilización, reutilización y vertido de residuos en los recorridos naturales de los recursos hídricos superficiales y subterráneos (UNESCO, 2006).

El análisis de los aspectos cuantitativos y cualitativos de los componentes del ciclo hidrológico en su expresión regional, como es el caso del Valle Medio del Magdalena, presupone un conocimiento e información de cada una de esas variables que participan en los flujos del ciclo hidrológico y de las actividades que pueden estar presionando el recurso hídrico (IDEAM, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua-ERA, 2013) ((Figura 1.3).

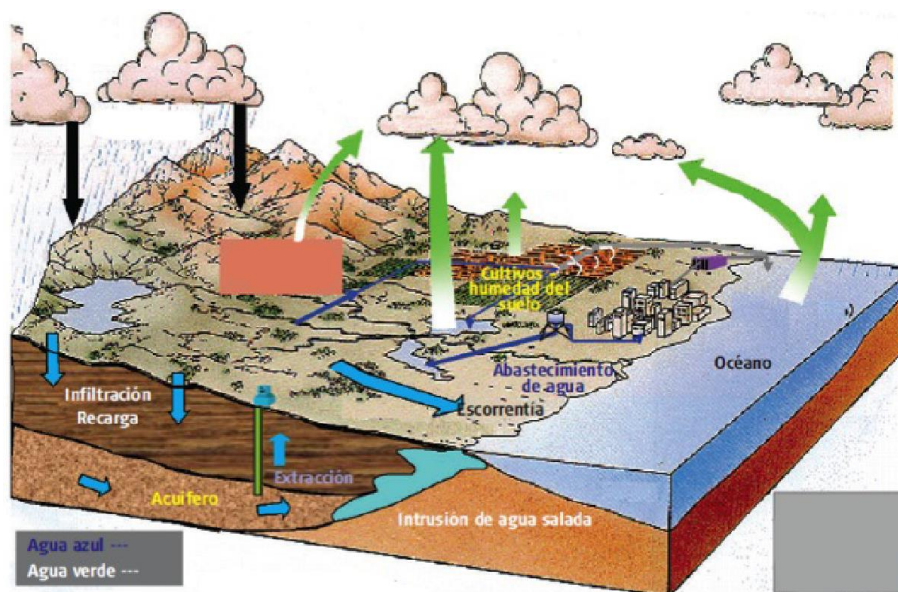


Figura 1.2. Esquema del ciclo hidrológico (UNESCO, 2006)

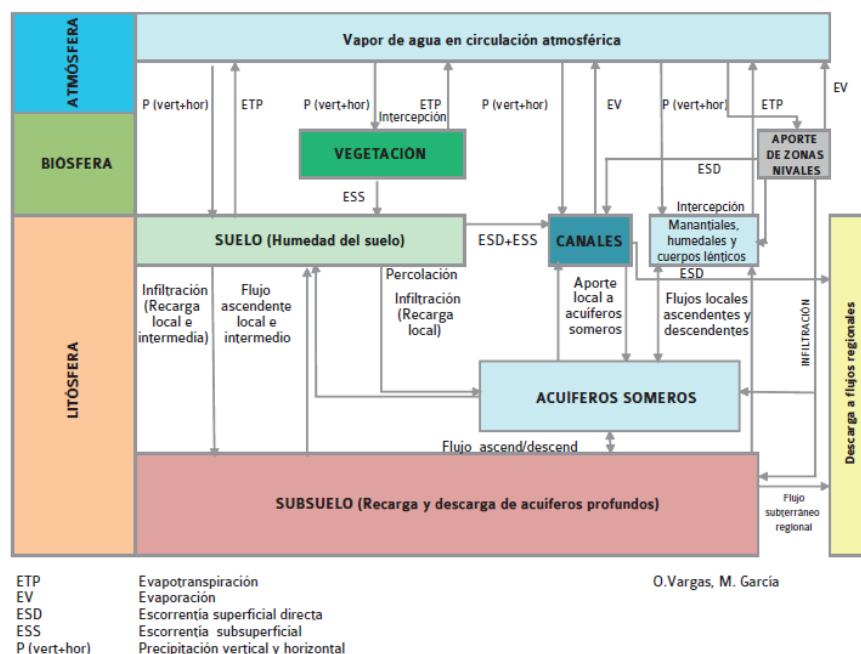


Figura 1.3. Procesos del ciclo hidrológico (García, SP)

1.2 Marco metodológico. Estudio Nacional del Agua y Evaluación Regional del Agua

El proceso metodológico para la evaluación de la oferta ben el Valle Medio del Magdalena toma como referente los Estudios Nacionales del Agua 2010, 2018 y los lineamientos conceptuales y metodológicos de las Evaluaciones Regionales del Agua.

El Estudio Nacional del Agua, publicado por el IDEAM, se constituye en un instrumento técnico de consulta nacional, donde se consigna la información relacionada con la oferta, demanda, calidad del agua superficial, además aborda la temática de sedimentos y sintetiza el conocimiento e información que se tiene del agua subterránea en el país. La información es presenta a escala nacional, por medio de salidas gráficas y de un sistema de indicadores integrados relacionados con la oferta (índice de aridez, índice de retención y regulación hídrica, índice de sequía y precipitación, índice de rendimiento medio de sedimentos), calidad (índice de calidad del agua, índice de alteración potencial de la calidad del agua), uso del agua (índice de uso del agua superficial, índice de presión hídrica al ecosistema, índice de agua no retornada a la cuenca).

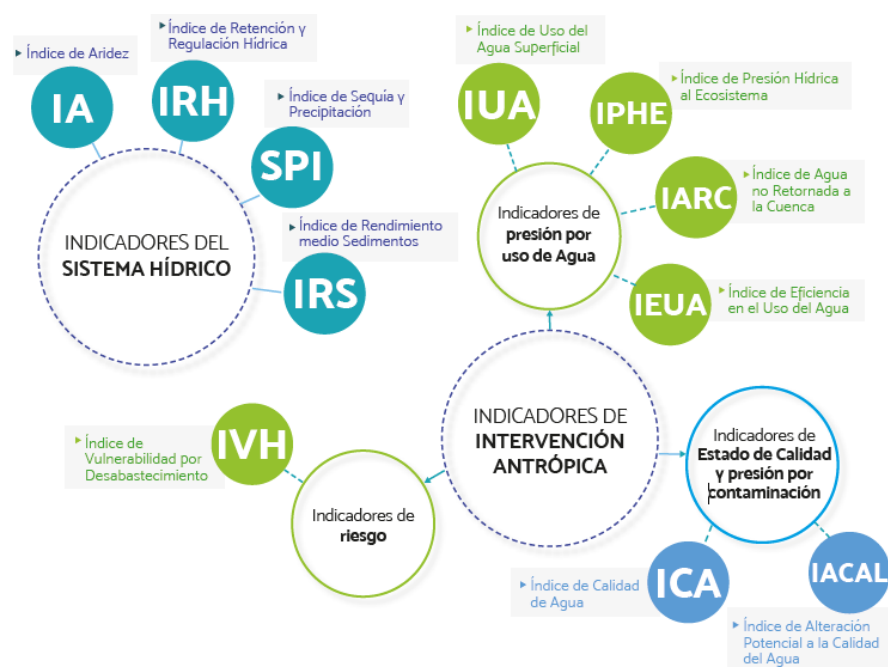


Figura 1.4. Sistema de indicadores hídricos para el ENA 2018 (IDEAM, 2019).

La Evaluación Regional del Agua (ERA) es un proceso de evaluación del agua en las regiones, a partir de la actualización permanente de información y construcción de conocimiento. Se pretende que se constituya en un insumo técnico para la planificación, priorización de acciones y toma de decisiones en área de jurisdicción de las autoridades ambientales y en las unidades de análisis hídricas que la integran. Se busca que se genere información en forma sistemática y que facilite la articulación de los Sistemas de Información al interior de las autoridades ambientales, entre ellas y con las entidades nacionales (IDEAM, 2013). Es un procedimiento técnico de evaluación y conocimiento que debe ser fortalecido en el Valle Medio del Magdalena, con el fin de contar con información técnica.

La ERA retoma los indicadores presentados en el estudio nacional del agua y presenta un marco metodológico para su estimación y para la estimación de la oferta, demanda, calidad del agua superficial y subterránea en la región, el cual se referenciará en los capítulos de evaluación de la demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena.

Con respecto al acuerdo AC 04, en el segundo capítulo se resumen los aspectos metodológicos y se detalla en profundidad las metodologías desarrolladas.

1.3 Marco institucional y normativo.

1.3.1. Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.

La Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) busca consolidar acciones y estrategias que garanticen el uso y sostenibilidad del recurso hídrico en el país. Para esto se basa en el concepto de gestión integral del recurso hídrico (GIRH), definido por la Global Water Partnership – GWP como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2000).

Bajo este nuevo paradigma, se elaboró un diagnóstico del estado y la gestión del recurso hídrico en Colombia, el cual, sirvió de base para la formulación de los objetivos, principios, estrategias, líneas de acción generales y metas nacionales que se presentan en el documento de la PNGIRH y su Plan Hídrico Nacional (MAVDT, 2010).

La Política Nacional para la GIRH tiene un horizonte de 12 años (hasta el 2022), tiene como objetivo general garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, considerando el agua como factor de desarrollo económico y de bienestar social, e implementando procesos de participación equitativa e incluyente. Los objetivos específicos están orientados a mejorar el conocimiento y gestión de la oferta, demanda, calidad y riesgo del agua, así como a fortalecer la capacidad de las instituciones y consolidar la gobernabilidad para la gestión integral del recurso hídrico (MAVDT, 2010).

1.3.2. Instrumentos nacionales y regionales para la evaluación del agua.

Los instrumentos consultados para recopilar información para la evaluación regional de la oferta, demanda y calidad del agua pueden ser técnicos, de planificación, de administración (comando y control), económicos, metodológicos o procedimentales.

1.3.2.1. Instrumentos técnicos

Los instrumentos técnicos permiten materializar la conceptualización técnica de la evaluación regional del agua y su implementación a través de programas, guías metodológicas, protocolos, herramientas de captura de información, normas técnicas, documentos de apoyo, entre otros (IDEAM, 2013). Para efectos de la evaluación de la demanda y calidad del agua en el Valle Medio del Magdalena se destacan los siguientes:

- *Programa nacional de monitoreo del recurso hídrico:* el Programa Nacional de Monitoreo adelantado por el IDEAM, busca la integralidad y complementariedad en el monitoreo de las principales variables de seguimiento del estado en cantidad y calidad del agua. El Programa tiene como referente básico los avances del IDEAM en materia de operación de la red básica y los protocolos para el seguimiento y monitoreo del agua. A partir de este programa, se recopilará la información para la evaluación de la calidad del agua.
- *Registro de usuarios del recurso hídrico:* un instrumento diseñado para consolidar la información de concesiones de agua y permisos de vertimiento, estandarizando la información básica requerida para el otorgamiento de los mismos en las autoridades ambientales. Este instrumento aplica para la recopilación de información, tanto para la evaluación de la demanda, como de la calidad del agua.
- *Normas técnicas:* Las normas técnicas para la GIRH soportan la regulación, el control ambiental y la administración del agua. Básicamente el marco de aplicación responde a la reglamentación nacional sobre la destinación del recurso y al soporte técnico que respalda el índice de calidad del agua (ICA) y el índice de alteración de la calidad del agua (IACAL). Cabe resaltar, que lo normado en el Decreto 1076/15 sobre uso y aprovechamiento del agua y en la Resolución 631/15 sobre límites permisibles, se constituirá en el fundamento de los análisis pertinentes.

1.3.2.2. Instrumentos de planificación

Los principales instrumentos que resaltan a escala regional, corresponden a los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), reglamentación de vertimientos y el establecimiento de objetivos de calidad, que incluyen, información de base y evaluaciones realizadas en su momento en relación con las estimaciones de presión y del estado de la calidad del agua; también dichos aspectos se ven reflejados, en un instrumento particular aplicado a los usuarios municipales como es el plan de saneamiento y manejo de vertimientos municipales-PSMV.

1.3.2.3. Instrumentos económicos

El instrumento económico para la evaluación de la calidad del agua a nivel regional y que apunta a apoyar la regulación del uso y condiciones de calidad del agua es la tasa retributiva, consignada en la Ley 99 de 1993, artículo 42, definiéndola como aquella que deben pagar los usuarios por el efecto nocivo causado sobre los recursos naturales, cuando son usados para la disposición de residuos, determinando que los parámetros básicos para el cobro serían la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST).

1.4 Área de estudio.

El área de estudio corresponde a una porción del Valle Medio del río Magdalena (VMM) delimitado por subzonas hidrográficas que configuran un área de interés y unas áreas de influencia que difieren según los componentes temáticos analizados. El área de interés corresponde a las subzonas hidrográficas del río Opón, río Lebrija medio-bajo y otros directos al Magdalena y río Sogamoso. El área de influencia comprende las subzonas hidrográficas de los ríos Carare, Fonce, Suárez y Chicamocha, teniendo en cuenta el aporte oferta y calidad que éstas pueden tener sobre las subzonas hidrográficas del área de interés, como resultado de procesos naturales y antrópicos (Figura 1.5). La zona comprende 44.441 km², abarcando 218 municipios en los departamentos de César, Santander, Boyacá, Norte de Santander, Bolívar, Antioquia, Casanare y Arauca, Cundinamarca.

A continuación, se describe brevemente las subzonas hidrográficas correspondientes al área de interés.

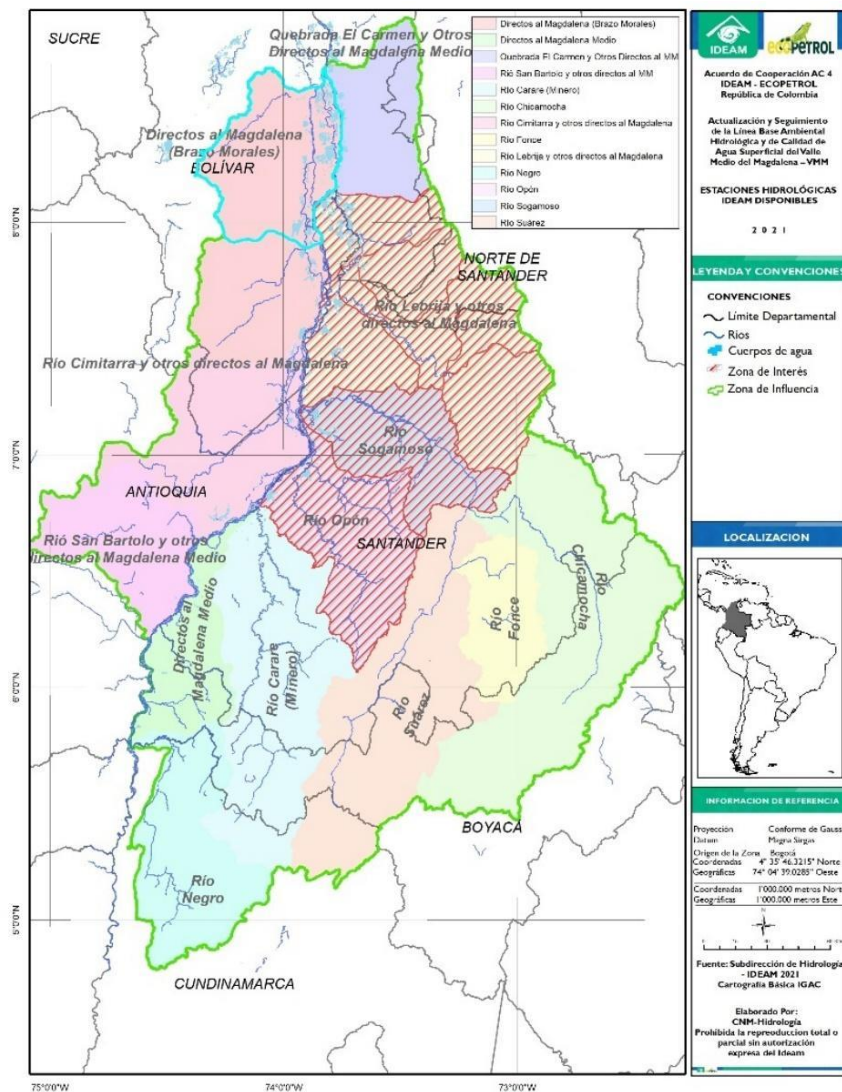


Figura 1.5 Localización del área de interés y área de influencia en los componentes de oferta, demanda y calidad.

1.4.1. Subzona hidrográfica del río Opón

La SZH del río Opón en el Valle Medio del Magdalena se localiza en el centro – occidente del departamento de Santander limita al norte con la SZH del río Sogamoso, al oriente con la SZH del río Suárez, al sur con la SZH del río Carare y al occidente con el río Magdalena. Esta SZH se extiende a lo largo de 19 municipios del departamento de Santander (parcialmente) con una extensión total de aproximadamente 4,318.46 km² equivalente al 14% del área total del

departamento, la localización de la SZH se presenta en la Figura 1.6. Dentro de sus principales corrientes se encuentran los ríos: Quitará, Verde, Blanco, Cascajales, La Colorada, Oponcito; todos ellos afluentes al río Opón.

Dentro del área de la SZH se encuentran contenidas las cabeceras de los municipios de Barrancabermeja, El Carmen y Santa Helena del Opón. Adicionalmente, en la parte baja de la cuenca se localizan la ciénaga de Chucurí y la ciénaga del Opón, entre otras.

La SZH del río Opón cuenta con dos grandes fuentes hídricas superficiales: el río Opón y el río La Colorada. En la zona baja, cerca de la zona de confluencia con el río Magdalena, estas fuentes hídricas se unen en presencia de un complejo de ciénagas para finalmente desembocar al río Magdalena.

1.4.2. Subzona hidrográfica del río Sogamoso

La SZH del río Sogamoso hace parte de la Zona Hidrográfica del río Sogamoso y corresponde a la parte baja de esta, iniciando desde la confluencia de los ríos Suarez y Chicamocha, hasta la descarga del río Sogamoso en el río Magdalena. Esta subzona hidrográfica se localiza noroccidente del departamento de Santander, limitando al sur con la SZH del río Opón, al norte con la SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena, al occidente limita con el río Magdalena y por el occidente recibe las aguas de las SZH de los ríos Chicamocha y Suarez.

La SZH del río Sogamoso se extiende a lo largo de 13 municipios, todos ellos del departamento de Santander, con un área de drenaje total de aproximadamente 3,408.44 km² la cual equivale al 11.2% del área total del departamento. Dentro del área de esta SZH se encuentran contenidas las cabeceras municipales de los municipios de Zapatoca, San Vicente de Chucurí, Betulia y una fracción de la cabecera municipal de Barrancabermeja (ver Figura 1.7). Adicionalmente, al interior de la SZH se localizan las ciénagas de San Silvestre, El Llanito, Zarzal, entre otras.

Algunas de las principales afluencias del río Sogamoso corresponden a: aguas arriba los ríos Suarez y Chicamocha, el río Chucurí, la quebrada La Putana, el río Sucio y el caño San Silvestre. Cabe resaltar que entre los años 2010 y 2014 se construyó sobre el río Sogamoso, en la parte media de la SZH, el embalse de Topocoro para la generación de energía eléctrica por parte de la empresa ISAGEN SA. Esto hace que desde el punto de vista hidrológico se realice un análisis natural de las

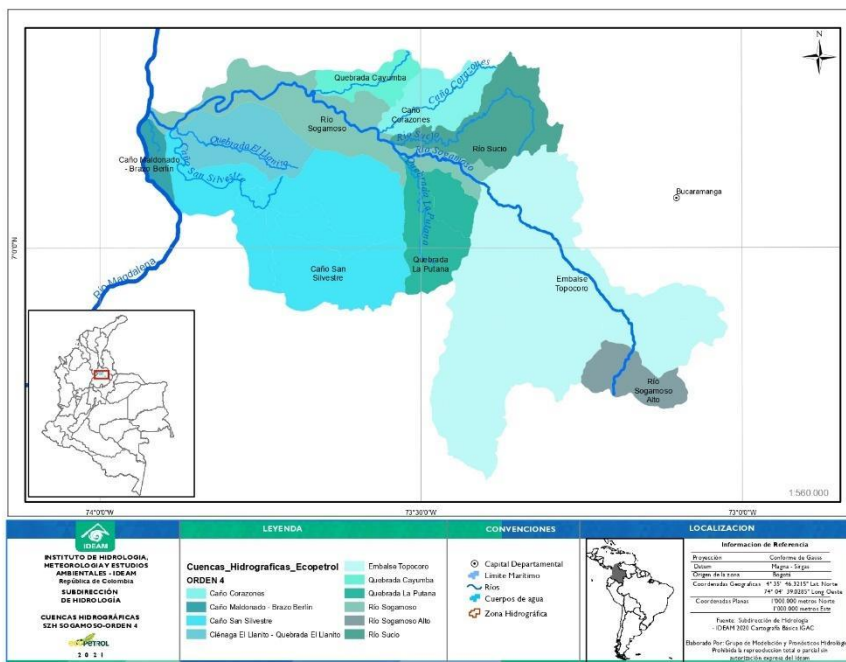


Figura 1.7 Localización Subzona Hidrográfica del río Sogamoso

1.4.3. Subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena

En la Figura 1.8 se muestra la ubicación, delimitación y subdivisión de la SZH del río Lebrija, donde se detalla que muchas corrientes del costado oriental drenan hacia el río Lebrija que corre de sur-oriente hacia el nor-occidente. Las subcuencas que se muestran en la figura corresponden a la subdivisión hasta nivel 3 (IDEAM, 2013). Se deben destacar varias subcuencas que drenan directamente hacia el Magdalena, como lo son la quebrada La Gómez y la quebrada La Trece, que hacen parte de la SZH pero que no drenan directamente al río Lebrija.

1.5 Unidades de análisis, escalas y resoluciones.

19

Las unidades espaciales de análisis y presentación de resultados corresponden a un nivel de agregación subsiguiente a las subzonas hidrográficas. Se usan para la generación de indicadores de sistemas hídricos definidos en el ENA 2018 (ver la Figura 1.4). En general, se trata de cuencas hidrográficas conectadas topológicamente por una red de drenaje y en algunos casos se definen según criterios de gestión del recurso hídrico. Para el estudio se usaron unidades espaciales de análisis construidas según los siguientes criterios:

- **Criterios de gestión del recurso hídrico.** En cuencas que cuentan con Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) y que contaban con una delimitación de unidades de análisis, se usan estas unidades. Esta delimitación sigue lo establecido en el decreto 1640 de 2012 y en la guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas POMCAS, haciendo uso de las curvas de nivel contenidas en la base cartográfica (1:25,000), el DEM utilizado para el desarrollo del POMCA e imágenes satelitales disponibles. Con base en lo anterior y teniendo en cuenta los intereses y competencias de las Corporaciones Autónomas Regionales, se opta por utilizar la delimitación de nivel subsiguiente elaborada por la CAS para los POMCAS mencionados, de modo que los productos aquí generados se ajusten espacialmente con los productos generados por la CAS.
- **Criterios fisiográficos e hidrológicos.** En cuencas que no tienen POMCAS, se usaron unidades de análisis definidas por el IDEAM considerando criterios fisiográficos y conexiones hidrológicas en redes de drenaje. Para la delimitación de las cuencas de nivel subsiguiente a SZH se tuvo en cuenta características como las redes de drenaje de la cartografía IGAC a escala 1:25,000 y 1:100,000; y modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) con resolución de 30 metros; la revisión de imágenes satelitales para verificación del trazado actual de las corrientes; entre otras fuentes de información.

La Figura 1.9 muestra las cuencas con cubrimiento de POMCAS (en verde) y en las que se usaron las unidades de análisis definidas en los POMCA.

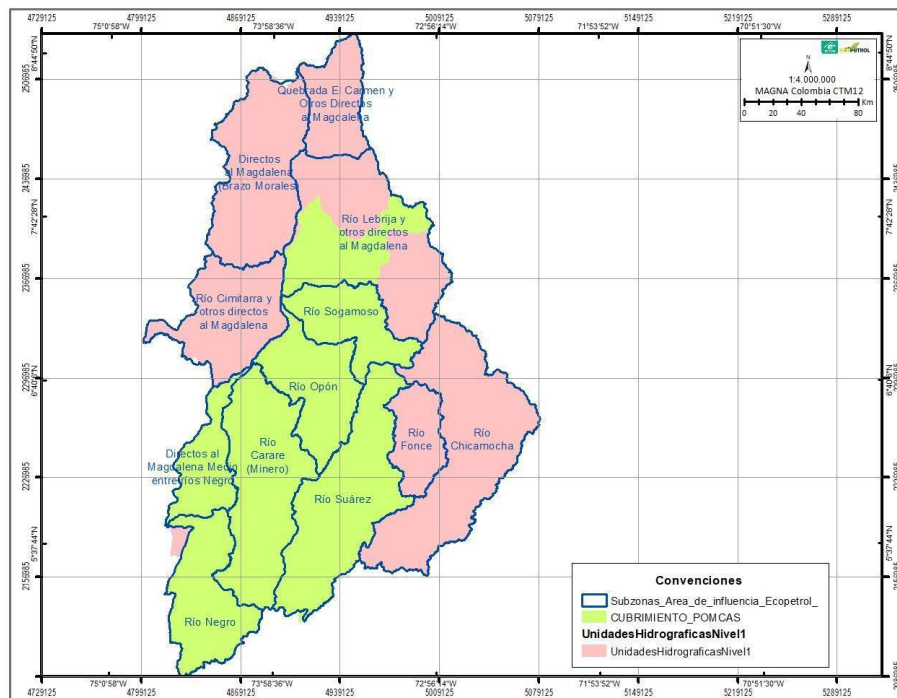


Figura 1.9. Cubrimiento de cuencas con POMCA y cuencas sin POMCA.

La modelación hidrológica tendiente a la estimación de indicadores hídricos se efectúa a escala diaria, aunque en algunos análisis estadísticos se agregan valores a escala mensual y en la presentación de resultados y análisis se agregan resultados a escala anual en promedios multianuales.

El proyecto usa el sistema de coordenadas CTM-12 (Resolución 529 del año 2020 expedida por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC).

2. Evaluación de la oferta hídrica

En este capítulo se presenta un resumen de los aspectos conceptuales y metodológicos tendientes a la estimación de la oferta hídrica superficial y presenta los resultados obtenidos y los análisis efectuados. Lo consignado en este capítulo está basado en los siguientes documentos, los cuales se anexan y que detallan en extenso los conceptos y métodos utilizados:

- Metodología para la modelación de oferta hídrica de la subzona hidrográfica del río Lebrija y otros directos al Magdalena.
- Documento con los resultados de la modelación hidrológica de oferta hídrica superficial para la subzona del río Lebrija.
- Metodología para la modelación de la oferta hídrica de las subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso.
- Resultados de la modelación hidrológica de la oferta hídrica superficial total para las SZHs de los ríos Opón y Sogamoso.
- Informe sobre la refinación de los modelos hidrológicos para oferta hídrica en el Valle Medio del Magdalena

2.1. Aspectos conceptuales

La Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) se define cómo el volumen de agua por cantidad de tiempo que escurre por la superficie en un espacio definido. Es el agua que integra los sistemas de drenaje superficial, representado en el agua que fluye por la superficie de suelo, que no se infiltra o se evapora, y se concentra en los cauces de los ríos y/o en los cuerpos de agua lénticos (IDEAM, 2013). Para determinar la OHTS se definen unidades de análisis, que en el caso del acuerdo AC 04 corresponden a un nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas (ver numeral 1.5) y una resolución temporal anual. La OHTS está determinada por el ciclo hidrológico en cada unidad de análisis, por lo tanto, es el ciclo hidrológico y su distribución espacio – temporal la que define los aspectos conceptuales de la OHTS.

El ciclo hidrológico se entiende como la continua circulación del agua en sus diferentes estados (solido, líquido y gaseoso) a través de la hidrósfera. Considera nueve procesos físicos de interés,

que permiten la aproximación al entendimiento del ciclo, estos son: evapotranspiración, condensación, precipitación, interceptación, infiltración, percolación, escurrimiento superficial y los almacenamientos (Linsley, Kohler, & Paulhus, 1982).

En la Figura 2.1 se ilustran los procesos del ciclo hidrológico y sus interacciones en el medio natural. Debe resaltarse que el movimiento del agua durante las diferentes fases del ciclo es desordenado e impredecible tanto espacial como temporalmente.

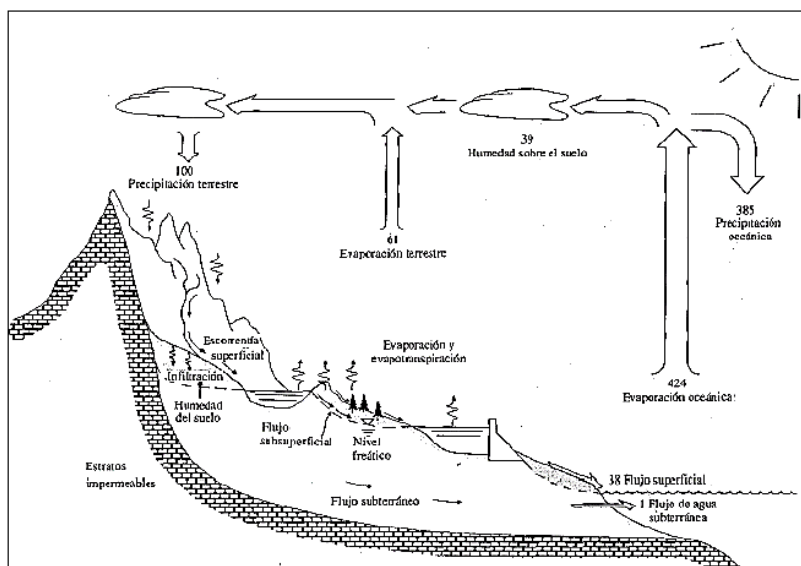


Figura 2.1 Esquema procesos en ciclo hidrológico. Fuente: Chow (1965)

Existen otros elementos de carácter no físico que pueden llegar a tener influencia sobre el ciclo hidrológico como lo son la influencia antrópica, sustancias químicas en la atmósfera, cambios en la biota, entre otros. Las extracciones del recurso hídrico realizadas por el hombre para actividades como la irrigación, generación de energía y el mismo consumo humano, alteran significativamente el ciclo hidrológico con incidencia final sobre el régimen de caudales en una determinada región. Por consiguiente, se hace necesaria la inclusión de estos elementos en las conceptualizaciones previas a la construcción de modelos. Sin embargo, debido a la falta de información específica sobre vertimientos y extracciones en la mayoría de las corrientes, se torna compleja su implementación. (Di Baldassarre, Brandimarte, & Beven, 2016). En la Figura 2.2 se representan

estas interacciones en lo que se consideraría una conceptualización del sistema socio-eco-hidrológico.

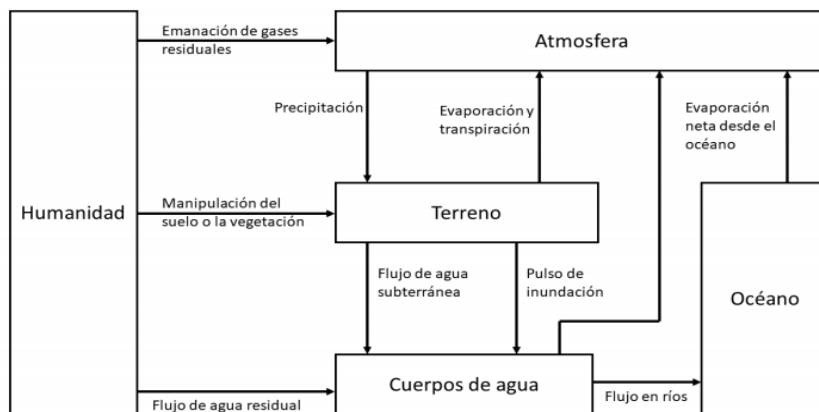


Figura 2.2 Conceptualización sistema socio-eco-hidrológico. Fuente: adaptado de Falkenmark & Rockström (2004).

2.2. Aspectos metodológicos

Para determinar la OHTS se requiere entonces de aplicar un *modelo* que permita representar el ciclo hidrológico o el sistema socio-eco-hidrológico. Para simular la distribución espacio – temporal del ciclo hidrológico se recurre entonces a la modelación hidrológica, la cual consiste en una serie de pasos estrechamente asociados al método científico. El modelo hidrológico es la hipótesis de trabajo que luego de un proceso de calibración y validación según datos e información (observación), se valida o se rechaza. En este contexto, la cuenca hidrográfica es entendida como un sistema. La cuenca presenta entradas (precipitación) y salidas (caudal) y en su interior se presentan almacenamientos y transformaciones con diferentes escalas espaciales y temporales (Figura 2.3). Si el modelo simula de forma adecuada las salidas (caudales observados), se acepta el modelo como válido y se usa para la estimación o simulación.

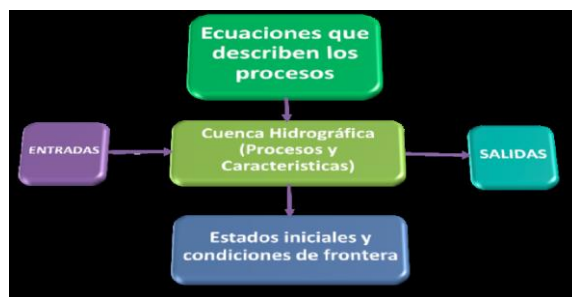


Figura 2.3 Esquema de un modelo hidrológico. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)

La Figura 2.4 muestra las etapas metodológicas que se han seguido. A continuación, se resumen cada uno de los pasos, recalcando que la metodología detallada se encuentra en los documentos anexos.



Figura 2.4 Etapas de la modelación hidrológica. Fuente: Protocolo de modelación hidrológica e hidráulica. IDEAM (2018)

Se debe aclarar que se realizaron dos ejercicios de modelación durante el segundo semestre de 2021 y el primer semestre de 2022. Con base en los primeros modelos, *se refinaron* las entradas de los mismo durante el año 2022 para mejorar el desempeño alcanzado hasta ese momento. **La refinación** consistió principalmente en el cambio del producto de precipitación (explicado más adelante), y en la recalibración de los modelos; otros detalles se dan en Duque Gardeazábal (2022).

2.2.1. Definición de objetivos de modelación

En el caso del acuerdo AC 04, el objetivo de la modelación hidrológica es estimar la oferta hídrica total superficial (escorrentía / volumen) y caudales (m^3/s) a resolución temporal mensual y diaria en puntos no instrumentados, para unidades espaciales de nivel subsiguiente a subzona hidrográfica en la zona de interés de Ecopetrol en el Valle Medio del Magdalena.

2.2.2. Revisión de datos e información disponible

La revisión de datos e información disponible comprendió dos grupos de variables:

- Variables de entrada y salida del modelo. Se trata de series temporales históricas de variables hidroclimáticas tomadas en estaciones de la red básica del IDEAM o de técnicas de teledetección y re-análisis. Entre ellas se encuentran el caudal, la precipitación, y aquellas variables que influyen sobre la evapotranspiración (temperatura, humedad relativa, radiación solar y viento). Las series de tiempo de temperatura y precipitación fueron distribuidas espacialmente de tal forma que el modelo se alimentó de mapas distribuidos a escala diaria.
- Información fisiográfica: Se trata de mapas que sirven para la estimación de propiedades físicas de la cuenca las cuales constituyen los parámetros del modelo. En esta información se tiene la topografía, las coberturas de la tierra, los suelos y la geología.

2.2.2.1. Variables hidroclimáticas

Se consideran las variables climáticas con posibilidad de usarse en modelación hidrológica. De tal forma se compilaron y analizaron las variables: caudales, precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación o brillo solar y velocidad del viento.

Una vez revisada las series de tiempo disponibles en estaciones de la red básica del IDEAM, y considerando el análisis de calidad de datos, se decide no considerar series temporales de variables climáticas requeridas para el cálculo de la evapotranspiración (ET) tales como velocidad del viento, radiación o brillo solar y humedad relativa. La alternativa adoptada para la estimación de la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración fue usar la formulación de Penman-Monteith y recurrir a datos de reanálisis meteorológicos específicamente al CFSR de la NOAA (Saha y otros, 2010)(lo anterior se decidió con base en experimentos realizados con otras formulaciones para la ET). Una descripción más detallada de que es un reanálisis se puede encontrar en Baatz, R y otros (2021).

Las series de tiempo de precipitación y temperatura, tomadas en estaciones de la red básica del IDEAM, se deben espacializar en celdas regulares de tal forma que las entradas al modelo consideren la variabilidad espacial.

La localización exacta de los centros celdas puede verse en Figura 2.5. La malla tiene una resolución de 1 km por 1 km (19266 celdas), que garantiza una discretización suficiente para que pueda ser intersectada de manera acorde con subcuencas o con los procesos hidrológicos que ocurren en el terreno; además, esta resolución garantiza que la estimación climatológica no tenga grandes variaciones al interior de cada celda.

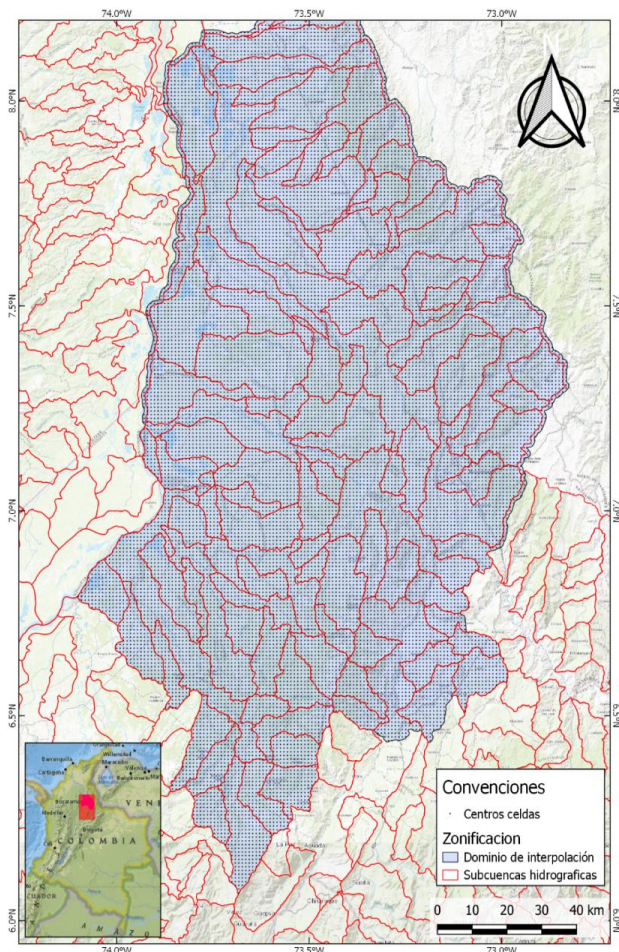


Figura 2.5 Celdas y dominio de interpolación

La distribución espacial de la precipitación se estimó inicialmente con el método IDW pero después en la refinación se cambio al método de mezcla de datos satelitales y estaciones en tierra RFMEP (Baez-Villanueva, y otros, 2020); se usaron los datos de CHIRPS y las estaciones pluviométricas disponibles (García Echeverri, 2021)(Duque Gardeazábal, 2022). La temperatura se distribuye espacialmente a partir de una regresión de esta en función de la altura con el uso de IDW para la interpolación de los residuales y estimando el error por el método de validación cruzada.

2.2.2.2. Información fisiográfica

Las características del terreno influyen sobre la posibilidad de que la precipitación termine infiltrándose o generando escorrentía superficial. Para definir esas características se detalla en esta sección las fuentes de información fisiográfica que están disponibles para la zona de estudio y que se consideraran para incluirlas en la modelación. Con esto se identifican los fenómenos hidrológicos predominantes y se plantea el modelo conceptual específico de la región.

Topografía

La topografía puede ser eficientemente representada a través de los modelos de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés); por esto, se constituyen en un insumo elemental para la realización de estudios hidrológicos pues a través de estos es posible realizar la caracterización fisiográfica de las cuencas e identificar posibles factores que influyen en la generación de la escorrentía. Para las SZH de interés se cuenta con cubrimiento de los siguientes DEM:

- DEM NASA SRTM con resolución de 30 metros.
- DEM HydroSHEDS con resolución de 90 metros corregido para su uso en hidrología.
- DEM ALOS PALSAR con resolución de 12.5 metros.
- DEM ASTER GDEM V3 con resolución de 30 metros

La versión 3 del ASTER GDEM agregó “stereo-pairs” adicionales mejorando la cobertura y reduciendo la aparición de “artifacts”. El algoritmo de producción refinado proporciona una resolución espacial mejorada con mayor precisión horizontal y vertical. Con base en lo anterior se consideró trabajar con este DEM como insumo para delimitación hidrográfica y derivar las variables topográficas dependientes del DEM (por ejemplo, la pendiente) para la modelación hidrológica requerida. En la Figura 2.6 se presenta el DEM de 30 metros en conjunto con la hidrografía de la zona de interés.

Además de los modelos de elevación digital, en la zona de interés se cuenta con cubrimiento total de la cartografía 1:100,000 del IGAC y cubrimiento parcial de la cartografía 1:25,000 también del IGAC. Este insumo es importante puesto que la información hidrográfica que contiene permite la verificación de los cuerpos de agua existentes al interior de cada una de las SZH y en el nivel subsiguiente a SZH.

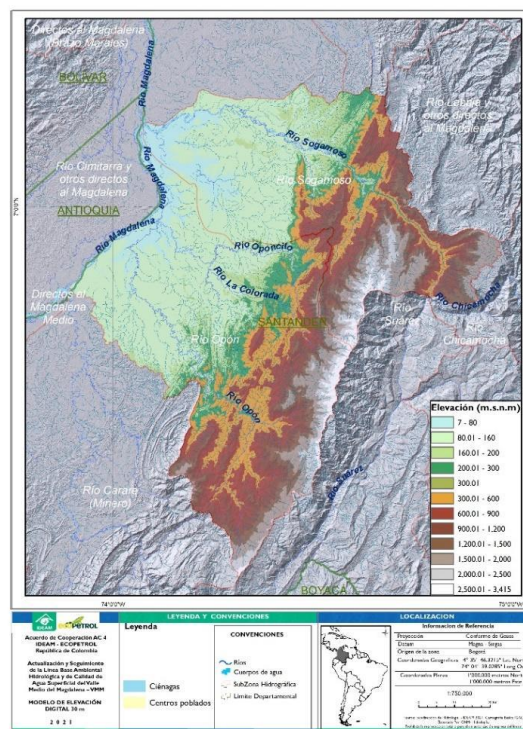


Figura 2.6 Elevación a partir del DEM SRTM

Coberturas de la tierra

Debido a que la primera interacción que tiene el agua precipitada desde la atmosfera es con las coberturas terrestres, se hace imperativo considerarlas. Dependiendo de la vegetación el agua puede acumularse en su dosel antes de caer al suelo, o por el contrario puede no haber nada sobre el suelo y este se encuentre desnudo. La clasificación de los diferentes tipos de coberturas puede hacerse en muchos niveles; se debe resaltar la metodología Corine Land Cover (CLC) que fue adaptada para Colombia por el IDEAM (IDEAM, 2008). La subdivisión en varios niveles permite tener en cuenta las variaciones de la respuesta hidrológica.

Específicamente, la metodología CLC hace una subdivisión en 5 niveles. Empieza por: los “territorios artificializados”, los “territorios agrícolas”, los “bosques y áreas seminaturales”, las “áreas húmedas”, y por último las “superficies de agua”. La subdivisión continua hasta un tercer nivel donde se detallan por ejemplo cultivos específicos como café, caña de azúcar, etc.

Para el país, el IDEAM ha realizado la clasificación del territorio en tres periodos, 2000-2002, 2005-2009 y 2010-2012. El instituto SINCHI tiene coberturas y sus cambios para los años 2002, 2007, 2012, 2014 y 2016. Se está trabajando por parte del IDEAM en generar coberturas para todo el territorio colombiano en un periodo más actualizado.

La muestra la distribución espacial de las coberturas de la tierra en el período 2000 - 2002. Se evidencia la presencia de coberturas naturales, ecosistemas mixtos como agroecosistemas, y coberturas completamente antrópicas.

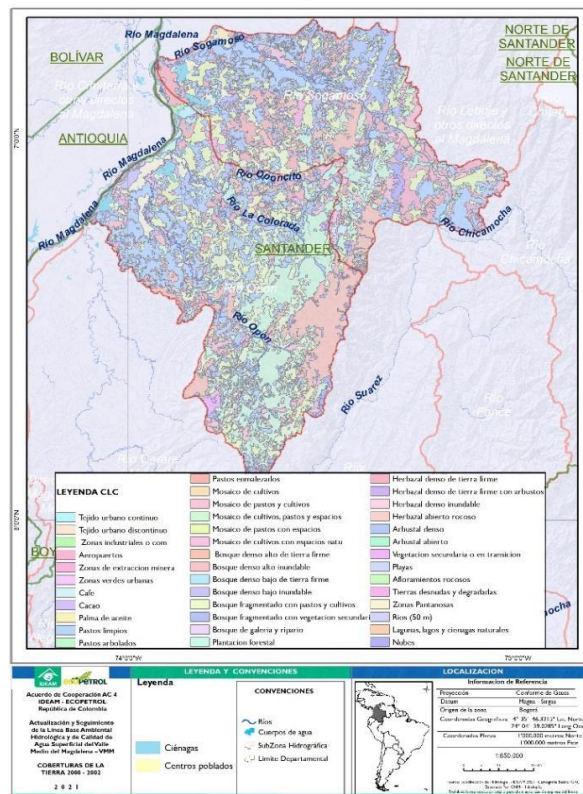


Figura 2.7 Coberturas del suelo en clasificación CLC para el periodo 2000-2002

Suelos y geología

Las unidades cartográficas de suelo representan la heterogeneidad espacial que tienen los suelos, y dentro de ellas se encuentran descritos varios perfiles que comparten características. Esas propiedades influyen sobre el flujo y almacenamiento de agua y por tanto sobre la respuesta

hidrológica; por ejemplo, los suelos arcillosos tienen poca capacidad para dejar fluir el agua, pero tienen una alta capacidad para almacenarla y por el contrario las arenas tienen una capacidad alta para dejar fluir el agua y una capacidad baja de almacenamiento. En consecuencia, la ubicación de las unidades cartográficas de suelo puede usarse para crear unidades de respuesta hidrológica.

Específicamente para Colombia el responsable por almacenar la información de suelos oficial es el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Principalmente el IGAC tiene a disposición los estudios de suelos departamentales que en muchos casos tienen mediciones de las propiedades físico-químicas de cada capa de los perfiles de suelos. Existen estudios de suelos más detallados, pero solo para lugares específicos del país. La información que se encuentra en los estudios de suelos a veces corresponde exactamente a la requerida por la conceptualización matemática de los modelos hidrológicos; no obstante, a veces se requieren hacer reclasificación de la información contenida en los estudios de suelos para encontrar los datos requeridos para la modelación. Existen metodologías acordes para realizar estos procedimientos (Saxton & Rawls, 2006), y en consecuencia no es una limitante para el desarrollo de los ejercicios de modelación.

2.2.3. Definición de las escalas características

Se conoce como escala característica de un proceso a la duración y extensión determinada con la que los procesos físicos en hidrología ocurren en el medio natural. Adicional a la escala característica de los procesos existen la escala en la que los procesos son medidos u observados (por el hombre) y la escala a la que estos procesos son simulados matemáticamente por un modelador (Bloschl & Sivapalan, 2006).

Los procesos hidrológicos suceden en un vasto rango de escalas temporales y espaciales pues estos pueden ocurrir desde minutos hasta años y en escalas desde locales hasta regionales. La Figura 2.8 basada en mediciones y consideraciones heurísticas, muestra la relación entre la escala espacial y temporal de la mayoría de los procesos hidrológicos. Allí se puede evidenciar como procesos superficiales como la escorrentía por exceso de saturación o por baja infiltración ocurren en menos de un día, mientras que los procesos subsuperficiales que ocurren en las capas de suelo pueden tomar de meses a años.

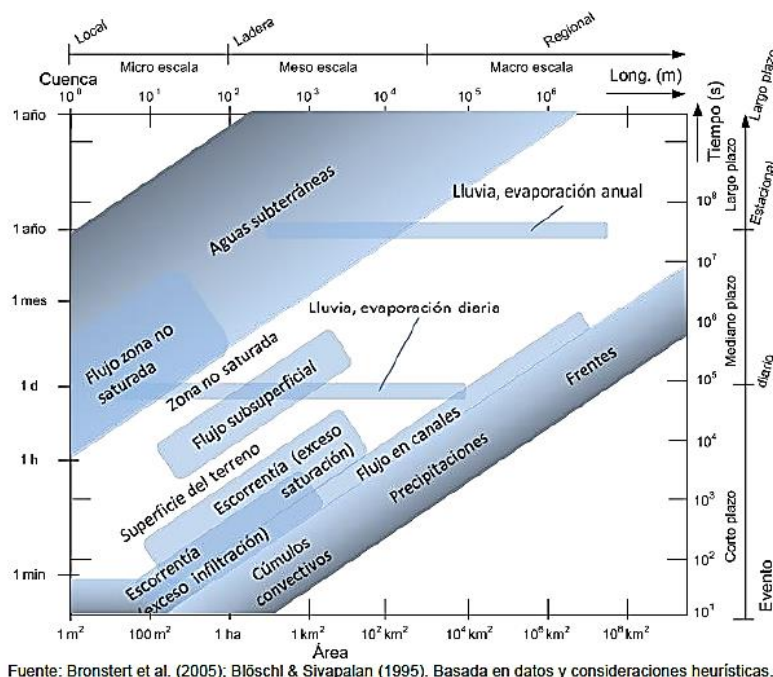


Figura 2.8 Escalas características de los procesos hidrológicos. Fuente: Tomado de Rojas, J (2011).

Varias son las condiciones que determinan los mecanismos por los que se genera la escorrentía superficial, las más determinantes son la fisiografía (pendiente del terreno), la cobertura y las características climáticas de la región. En el trópico, existen condiciones climáticas como el doble paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) (Poveda et al., 2006) y el ENSO que hacen que se presenten gran cantidad de lluvias, lo que genera que en periodos específicos del año los suelos se encuentren saturados o cerca a la saturación facilitando la ocurrencia de los procesos de escorrentía superficial por saturación y la escorrentía subsuperficial producto del drenaje del agua almacenada en el suelo. Estos dos procesos como se aprecia en la Figura 2.8 ocurren en la escala temporal diaria o subdiaria. Por lo que con aplicativos de modelación a escala diaria se puede tener en cuenta estos fenómenos y una representación acertada de los mismos.

Particularmente para la modelación hidrológica en la zona de estudio, en los cuales es necesario simular los procesos de escorrentía superficial por saturación y la escorrentía subsuperficial y considerando los objetivos de la modelación (estimación de la oferta) se hace necesario considerar una escala temporal diaria.

2.2.4. Análisis de calidad de los datos e información

Además de efectuar un análisis de calidad de los datos e información, se efectuaron algunos procesos tendientes a la espacialización de variables climáticas y fisiográficas los cuales se detallan en los documentos anexos de estimación de oferta. A continuación, se reseñan las estaciones disponibles y utilizadas en la modelación de las variables precipitación y caudal, siendo las variables más importantes para la modelación.

En la Tabla 2.1 se listan las estaciones con datos disponibles de caudal en la subzona hidrográfica del río Lebrija.

Tabla 2.1 Estaciones de caudal con series disponibles en la subzona hidrográfica del río Lebrija

Código	Nombre	Corriente	% Faltantes [1980-2019]	Cantidad Datos (años)	Pruebas	
					t	F
23187040	Chocoa la [23187040]	Quebrada Stos Gutierrez	60.8	19.3	0.45	0.00
23187060	Vijagual [23187060]	Magdalena	100.0	3.8	0.08	0.56
23187110	Coquera la [23187110]	Magdalena	96.0	3.9	0.03	0.42
23187140	Establo el [23187140]	Canal Principal	61.0	16.9	0.06	0.00
23187240	Tamarindo [23187240]	Canal D1	71.1	11.6	0.37	0.91
23187250	Porvenir [23187250]	Canal D1	65.9	13.6	0.78	0.27
23187280	Sitio nuevo [23187280]	Magdalena	15.5	34.7	0.32	0.34
23187290	Retirada la [23187290]	Canal Principal	62.6	14.9	0.00	0.01
23187300	Topacio el [23187300]	Canal Principal	62.9	14.8	0.87	0.02
23197030	Urbina la [23197030]	Lebrija	100.0	5.4	0.20	0.01
23197090	San Alberto [23197090]	Magdalena	100.0	0.9	0.54	0.21
23197100	Carrizal puente tona [23197100]	Quebrada Tona	95.4	7.5	0.03	0.00
23197130	Puente sardinas - aut [23197130]	Santa Cruz	8.6	47.5	0.00	0.00
23197270	Puente panega [23197270]	Vetas	33.2	35.4	0.68	0.01
23197280	Pradera [23197280]	Quebrada Guaduas	88.1	4.8	0.71	0.45
23197290	Cafe madrid [23197290]	Lebrija	24.6	41.1	0.00	0.00
23197320	Espino el [23197320]	Surata	100.0	8.5	0.09	0.02
23197360	Veinte de julio [23197360]	Cachira	78.0	14.1	0.00	0.35
23197370	San Rafael [23197370]	Lebrija	9.1	47.1	0.64	0.22
23197400	Angosturas [23197400]	Lebrija	63.9	21.2	0.02	0.00
23197410	Hoyo el [23197410]	San Alberto	18.1	36.9	0.02	0.33

23197460	Esperanza la [23197460]	Frio	42.1	24.8	0.69	0.42
23197680	Colombia [23197680]	Surata	84.5	6.2	0.98	0.88
23197690	Palogordo - aut [23197690]	De Oro	66.4	13.5	0.01	0.00
23197700	Majadas - aut [23197700]	Surata	57.2	17.1	0.23	0.06
23207040	San Pablo Rio Magdalena - Aut [23207040]	Magdalena	68.2	14.9	0.79	0.04

En la SZH del río Lebrija se descartaron 11 estaciones por no pasar las pruebas de homogeneidad o por no contar con suficiente cantidad de datos en el periodo 1980-2019. Las estaciones consolidadas para su uso en la SZH del río Lebrija se listan en la Tabla 2.2 y su ubicación puede verse en la Figura 2.9.

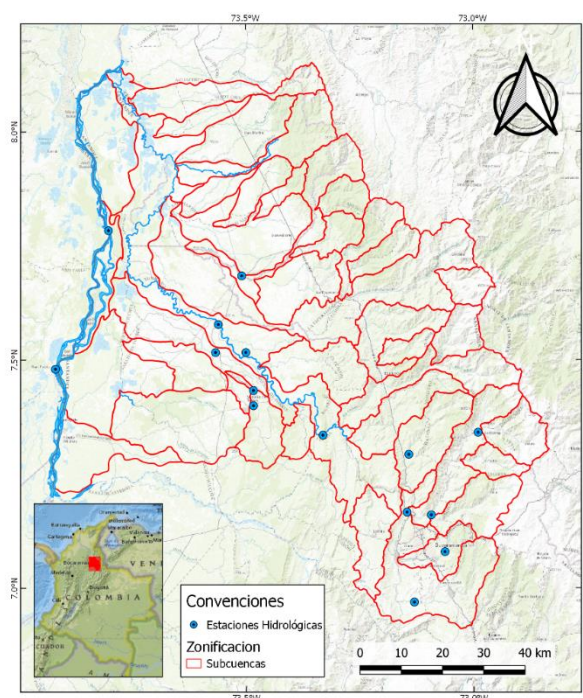


Figura 2.9 Posición de las estaciones de caudal en la SZH del río Lebrija

Tabla 2.2 Estaciones escogidas para ser asimiladas en la modelación hidrológica en la SZH del río Lebrija

Código	Nombre	Corriente	Área de drenaje[km ²]	% Faltantes [1980-2019]	Cantidad Datos (años)
23187040	CHOCOA LA	Quebrada Stos Gutierrez	100.7	60.8	19.3
23187140	ESTABLO EL	Canal Principal	135.2	61	16.9

23187240	TAMARINDO	Canal D1	48.5	71.1	11.6
23187280	SITIO NUEVO	Magdalena	118650.8	15.5	34.7
23187300	TOPACIO EL	Canal Principal	-	62.9	14.8
23197130	PUENTE SARDINAS - AUT	Santa Cruz	124.8	8.6	47.5
23197270	PUENTE PANEGA	Vetas	159.6	33.2	35.4
23197290	CAFE MADRID	Lebrija	1267.5	24.6	41.1
23197370	SAN RAFAEL	Lebrija	3483.5	9.1	47.1
23197400	ANGOSTURAS	Lebrija	2891.3	63.9	21.2
23197410	HOYO EL	San Alberto	654.8	18.1	36.9
23197460	ESPERANZA LA	Frio	40.5	42.1	24.8
23197690	PALOGORDO – AUT	De Oro	224.5	66.4	13.5
23197700	MAJADAS - AUT	Surata	473.8	57.2	17.1
23207040	SAN PABLO RIO MAGDALENA - AUT	Magdalena	118043.7	68.2	14.9

La totalidad de las estaciones hidrológicas con registros de caudal en las subzonas del río Chicamocha, Fonce, Opón; Sogamoso y Suarez, útiles para la caracterización hidrológica de los cuerpos de agua se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Estaciones hidrológicas en la zona de interés

SZH	Código	Nombre	Estado	Categoría	Tecnología	Corriente
Río Chicamocha	24037360	El Jordán	Activa	Limnimétrica	Convencional	Chicamocha
Río Fonce	24027010	San Gil	Activa	Limnimétrica	Convencional	Fonce
Río Opón	23147040	Ayacucho - Aut	Activa	Limnimétrica	Automática con Telemetría	La Colorada
	23147020	Puente Ferrocarril	Activa	Limnigráfica	Convencional	Opón
Río Sogamoso	24067020	Puente Sogamoso - Aut	Activa	Limnimétrica	Automática con Telemetría	Sogamoso
	24067010	Tablazo El	Suspensiva	Limnigráfica	Convencional	Sogamoso

SZH	Código	Nombre	Estado	Categoría	Tecnología	Corriente
	24057050	Puente Comuna	Suspendida			Chucurí
Río Suarez	24017640	La Ceiba - Aut	Activa	Limnigráfica	Automática con Telemetría	Suarez

En la Figura 2.10 se presenta la localización de las estaciones hidrológicas seleccionadas para la caracterización y modelación hidrológica en las subzonas del río Chicamocha, Fonce, Opón; Sogamoso y Suarez.

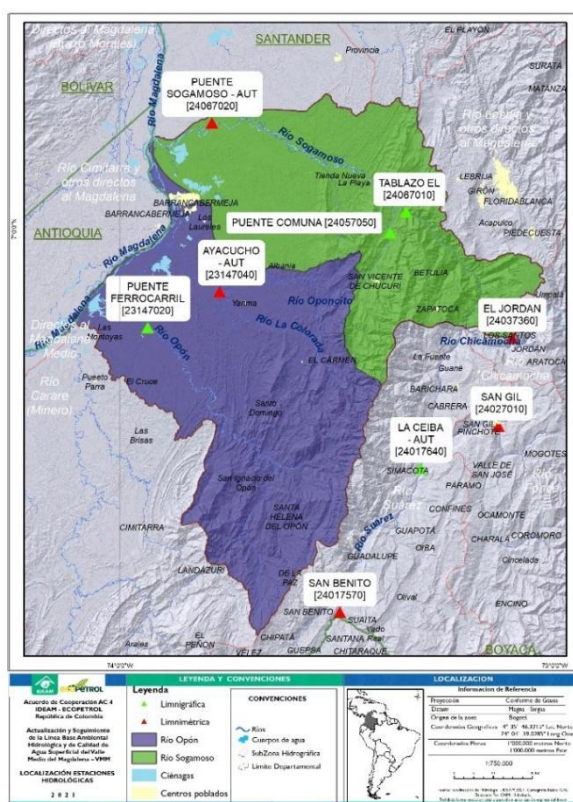


Figura 2.10 Localización de estaciones hidrométricas de interés

En la Figura 2.10 se puede apreciar la baja densidad de estaciones en las SZH de los ríos Sogamoso y Opón, las estaciones suspendidas sobre el río Sogamoso se usaron para caracterizar el régimen

natural de caudales previa a la construcción del embalse de la hidroeléctrica del río Sogamoso en el año 2014. Cabe resaltar que las estaciones hidrológicas de los ríos Fonce, Suarez y Chicamocha se contemplaron, pues son útiles para la determinación de los flujos de entrada a la SZH del río Sogamoso en la cual se proyecta estimar la oferta hídrica superficial.

En cuanto a las series de precipitación, la subdirección de meteorología del IDEAM consolidó la base datos “DHIME ASEGURADA” (Téllez Guío, 2020), la cual consiste en series de tiempo de precipitación de múltiples estaciones con cobertura nacional. Estas series de precipitación fueron sometidas a un análisis de calidad el cual consistió en tres etapas: Análisis de datos anómalos usando pruebas de rango fijo, pruebas de rango variable, pruebas de consistencia entre variables y pruebas de continuidad temporal; la segunda etapa consistió en la homogenización de las series mediante el uso del paquete CLIMATOL; En la tercera etapa las series fueron complementadas para los periodos homogéneos aplicando la metodología del inverso de la distancia ponderado (IDW).

En la revisión de las series de precipitación contenidas en la base de datos (BD) se identificó que en las etapas dos y tres de la metodología usada para la construcción de la BD, se generaron múltiples datos por día en una misma estación, esto según los periodos homogéneos en las series o por cambios en la tecnología de los sensores de medición. Esta condición no es deseable desde el punto de vista de modelación hidrológica. Por ende, se decidió utilizar las series de datos resultado de la primera etapa del análisis de calidad de la información, estos datos corresponden a los validados como correctos posterior al análisis de datos anómalos.

Bajo las condiciones anteriormente descritas, para la totalidad de la zona de interés (SZH río Sogamoso, río Opón y río Lebrija) se contó con 127 estaciones. Se resalta que el periodo elegido para el análisis de las variables hidroclimatológicas fue el comprendido entre 1980 y 2019, puesto que los registros posteriores al año 1980 son los que presentan menor cantidad de datos faltantes a resolución temporal diaria. La localización de las estaciones es presentada en la Figura 2.11. Se recuerda que estas series de estaciones pluviométricas se combinaron con los datos satelitales de CHIRPS (Funk y otros, 2015) usando el algoritmo RFMEP (Baez-Villanueva, 2020) para crear un mejor producto de precipitación a usar en los *modelos refinados*.

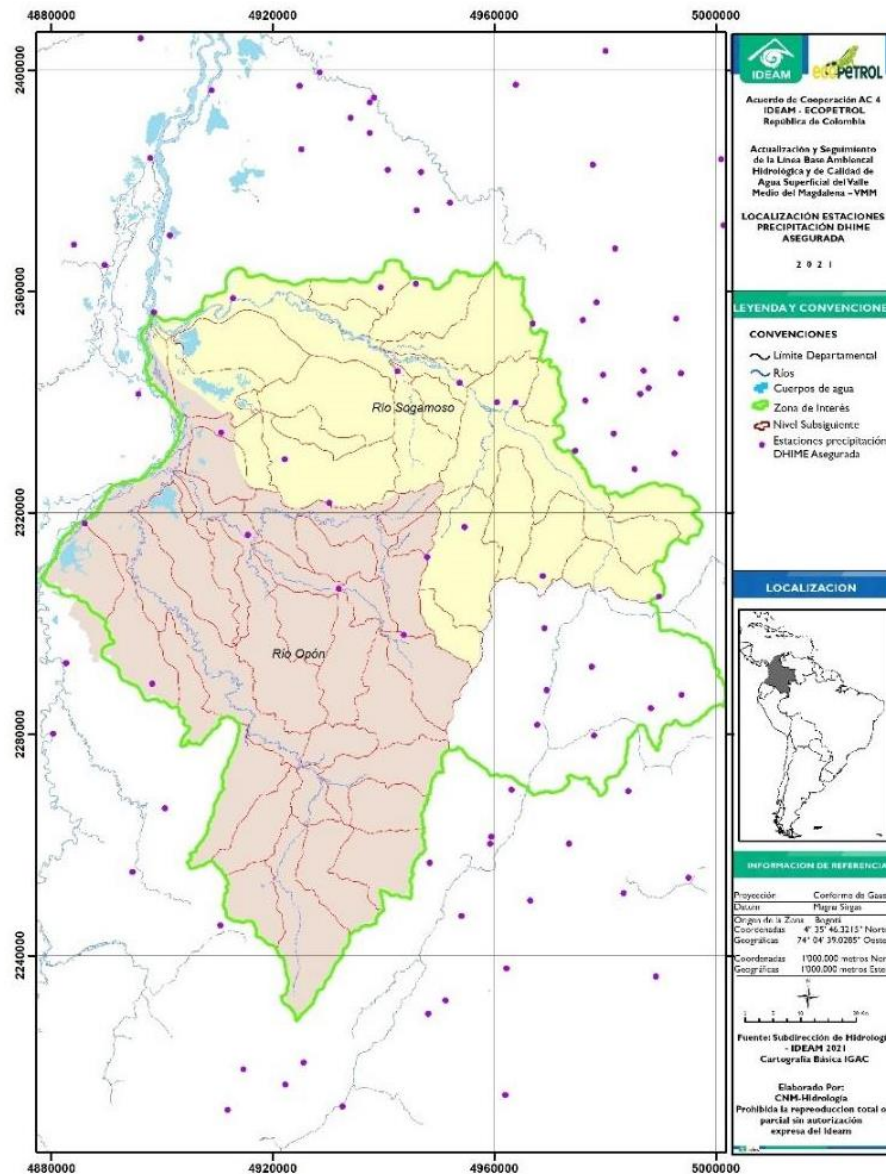


Figura 2.11 Localización de estaciones precipitación BD DHIME asegurada

2.2.5. Construcción del modelo conceptual

A partir del objetivo de la modelación, los datos y la información disponible para cada una de las SZH en estudio se construyó las conceptualizaciones de los modelos de estimación de la oferta hídrica en las SZH de los ríos Lebrija, Opón y Sogamoso. A continuación, se detalla los criterios

generales y específicos a contemplar en la etapa de la selección del modelo para cumplir con el objetivo de la modelación.

Debido a que se espera estimar la oferta hídrica diaria el modelo a seleccionar debe contemplar a lo menos los siguientes procesos físicos:

1. Flujo superficial por baja infiltración
2. Flujo superficial por saturación
3. Flujo subsuperficial de tormenta
4. Flujo en canales (transito)
5. Precipitación
6. Evapotranspiración
7. Flujo no saturado.

Por otra parte, con base en el análisis de las coberturas de la tierra y las unidades agrologicas de suelos, el modelo a seleccionar debe ser de carácter semidistribuido o distribuido, esto debido a que se observó una significativa heterogeneidad y discontinuidad de estas características, lo que es determinante en el modelamiento de procesos hidrológicos. Adicionalmente, se requería obtener resultados en distintos puntos al interior de las SZH, lo que implica contemplar la variación espacial de los fenómenos en la estructura del modelo.

La posibilidad de regionalizar y agrupar comportamientos hidrológicos también fue importante en la escogencia del aplicativo, puesto que la conformación de unidades de respuesta hidrológica ayuda a que los requerimientos y gastos computacionales se disminuyan significativamente, esto sin perder los patrones espaciales de las variables analizadas.

Finalmente, la zona de estudio se encuentra en el trópico lo que impone unas condiciones climatológicas diferentes a las de otras regiones del planeta, por lo que es necesario que el aplicativo haya sido implementado de manera satisfactoria en regiones con condiciones similares a las de la zona de interés.

2.2.5.1 Criterios específicos SZH río Opón

Como condiciones iniciales en la SZH del río Opón se considera las 13 cuencas de nivel subsiguiente establecidas y los puntos de fuga asociados a cada una de ellas para la extracción de información de esorrentía y caudal.

Existen dos estaciones hidrométricas al interior de la SZH en las cuales se calibra el modelo, por lo que el aplicativo seleccionada debe permitir la calibración con caudales simultánea o escalonadamente en más de una estación. Los puntos para la calibración son:

1. Sobre el río Opón la estación limnigráfica Puente Ferrocarril con código 23147020 con periodo de registro diario 1980 – 2020.
2. Sobre el río La Colorada la estación limnimétrica Ayacucho – Aut con código 23147040 con registros de caudal para el periodo 1992 – 2020.

Al no coincidir los periodos de registro en las estaciones de calibración el aplicativo a seleccionar debe permitir la asignación independiente de los periodos de calibración y validación para cada cuenca.

Por otra parte, es probable que existan cuencas de nivel subsiguiente que no sea posible calibrar con las estaciones existentes, por lo que es recomendable que el modelo permita la asignación de parámetros a subzonas no instrumentadas con base en los resultados de las subzonas que si pueden ser calibradas. En la Figura 2.12 se presenta la topología construida para la SZH del río Opón.

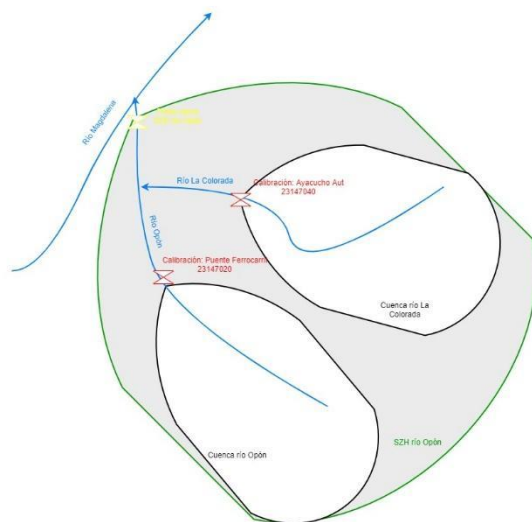


Figura 2.12 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Opón

El punto de cierre de la modelación se establece aguas abajo de la confluencia de los ríos La Colorada y el río Opón y aguas arriba de la desembocadura en el río Magdalena de modo que sea posible cuantificar la oferta hídrica superficial en la totalidad de la SZH.

En la Figura 2.12 se presenta la síntesis de los elementos a contemplar para el modelamiento de la oferta hídrica superficial en la SZH del río Opón. La zona sombreada corresponde a las cuencas de nivel subsiguiente que no es posible calibrar.

2.2.5.2. Criterios específicos SZH río Sogamoso

La SZH del río Sogamoso presenta unas particularidades que deben ser contempladas para la correcta estimación de la oferta hídrica superficial. La primera de ellas es que es una SZH establecida aguas abajo de la confluencia de los ríos Suarez y Chicamocha, por lo que las afluencias de estos ríos deben ser considerados como condiciones de entrada a la SZH en estudio. En lo que respecta al río Chicamocha, existe una estación hidrométrica muy cerca de la entrada de la SZH, lo que facilita su utilización para establecer la primera condición de entrada al modelo.

En el caso del río Suarez, la estación más cercana a la entrada de la SZH del río Sogamoso se encuentra a unos 50 kilómetros, por lo que se hace necesaria la delimitación de la cuenca comprendida entre la estación y la entrada a la SZH en estudio. Esta particularidad hace que también se deba contemplar las afluencias del río Fonce tributario del río Suarez, por lo que el aplicativo de modelación a seleccionar debe permitir la inclusión de múltiples condiciones de entrada.

Las condiciones de entrada aguas arriba de la SZH del Río Sogamoso corresponden a las series de caudales registradas en las siguientes estaciones:

1. Sobre el río Chicamocha la estación limnimétrica EL JORDAN con código 24037360 y registro para el periodo 1980 – 2020.
2. Sobre el río Suarez la estación LA CEIBA – AUT con código 24017640, con registro para el periodo 1980 – 2020.
3. Sobre el río Fonce, la estación SAN GIL con código 24027010 y registro para el periodo 1980 – 2020.

Otra particularidad de la SZH del río Sogamoso es la construcción del embalse de la hidroeléctrica del río Sogamoso para el año 2014, por lo que posterior a este año en la parte baja de la cuenca se tiene un régimen de flujo alterado por la operación del embalse. Con base en lo anteriormente descrito se propone como periodo para la calibración del modelo el comprendido entre 1980 y 2014. Posterior a el año 2014 se plantea complementar la serie “naturalizada de caudales” hasta el año 2020, bajo el supuesto de la invarianza de los parámetros estimados en el periodo de calibración. Las estaciones hidrométricas disponibles para la calibración de las cuencas de nivel subsiguiente son:

1. La estación limnimétrica PUENTE SOGAMOSO con código 24067020 localizada en la parte baja de la SZH con un periodo de registro comprendido entre los años 1992 y 2020.
2. La estación limnigráfica EL TABLAZO con código 24067010 que estuvo localizada en la zona inundada por el embalse de la hidroeléctrica, con registros en el periodo 1980 - 2010.
3. La estación limnigráfica PUENTE COMUNA con código 24057050 localizada sobre el río Chucurí la cual también fue inundada por el embalse, con registros en el periodo 1980 - 2010.

Con base en la variación de los periodos de registro de caudales es deseable que el aplicativo seleccionado permita la inclusión de los diferentes periodos.

En la Figura 2.13 se presenta el diagrama topológico de la SZH del río Sogamoso que incluye los aspectos desarrollados en el presente capítulo.

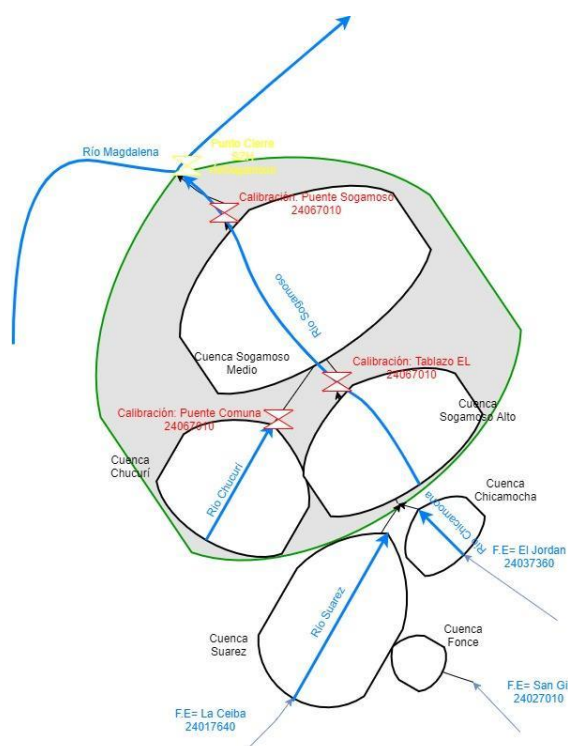


Figura 2.13 Construcción topológica del modelo de la SZH del río Sogamoso

2.2.5.3 Modelo específico para la SZH del río Lebrija

Se resalta para la SZH del río Lebrija que se debe considerar dos principales diferencias en el comportamiento hidrológico, a parte de las conexiones topológicas de direcciones de flujo. La primera, que existe una zona de pendientes muy bajas que corresponde al valle del río Magdalena, donde el aposamiento o encharcamiento del agua durante los eventos de tormenta tiene una alta posibilidad de ocurrir. La segunda, es que existen una zona de pendientes más altas, asociadas a las vertientes de la cordillera oriental, zona donde el escurrimiento del flujo sobre la superficie es alto y no existe la posibilidad de encharcamiento; por el contrario, en estas zonas la concentración del flujo de escorrentía en cauces es el principal fenómeno hidrológico posterior a la intercepción por parte de los árboles e infiltración de una fracción del agua en el suelo.

Dentro de las zonas mencionadas también existen grandes variaciones internas y por tanto la creación de HRUs con base en pendientes, coberturas y tipos de suelo debe considerarse. Estas pueden plantearse como la clasificación de los conjuntos que se forman por la combinación de las

tres capas, más las subcuencas delimitadas. Las conexiones topológicas se representan de manera general en la Figura 2.14 en conjunto con la indicación de en qué regiones se presentan fenómenos de importancia a considerar.

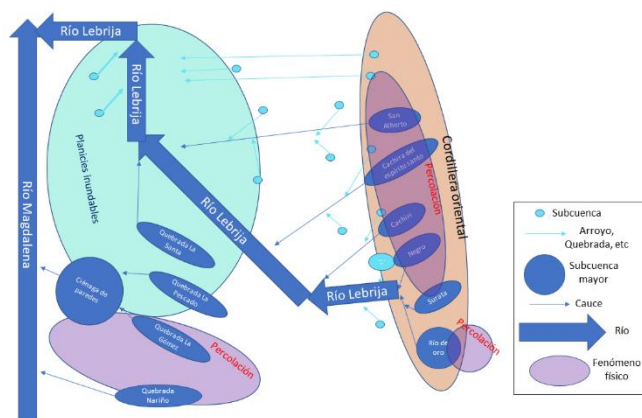


Figura 2.14 Modelo conceptual específico para la SZH del río Lebrija.

Los lugares donde se identifica el fenómeno de percolación están asociados a la cordillera oriental y los cauces al sur-occidente. Específicamente, las subcuencas donde se puede presentar una mayor percolación son:

- La Quebrada La Gómez [2319090302] completa
- Río de Oro [23190101], en la parte alta
- Río Frío [23190102], en la parte alta
- Río Tona [2319010304], en la parte alta
- Río Surata [23190103], en la parte alta incluyendo el Río Vetás [2319010302]
- Río Negro [231902], en la parte alta
- Río Salamaga [231905] completo
- La quebrada Santos [23190902]
- La quebrada Doradas [231907]
- Río Cachirí [231906] completo, incluyendo el río Romerito [23190602], la quebrada La Negra [2319060302] y el río Playón [23190603]
- La quebrada La Tigra [231908], en la parte alta

- La zona media y alta del río Río Cáchira del Espíritu Santo [231910] incluyendo el río Carcasí [2319100302], la quebrada La Carrera [23191002] y la parte alta del río San Pablo [23191003]
- La parte alta del río San Alberto [23191004], incluyendo la quebrada Playoncito [2319100402]
- La parte alta de la quebrada Torcoroma [231911]

Por otra parte, las subcuencas que tiene alta presencia de zonas inundables, que se encuentran al noroccidente y occidente principalmente, son:

- Caño Peruetano y la ciénaga de Paredes [23190903]
- Brazo La Tigera (del río Magdalena) [231916]
- La parte baja de la quebrada La Santa [231909]
- La parte norte del Río Lebrija [231903]
- La Ciénaga Guacamaya, el Roble y La Doncella [231917]
- La parte baja de la quebrada La Tisquirima [231914]

La modelación tiene como puntos de cierre todo afluente que desemboque en el río Magdalena y que se encuentre al interior de la SZH del río Lebrija.

2.2.6. Selección del modelo a emplear

Se propone la implementación de dos modelos hidrológicos con distintos alcances e hipótesis. Se propone un modelo hidrológico distribuido conocido como SWAT (Soil & Water Assessment Tool) desarrollado por la Universidad de Texas (TAMU) en los Estados Unidos (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011) y el modelo hidrológico conceptual agregado GR4J desarrollado en cuencas de Francia, (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003).

Para la implementación de los modelos hidrológicos SWAT y GR4J se aplican las fases metodológicas mostradas en la Figura 15. En la primera fase se realiza el alistamiento de la información requerida (climatología, cobertura, tipos de suelo, red de drenaje, etc.). En una segunda fase se desarrolla la implementación de la herramienta SWAT (en la interfaz con ArcGIS)

y el código desarrollado para GR4J. En la tercera fase se incluyen procesos de calibración y validación de resultados de acuerdo con el comportamiento conjunto de métricas de desempeño. Finalmente existe una etapa de modelación y postproceso que requiere el análisis de validación y sensibilidad paramétrica. Esta fase final puede conllevar la reformulación de las condiciones iniciales planteadas para cada modelo, así como la redefinición de rangos operativos de cada parámetro y procesos de recalibración. A continuación, se describen de manera resumida los modelos hidrológicos a implementar. Solo se reportan los resultados de los ejercicios con la herramienta SWAT debido a que alcanzó mejores desempeños.

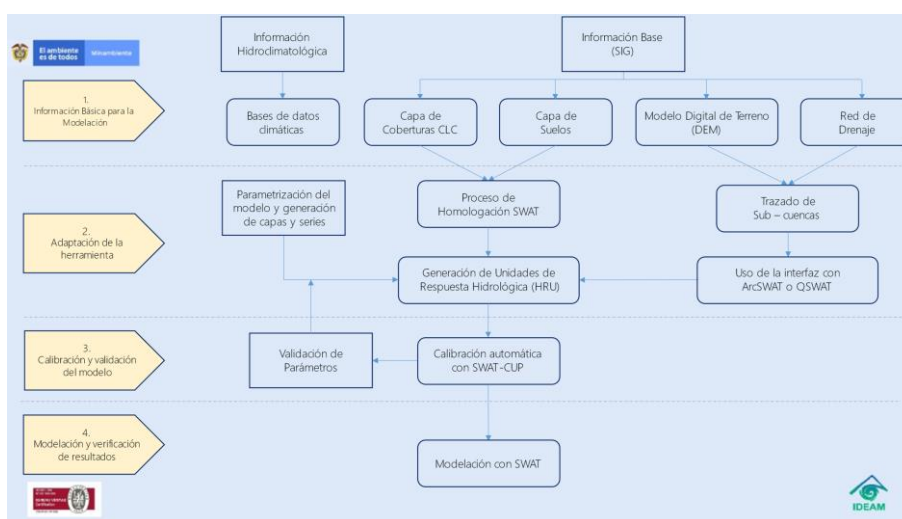


Figura 15. Pasos metodológicos para la modelación hidrológica

Herramienta SWAT

El modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool) es una herramienta hidrológica para análisis de cuencas desarrollada originalmente por el Servicio Agrícola de Investigación (ARS) para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias químicas utilizadas en la agricultura en cuencas grandes y con una complejidad de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

SWAT es un modelo de simulación continua (largo plazo) que no está estructurado para un análisis de eventos. SWAT requiere información básica del clima a escala diaria (precipitación, evapotranspiración), propiedades físicas y químicas de suelos, topografía (red de drenaje), cobertura vegetal y prácticas de manejo de la tierra en cada una de las cuencas que se requiera simular. Los procesos físicos asociados con el movimiento de agua, sedimentos y nutrientes son modelados de forma semi-distribuida por la herramienta.

Para propósitos de simulación hidrológica, la cuenca hidrográfica se divide en subcuencas. Este enfoque es muy útil cuando hay diversas áreas de la misma cuenca que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos heterogéneos que impactan directamente en la generación de escorrentía. La información de entrada para cada subcuenca es agrupada en las siguientes categorías: clima, unidades de respuesta hidrológica (HRU), humedales y zonas de almacenamiento, aguas subterráneas, canal principal de drenaje y red de drenaje, (Arnold, y otros, SWAT: model use, calibration and validation, 2012).

El principio fundamental de modelación en SWAT se basa en la definición de HRU, las cuales son áreas de tierra dentro de la subcuenca que corresponden a combinaciones de cobertura de tierra, suelo y pendiente de la cuenca. La simulación hidrológica de la cuenca suele dividirse en dos fases: La fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de tránsito, (Arnold, y otros, SWAT: model use, calibration and validation, 2012).

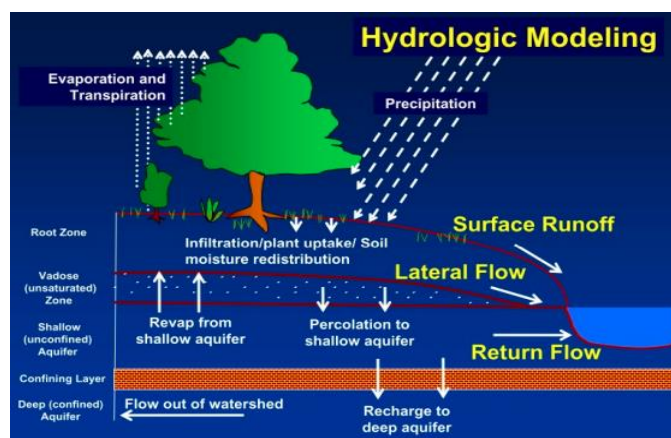


Figura 16. Representación de procesos del ciclo hidrológico en SWAT

La fase terrestre (Figura 16) controla la cantidad de agua, sedimentos, cargas nutritivas y de pesticidas que ingresan al canal principal de drenaje en cada una de las subcuencas. La fase de tránsito define el movimiento de agua y demás a través de la red de drenaje de la cuenca hidrográfica hasta el sitio de entrega.

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación de conservación de masa tomando como base el almacenamiento de agua en el suelo (Ecuación 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum (R - Q_s - E_a - W - Q_g) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial en el primer día de simulación, t es el intervalo de tiempo del modelo (días), R es la cantidad de precipitación, Q_s es la escorrentía superficial generada, E_a es la cantidad de evapotranspiración real, W es la cantidad de agua que percola en el perfil de suelo y Q_g es la cantidad de flujo de agua que retorna a la cuenca por día, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en evapotranspiración debida a las distintas condiciones de suelo y cobertura. Las escorrentías son pronosticadas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto aumenta la certeza de dar una mejor descripción física al balance de agua, (Douglas-Mankin, Srinivasan, & Arnold, 2010).

En el modelo SWAT, cuando la precipitación cae puede ser interceptada por el dosel de la vegetación o caer directamente sobre el suelo. El agua en el suelo se infiltra en el perfil del suelo o puede escurrir directamente sobre el terreno. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia los canales de drenaje y puede contribuir en el corto plazo a la generación de escorrentía en toda la cuenca. El agua en el suelo puede ser contenida y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar hacia zonas más profundas que alimenten el contenido de agua subterránea, (Figura 16).

La fase en enrutamiento en el canal principal se divide en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas agrícolas. Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión del mismo canal, Figura 16. Otra pérdida potencial

es la eliminación de agua del canal por uso (doméstico, agrícola, hidroeléctrico, etc.). El flujo puede ser suplementado directamente por la lluvia sobre el canal o adicionado de aguas que descargan sobre él. El flujo es dirigido por el canal mediante métodos de almacenamiento o enrutamiento según Muskingum, (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011).

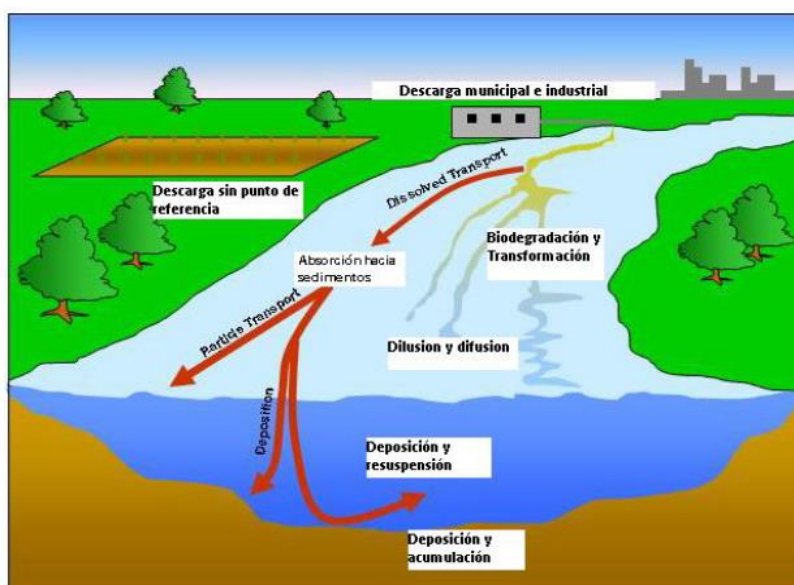


Figura 17. Representación de procesos en la fase de tránsito en SWAT. Tomado de Neitsch, et al.

Modelo GR4J

El modelo GR4J es un modelo lluvia-escorrentía agregado, de 4 parámetros y resolución diaria (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003), (Figura 18). En el modelo, la precipitación y la evapotranspiración potencial se denotan como P y E respectivamente. La precipitación es estimada según los registros de las estaciones más cercanas, empleando un método de interpolación espacial. La evapotranspiración potencial puede ser un valor promedio diario de largo plazo. Todas las cantidades (entradas, salidas, variables internas) están expresadas en unidades de longitud (mm), por tal motivo, los volúmenes de agua deben ser divididos por el área de la cuenca cuando sea necesario.

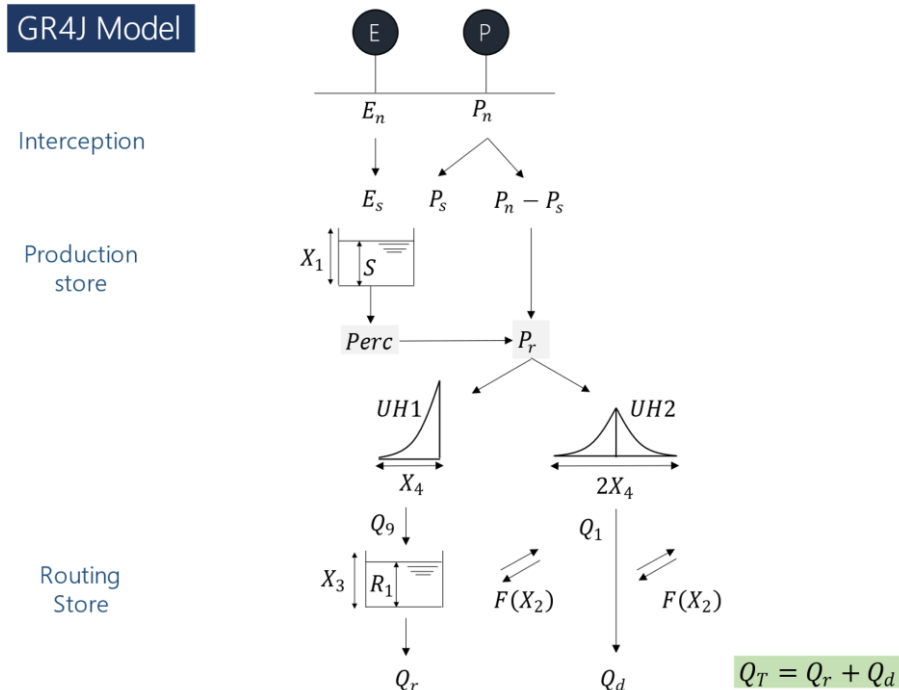


Figura 18. Esquema básico del modelo GR4J

El modelo parte del conocimiento de la cantidad de lluvia y la estimación de la evapotranspiración potencial las cuales se consideran como las entradas del modelo. Luego de ello, el modelo estima una interceptación por medio de relaciones algebraicas simples para luego llegar al primer tanque de almacenamiento que representa el contenido de humedad en el suelo. Desde este tanque se presenta el proceso de percolación y aporte directo a la escorrentía que permite, mediante la implementación de aplicación de hidrogramas unitarios UH1 y UH2, la obtención de una fracción del caudal total.

El modelo presenta un tanque de enrutamiento con un almacenamiento determinado por el parámetro X_3 . Los otros parámetros del modelo corresponden a X_1 (capacidad de almacenamiento de agua en el suelo), X_2 como un parámetro de intercambio entre el flujo subsuperficial y la escorrentía y X_4 como la amplitud de los hidrogramas unitarios. La descripción de las ecuaciones que definen los flujos puede ser consultada en las referencias citadas, (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003)

2.2.7. Selección de criterios de desempeño

Para evaluar la capacidad del modelo de representar adecuadamente los flujos y almacenamientos hidrológicos se comparan numérica y gráficamente las simulaciones y las observaciones. Se consideraron la disponibilidad de observaciones recopiladas y se estableció que la evaluación se realizaría mediante la comparación de datos de caudal.

Evaluación numérica del ajuste de parámetros

Para facilitar y evaluar de forma objetiva el resultado de la modificación de los valores de los factores de calibración de parámetros, se define una métrica que compare los caudales simulados con los observados. La métrica escogida es el coeficiente de eficiencia de Kling-Gupta (KGE) (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), debido a que les da importancia a tres componentes hidrológicos y no solo se enfoca en la diferencia entre valores simulados y observados como lo hacen otras métricas (p. Ej. El RMSE o el NSE, que han sido criticados por subestimar la varianza de las observaciones y enfocarse en los picos de caudal (Beck, y otros, 2017)). Los tres componentes que son agrupados en el KGE son:

- La correlación temporal entre las dos series a través del coeficiente de correlación (r)
- El sesgo entre las simulaciones y las observaciones ($\beta = \mu_s/\mu_o$)
- La variabilidad relativa de las simulaciones y observaciones ($\alpha = \sigma_s/\sigma_o$)

La métrica KGE es estandarizada y su valor optimo es 1:

$$KGE = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}, \beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

Donde,

r : Coeficiente de correlación de Pearson, entre la variable simulada y observada.

σ_{sim} : desviación estándar de la variable simulada.

σ_{obs} : desviación estándar de la variable observada.

μ_{sim} : media de la variable simulada.

μ_{obs} : media de la variable observada.

Esto convierte al KGE en una métrica multiobjetivo que puede ser evaluada más en detalle en la fase de validación, mejorando así el entendimiento general del desempeño del modelo y la correspondencia de los valores de los parámetros con ciertas firmas hidrológicas. Igualmente, el KGE es una métrica estandarizada y por tanto no es susceptible a ser influida por las unidades usadas en las variables comparadas.

Evaluación del desempeño general de las simulaciones

El desempeño general se evalúa tanto con métodos gráficos como con estadísticas cuantitativas o métricas, siguiendo los consejos propuestos por Moriasi, y otros (2007). Esto también se denomina por algunos autores como evaluación diagnóstica de los modelos (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009). Se analiza la correspondencia entre simulaciones y observaciones a diferentes escalas temporales (diaria y mensual predominantemente), y la correspondencia entre el porcentaje de la probabilidad de excedencia mediante la curva de duración de caudales (esta última para evaluar su posterior influencia en los Índices de Regulación Hídrica (IRH) calculados con las simulaciones en la SZH). Dentro de las métricas recomendadas (Moriasi, Gitau, Pai, & Daggupati, 2015), y seleccionadas se encuentran:

- El sesgo porcentual o P.Bias, por indicar la tendencia promedio a sobre estimar o subestimar las simulaciones, y que es otra representación de la componente β en el KGE.
- El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), por determinar la magnitud relativa entre el “ruido” y la “información” entre las simulaciones y observaciones.
- El RMSE, por dar un valor del error en las unidades en las que se está midiendo la variable.
- El coeficiente de determinación (R^2), que también se relaciona con la correlación temporal entre las simulaciones y observaciones, es decir, con el coeficiente de correlación presente en el KGE.

2.2.8. Análisis de sensibilidad

Los parámetros ensayados en el análisis de sensibilidad fueron los controladores de los flujos de agua, que en la zona de estudio corresponde a los acuíferos superficiales y los flujos en los canales. Estos se identificaron a través de una revisión de literatura asociada a la herramienta SWAT. La forma de variación de los parámetros se puede ver en la Tabla 2.4, donde se resalta que muchos de los parámetros de los acuíferos superficiales o que controlan el flujo base se les asigna un valor directamente porque en la herramienta no se le ingresan valores predefinidos con base en fisiografía.

Tabla 2.4 Tipo de ajuste realizado a los parámetros

Parámetro	Proceso hidrológico	Tipo de variación	Observación
CN2	Escurrimiento superficial	Relativa	Se enfoca en reducir los picos y aumentar la infiltración
SOL_AWC	Escurrimiento superficial	Relativa	Aumenta o reduce la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo
SOL_K	Escurrimiento superficial	Relativa	Aumenta o reduce la capacidad del suelo para dejar fluir el agua hacia otras capas y hacia los canales
SURFACE_LAG	Escurrimiento superficial	Relativa	Retrasa la ocurrencia de los picos de escurrimiento
OV_N	Escurrimiento superficial	Relativa	Retrasa la ocurrencia de los picos de escurrimiento
ALPHA_BF	Flujo base	Valor	Controla la pendiente de la curva de recesión, es decir, la velocidad con la que se libera el flujo desde el acuífero
GWREVAP	Flujo base	Valor	Coefficiente que controla el retorno por flujo capilar
GWDELAY	Flujo base	Valor	Retraso de tiempo en el flujo subterráneo
GWQMN	Flujo base	Relativa	Umbral que debe superar el agua almacenada en los acuíferos superficiales para que ocurra flujo base
REVAPMIN	Flujo base	Relativa	Umbral que debe superar el agua almacenada en los acuíferos superficiales para que ocurra el flujo capilar
RCHRGDP	Flujo base	Valor	Porcentaje de agua que pasa de la última capa de suelo al acuífero profundo
CH_N	Flujo base	Valor	Retraso en el tiempo de ocurrencia y disminución de los picos de caudal
CH_K	Flujo base	Valor	Permite la infiltración de agua desde el canal hacia los acuíferos superficiales

Se planteo realizar una evaluación de la sensibilidad paramétrica simple. Esto se realizó mediante la técnica de la variación de un parámetro a la vez y observar los cambios en las hidrógrafas en los puntos establecidos para evaluación en la cuenca.

Igualmente, se realizó la evaluación de la significancia de los coeficientes de una regresión multilíneal entre los parámetros y la función objetivo escogida ($KGE = a + \sum b_i \cdot \beta_i$, con β_i los parámetros del modelo hidrológico y a y b_i los coeficientes de la regresión). Mediante la comparación de la estadística t con el valor de la distribución t-Student, se puede determinar qué tan sensible es un parámetro y el correspondiente p-valor de esa sensibilidad. Este tipo de sensibilidad la denominan de carácter global porque permite evaluar los efectos de todos los parámetros a la vez (Abbaspour K. , 2019). Sin embargo, debido a la dificultad de realizar muchas simulaciones previas al procedimiento de calibración, se debió implementar la misma metodología que con la variación de un parámetro a la vez (20 simulaciones en paralelo de solo un parámetro). Con esto se convirtió el método en uno de sensibilidad local, pero con la posibilidad de determinar numéricamente y no solo visualmente si el desempeño del modelo es sensible a cambios en el parámetro.

Evaluación uno a la vez

A través del software SWAT-CUP, se realizaron las 20 simulaciones y las gráficas de las hidrógrafas correspondientes a la variación de cada parámetro. A manera de ejemplo se muestra en la Figura 2.19 el resultado de la variación del parámetro SOL_K en toda la cuenca.

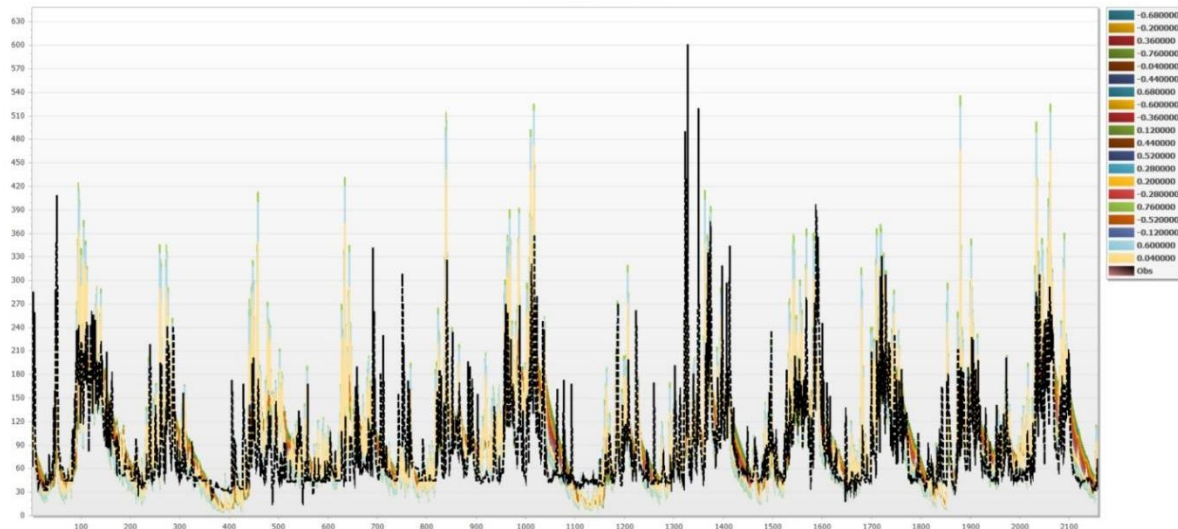


Figura 2.19 Cambios en las hidrógrafas en la estación San Rafael debido a las variaciones en el parámetro SOL_K

A partir del análisis de las figuras se puede sacar las conclusiones sobre los demás parámetros que se consignan en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Análisis de sensibilidad local de parámetros para toda la SZH

Parámetro	Proceso hidrológico	Sensibilidad local	Observación
CN2	Escorrentía superficial	Alta	Su modificación cambia radicalmente el valor de los picos de caudal y del valor de los periodos de recesión
SOL_AWC	Escorrentía superficial	Media	Al realizar un aumento del parámetro, se reducen los picos y la curva de recesión se alarga
SOL_K	Escorrentía superficial	Alta	Al realizar una reducción del parámetro, se reducen los picos y la curva de recesión se alarga
SURFACE_LAG	Escorrentía superficial	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
OV_N	Escorrentía superficial	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
ALPHA_BF	Flujo base	Media para la curva de recesión	Su aumento genera que la curva de recesión sea menos pronunciada
GWREVAP	Flujo base	Media para la curva de recesión	Su cambio incrementa o disminuye la pendiente de la curva de recesión

Parámetro	Proceso hidrológico	Sensibilidad local	Observación
GWDELAY	Flujo base	Alta para la curva de recesión	Su aumento genera que la curva de recesión sea menos empinada y que no llega a valores tan bajos
GWQMN	Flujo base	Media para la curva de recesión	Incrementa o disminuye los valores de caudal en los periodos de estiaje
REVAPMIN	Flujo base	No es apreciable	No hay una influencia significativa debido al cambio del valor del parámetro
RCHRGDP	Flujo base	Media para la curva de recesión	Aumenta o disminuye los valores del caudal en los periodos de estiaje
CH_N	Flujo base	Media para los picos de caudal	Disminuye un poco los valores de los picos de caudal
CH_K	Flujo base	Alta	Además de disminuir los picos de caudal en gran medida (incluso puede desaparecerlos), aumenta el valor del caudal en los periodos de estiaje volviendo la hidrógrafa plana en algunos periodos de tiempo

Sensibilidad con t-Student

Igualmente se obtuvieron los valores de sensibilidad con el estadístico t-Student que se resume en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores del estadístico t-Student para la sensibilidad de parámetros

Parámetro	t-stat	p-valor
CN2	-10.26	6.01E-09
SOL_AWC	0.785	0.44
SOL_K	-60.85	2.70E-22
SURFACE_LAG	0.77	0.45
OV_N	29.67	9.70E-17
ALPHA_BF	-6.17	7.96E-06
GWREVAP	78.31	2.93E-24
GWDELAY	-7.27	9.30E-07
GWQMN	29.5	1.07E-16
REVAPMIN	-3.5	2.50E-03
RCHRGDP	18.1	5.50E-13

Parámetro	t-stat	p-valor
CH_N	80.6	1.74E-24
CH_K	10.61	3.50E-09

De los anteriores valores y del análisis de sensibilidad local, se descarta entonces realizar calibración de los parámetros SURFACE_LAG, OV_N y REVAPMIN debido a que no reflejan un cambio sustancioso en los desempeños del modelo.

2.3. Resultados de la modelación hidrológica

En este numeral se presentan los resultados del modelo en las subzonas hidrográficas. Inicialmente se presentan los procesos de ajuste de parámetros, calibración y validación, posteriormente se muestran los indicadores de desempeño del modelo y se efectúa una evaluación diagnóstica de las simulaciones. Por último, se evalúan las incertidumbres del modelo.

2.3.1. Ajuste de parámetros y calibración, validación

El proceso de calibración, mediante el cual se ajusta los parámetros para el modelo implementado en una cuenca, suele ser el más demandante en tiempo y recursos tanto de conocimiento como en computación. Su complejidad dependerá del número de parámetros que posea el modelo y del rango en el cual cada uno de ellos pueda tomar valores. El proceso de calibración posee 3 elementos principales los cuales son: La información de entrada, la función objetivo y el algoritmo de calibración. En primer lugar, las variables de entrada deben revisarse tanto en su cantidad como en la calidad de la información. En segundo lugar, la función objetivo y las métricas de desempeño a través de las cuales se evaluará la respuesta del modelo con el conjunto de parámetros seleccionados. Y por último el algoritmo de calibración mediante el cual se buscará en el espacio de respuesta de la función objetivo seleccionada, el conjunto de parámetros que minimice el error de la simulación.

La mayoría de los procesos de calibración consisten en la comparación de los resultados de múltiples simulaciones con las observaciones de la respuesta de la cuenca. Los valores de los parámetros son ajustados entre las diferentes simulaciones, ya sea manualmente o mediante la

implementación de algún algoritmo de calibración, hasta que se obtiene un error aceptable en la simulación. En esta sección se presentan los ensayos realizados para ajustar los parámetros del modelo y así lograr un mejor desempeño.

2.3.1.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

Se comienza con la descripción de las calibraciones semi-manuales para identificar la zona donde el modelo presenta un buen desempeño para cada uno de los bloques planteados. Posteriormente se describe las simulaciones automáticas que se realizaron para ajustar los parámetros del modelo. En cualquiera de los dos métodos de calibración, siempre se siguió la secuencia de bloques que se indica a continuación:

1. Bloque 1 de subcuencas de alta montaña
2. Bloque 1P de las subcuencas que drenan a la estación Pte Sardinas
3. Bloque 3 de subcuencas que drenan hacia la estación Café Madrid [23197290]
4. Bloque 4 de subcuencas que drena hacia la estación San Rafael [23197370]
5. Bloque 2 de subcuencas que drenan hacia estaciones en la planicie
6. Bloque 5 de subcuencas que drenan hacia la estación El Hoyo [23197410]

Este orden escalonado garantiza que se calibren primero las subcuencas en la parte alta y que drenan hacia la parte baja. En la calibración de cada bloque se calculó la función objetivo solamente con los caudales observados en las estaciones pertenecientes a ese bloque.

Ajustes semi-manuales

Para encontrar la zona del espacio parametral donde se producen los mejores desempeños, se realizaron calibraciones semi-manuales. El muestreo de los valores de los parámetros se realizó con la técnica de Latin Hypercube que estiman la respuesta del modelo en todo el rango parametral definido.

Para la modificación del valor de los parámetros, la definición de su valor y el cambio hacia otro parámetro, se siguieron los siguientes criterios:

- Se realizan 10 simulaciones de un parámetro en un rango parametral establecido, encontrando así el probable valor que mejora el desempeño. Se fija el valor encontrado y se cambia de parámetro.
- Se realizan 10 simulaciones en paralelo con los demás parámetros seleccionados.
- Se evalúa la interacción de dos parámetros con 20 simulaciones en paralelo, modificando los límites del espacio de búsqueda para los dos parámetros en la zona cercana al valor que se ha asignado previamente.
 - Se cambian los valores de los dos parámetros por aquellos que hayan conseguido un mejor desempeño de manera conjunta
 - Se cambia la combinación de los parámetros intentando mejorar el desempeño
- Se detiene el ajuste de un conjunto de parámetro cuando se observa que el cambio de sus valores no genera un cambio significativo en la función objetivo y se cambia de bloque de subcuencas.

Análisis de las simulaciones semi-manuales

Se realizaron dos actividades de calibración semi-manual diferenciadas por la formulación usada para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP). La primera se realizó utilizando la formulación de Hargreaves (Hargreaves & Samani, 1985) y la segunda la formulación de Penman-Monteith (Chow, Maidment, & Mays, 1988). Los dos caminos de calibración se realizaron porque se encontró una influencia en la métrica del sesgo porcentual entre las simulaciones y las observaciones al variar la formulación de la ETP.

Las diferencias entre los dos métodos se analizan a través de la Tabla 2.7 y de la Figura 2.20 y Figura 2.21. Se puede ver en esta últimas que usando la formulación de Hargreaves se tienen menores caudales producto de una mayor evapotranspiración en la zona, lo cual también se refleja en los valores consignados en la tabla donde las simulaciones usando Hargreaves producen más subestimaciones en toda la cuenca dificultando así la calibración de los demás parámetros. Igualmente se resalta de la tabla que el cambio de método no produce cambios significativos en la concordancia temporal entre las simulaciones y las observaciones (esto representado a través del cálculo del coeficiente de determinación). Esto indica que tampoco hay un cambio en la varianza

de los caudales simulados, indicando así que el efecto del cambio del método de evapotranspiración solo impacta en la sobrestimación o subestimación de los caudales.

Tabla 2.7 Métricas de las simulaciones sin modificar parámetros en la SZH del río Lebrija

Método	Penman-Monteith	Hargreaves	Penman-Monteith	Hargreaves
Estación\ Métrica	% Sesgo -46.5		R ²	
El Hoyo	-5.8	-46.5	0.23	0.23
San Rafael	11.5	-35.5	0.34	0.37
Puente Sardinas	-31.6	-61.8	0.25	0.26
Puente Panega	41.1	1.1	0.31	0.31
La Chocóa	-36.5	-55.9	0.11	0.1
Tamarindo	120.2	75.5	0.11	0.1
Café Madrid	70.9	2.6	0.23	0.24
Majadas	45.5	-5.9	0.42	0.41
La Esperanza	25.2	-22.1	0.12	0.15
El Hoyo	-5.8	-46.5	0.23	0.23
San Rafael	11.5	-35.5	0.34	0.37
Puente Sardinas	-31.6	-61.8	0.25	0.26

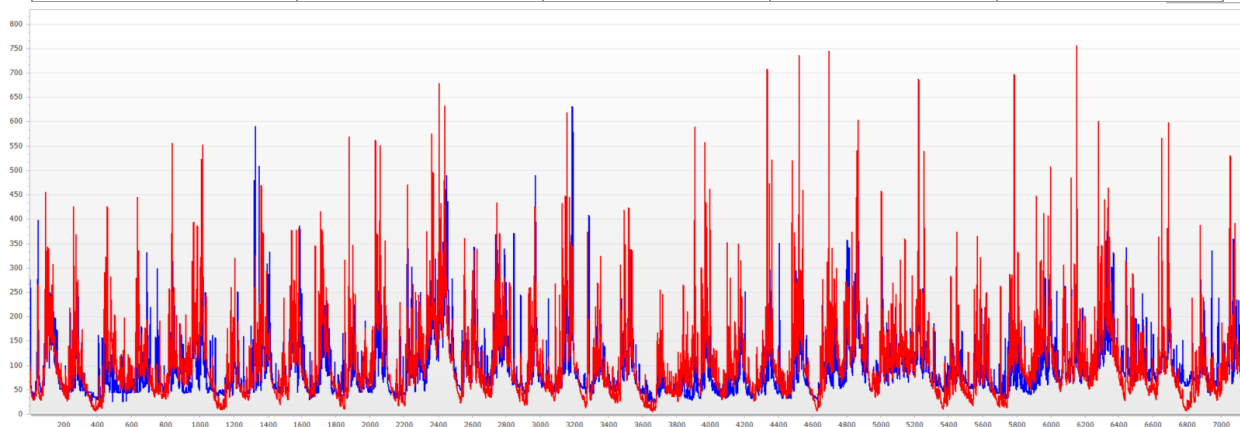


Figura 2.20 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Penman-Monteith para la ETp (parámetros sin modificar)

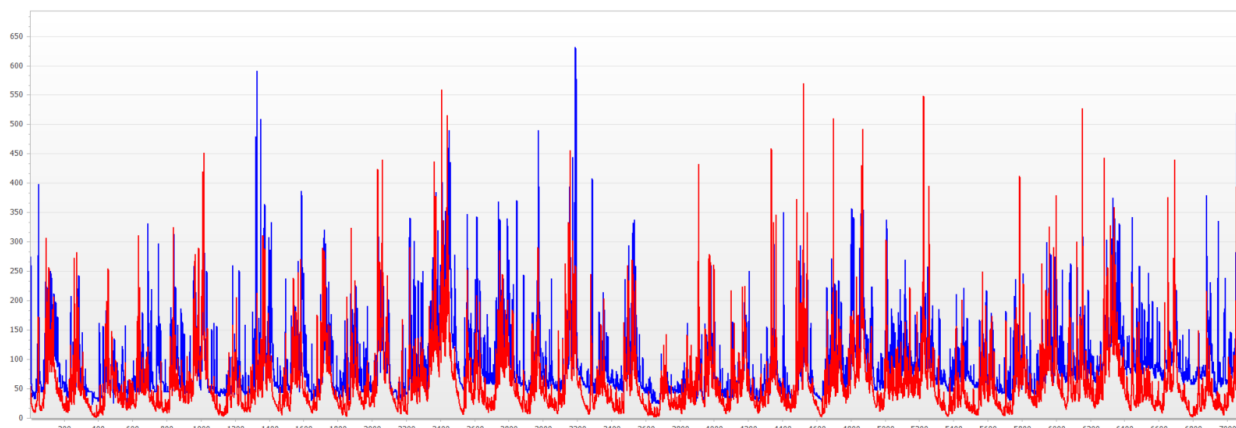


Figura 2.21 Caudales simulados en la estación San Rafael usando Hargreaves para la ETp (parámetros sin modificar)

Inicialmente se intentó modificar los parámetros utilizando la configuración del modelo que utiliza la formulación de Hargreaves a pesar de lo encontrado anteriormente. Los resultados de los parámetros evaluados se pueden ver en la Figura 2.22, donde se puede ver que se pudo mejorar un poco los desempeños en los bloques 1 y 3 (asociado a la estación Café Madrid). Sin embargo, los desempeños en los bloques 4 y 5 de las estaciones San Rafael y El Hoyo respectivamente, no superaron el desempeño obtenido con la configuración de Penman-Monteith sin realizar modificaciones a los parámetros.

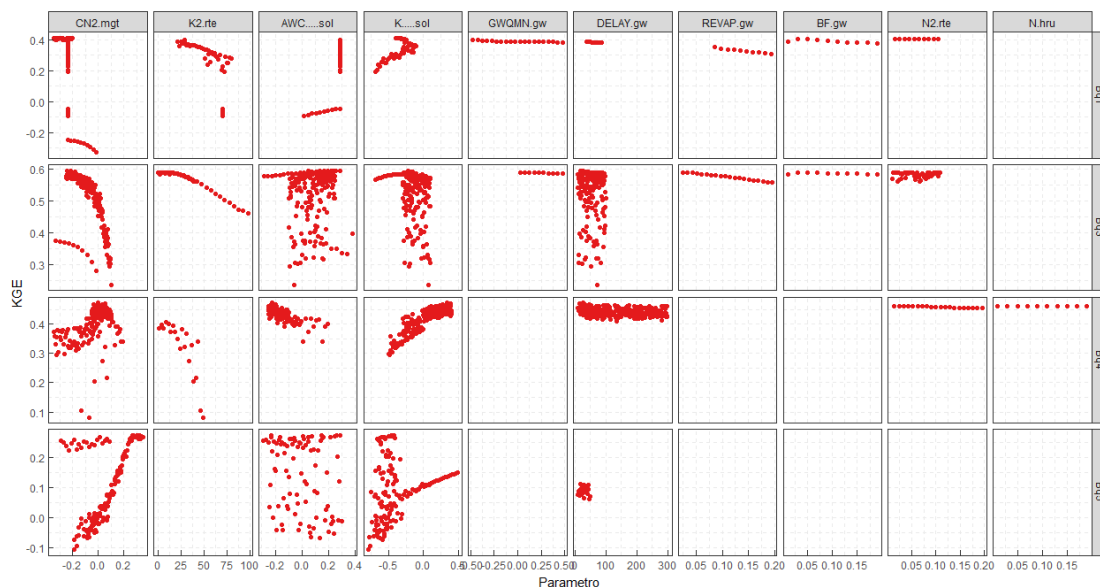


Figura 2.22 Desempeño de las simulaciones semi-manuales respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Hargreaves para ETP

La modificación de los valores paramétricos, pero usando la formulación de ETP de Penman-Monteith se puede ver en la Figura 2.23. Se logró modificar los parámetros en los bloques 1 y 3 de manera que alcanzaron un desempeño similar al obtenido con la formulación de Hargreaves. Por el contrario, en los bloques 4 y 5 se alcanzó un desempeño sustancialmente superior que con la formulación de Hargreaves. Se resalta que, al comparar los resultados iniciales de las simulaciones sin calibrar con las obtenidas al final, se tiene un gran aumento del desempeño en el bloque 3 asociado a la estación Café Madrid.

De las simulaciones realizadas se tiene como resultado un mejor desempeño en términos del KGE utilizando la formulación del Penman-Monteith. Esto es muy claro en los bloques 4 y 5 donde los valores son superiores en 50%. Para los bloques 1 y 3 se registró un desempeño muy similar al alcanzado con la formulación de Hargreaves.

Al finalizar las simulaciones semi-manuales se obtuvieron las métricas de desempeño a escala diaria reportadas en la *Tabla 2.8*, que tienen un desempeño general en términos del KGE de 0.42. Se debe resaltar que en general las simulaciones no tienen un sesgo superior al 15 % a excepción de tres estaciones.

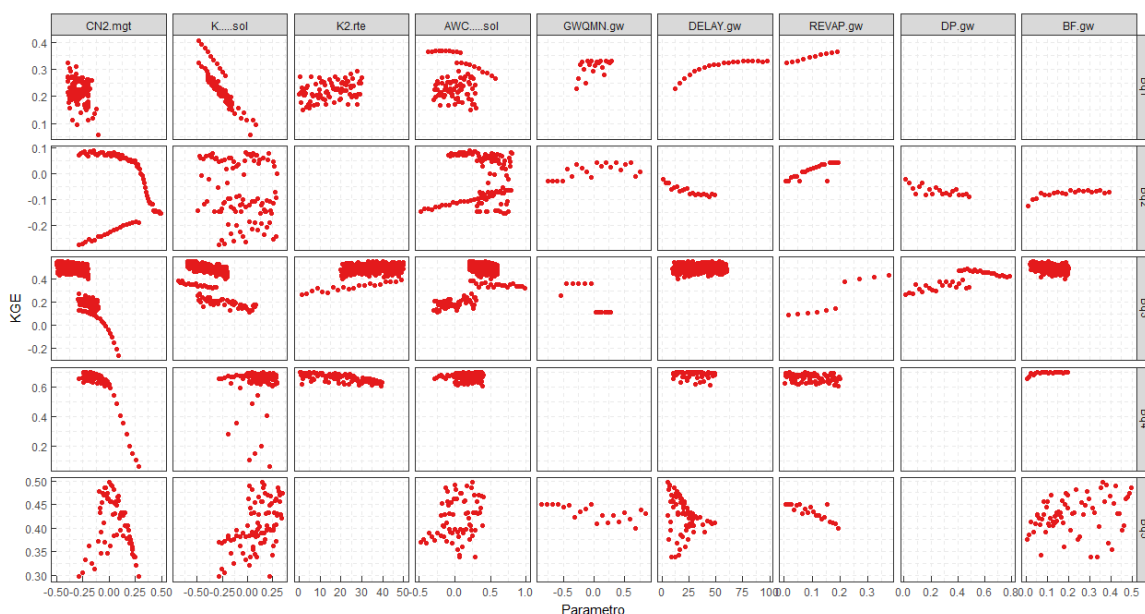


Figura 2.23 Desempeño de las simulaciones semi-manuales respecto de los parámetros evaluados usando la formulación de Penman-Monteith para ET_p

En la Figura 2.24 se puede ver la correspondencia temporal para la estación San Rafael, donde queda claro que, aunque se siguen las tendencias de las temporadas, la simulación diaria no alcanza a representar todos los picos de caudal. Se observa incluso que hay días en los que se observó un pico, pero la simulación no tuvo ninguna perturbación; esto se debe a faltantes de lluvia que no fueron registrados por las estaciones pluviométricas posiblemente porque llovió en una región donde no hay monitoreo y la interpolación no fue capaz de suplir esas falencias (Arnold, y otros, Swat: Model Use, Calibration, and Validation, 2012).

Tabla 2.8 Métricas de desempeño en las estaciones usadas para el ajuste de parámetros

Estación	R ²	NS	RMSE (m ³ /s)	PBIAS	KGE	StdDev_sim(S tdDev_obs)
El Hoyo [23197410]	0.28	0.19	18.71	6.5	0.5	17.13(20.68)
San Rafael [23197370]	0.5	0.46	45.83	1.4	0.7	57.21(62.10)
Puente Sardinas [23197130]	0.37	-0.1	2.90	40.8	0.28	1.57(2.81)
Puente Panega [23197270]	0.41	0	1.61	-9	0.54	2.04(1.61)
La Chocó [23187040]	0.22	0.09	7.21	49.2	0.09	3.40(7.54)

Estación	R ²	NS	RMSE (m ³ /s)	PBIAS	KGE	StdDev_sim(S) tdDev_obs)
Tamarindo [23187240]	0.17	-0.5	2.28	-68.1	0.09	2.17(1.89)
Café Madrid [23197290]	0.38	0.05	9.00	-22	0.56	9.84(9.22)
Majadas [23197700]	0.66	0.44	3.10	-11.9	0.68	5.12(4.15)
La Esperanza [23197460]	0.21	-0.6	0.65	-4.7	0.34	0.69(0.51)

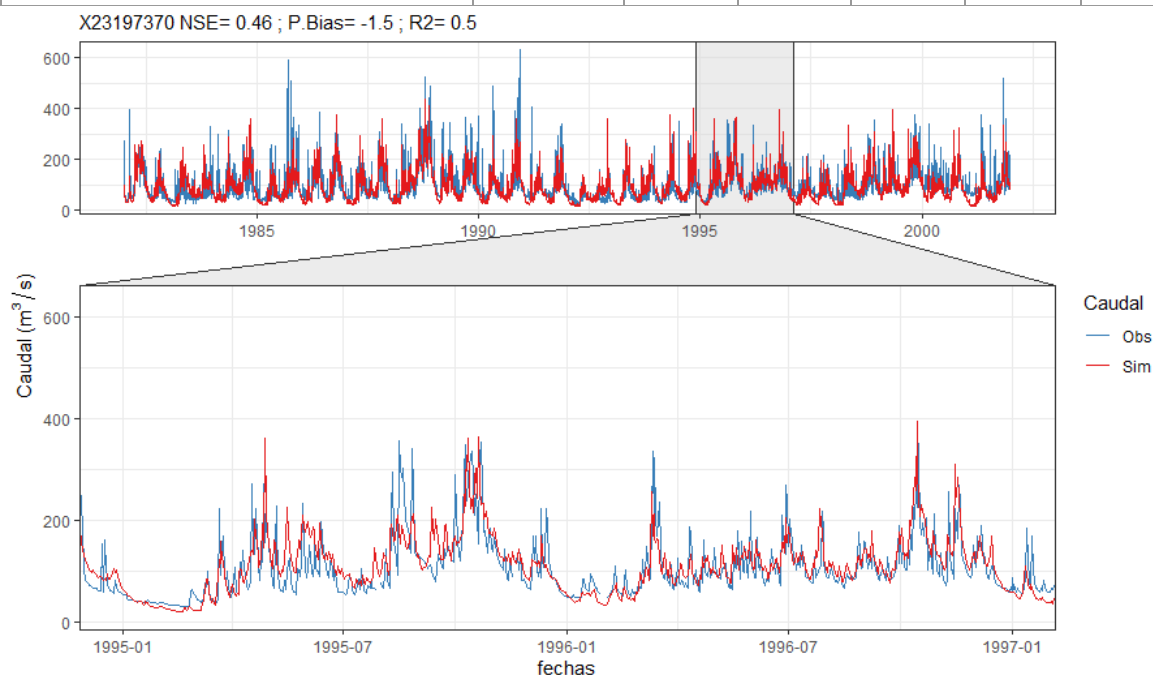


Figura 2.24 Hidrógrafa simulada con el ajuste de parámetros semi-manual en la estación San Rafael

Ajustes automáticos

Se utilizó el algoritmo PSO para refinar los valores de los parámetros y de desempeño encontrados en las búsquedas semi-manuales (Kennedy & Eberhart, 1995). Este algoritmo inicialmente requiere definir un número de partículas a muestrear. Muestra de forma aleatoria dentro del rango parametral definido y asigna una velocidad o tasa de cambio de las partículas. La velocidad de cada partícula es actualizada en cada iteración; la iteración está compuesta por la evaluación del valor de la función objetivo para todas las partículas. La actualización y direccionamiento de la velocidad de las partículas tiene en cuenta el desempeño global de todo el conjunto de partículas, guiando así la búsqueda hacia las mejores respuestas o la mejor partícula. Generalmente se define como criterio

de parada para el algoritmo, un cambio porcentual menor al 5% en el valor de la función de desempeño entre una iteración y otra.

Sin embargo, debido a que el objetivo de utilizar este algoritmo es refinar los valores de los parámetros encontrados en la calibración manual, entonces se definió un número de simulaciones límite a evaluar como criterio de parada. Igualmente, el algoritmo se usó con los **modelos refinados** para encontrar un mejor desempeño usando las nuevas entradas. En ambas fases se usó el factor de ajuste relativo de parámetros que se explicará más adelante (Frances y otros, 2012).

Para cumplir el objetivo de refinación, se definieron un número de simulaciones por iteración y un total de iteraciones no menor a 25. Lo anterior le permitió al algoritmo mejorar varias veces las respuestas inicialmente muestreadas (lo anterior se definió con base en revisión de literatura (Kennedy & Eberhart, 1995)). En cada bloque de subcuencas se especificaron rangos diferentes de muestreo, con base en los resultados de las simulaciones semi-manuales y un número diferente de simulaciones por iteración. En la Tabla 2.9, se consignan los valores de las simulaciones por iteración para cada bloque.

Tabla 2.9 Configuración de las simulaciones automáticas con el algoritmo PSO en cada bloque de subcuencas

Bloque	Sim.	Iter.	Sim. totales	Observación
Bloque 1 Montaña	60	25	1500	Se buscó que con 60 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 1 Pte. Sar.	60	25	1500	Se buscó que con 60 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 3 Café Madrid	80	30	2400	Se buscó refinar los valores encontrados en las calibraciones semi manuales
Bloque 4 San Rafael	80	30	2400	Se buscó refinar los valores encontrados en las calibraciones semi manuales
Bloque 5 El hoyo	80	30	2400	Se buscó que con 80 simulaciones se pudiera evaluar la interacción paramétrica y posteriormente ser mejorada
Bloque 2 Planicie	80	30	2400	Al conocer mejor el rango de los parámetros que mejoran un poco las simulaciones originales, solo se estableció que se hicieran 80 simulaciones por iteración

Valores definidos finalmente para los parámetros

Posterior a la refinación de los valores paramétricos con el algoritmo PSO, se fijaron los valores consignados en la Tabla 2.10. Se debe resaltar que en la mayoría de los casos los 10 mejores conjuntos de parámetros ensayados tuvieron desempeños muy parecidos debido a procesos de equifinalidad (Beven, 2012).

Tabla 2.10 Valores de los parámetros fijados para cada bloque de calibración en la SZH del río Lebrija

Bloque	CN	SOL K	AWC	Alpha Bf	GWrevap	GWQMN	GWdelay	CH_N	CH_K	Rchrg DP
1 Montaña	-0.307	-0.709	0.219	0.524	0.291	0.077	58.602	0.042	33.235	0.362
1 Montaña Pte Sardinas	-0.456	-0.037	-0.885	0.114	0.014	-0.389	23.641	0.042	21.139	0.079
2 Planicie	-0.340	-0.145	0.601	0.406	0.271	0.086	2.014	0.006	2.874	0.041
3 Café Madrid	-0.396	-0.442	-0.006	0.022	0.371	-0.025	30.077	0.096	17.793	0.082
4 San Rafael	-0.314	-0.143	0.270	0.496	0.259	-0.629	33.356	0.049	5.440	0.198
5 El Hoyo	-0.213	-0.037	-0.428	0.521	0.072	-0.482	1.992	0.031	11.398	0.035

Uno de los parámetros más influyentes, que también fue reconocido en el análisis de sensibilidad fue el CN. Su modificación en un porcentaje alto se justifica en el sentido que el valor original asignado por coberturas y suelos está sujeto a que la pendiente sea cercana al 5% (Arnold, y otros, 2012). En la mayoría de los bloques tuvo que ser reducido en un valor superior al 10%. De igual forma la conductividad hidráulica de los suelos también tuvo en algunos casos un papel importante. Esto puede verse más claramente en la Figura 2.25, que describe el aumento en la función objetivo a medida que avanzan las iteraciones del algoritmo PSO y donde se puede ver como el algoritmo va convergiendo hacia mejores valores hasta llegar a ciertos límites. Estos límites se ocasionan por la imposibilidad del modelo de representar de manera perfecta la realidad, y se manifiestan como planicies en la función objetivo debido a la equifinalidad producida por la combinación de parámetros.

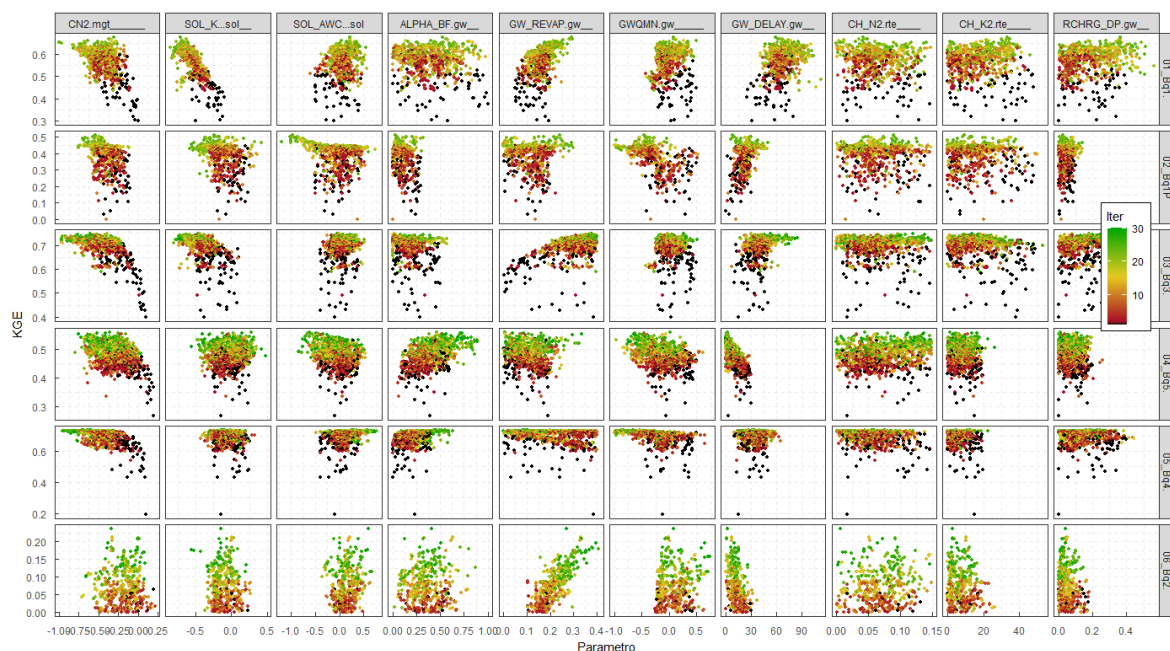


Figura 2.25 Doty plots de la modificación automática de parámetros con el algoritmo PSO para cada bloque de calibración

2.3.1.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

Debido a que existen en las SZH de interés subcuencas en las cuales no se cuenta con observaciones de caudal que posibiliten su calibración, se requiere de una transferencia de los parámetros desde las subcuencas en las que sí es posible la calibración hacia las subcuencas en las que no. En el caso particular de la SZH del río Opón aguas abajo de la estación AYACUCHO existe un grupo de 7 subcuencas hacia las que se debe transferir los parámetros de las subcuencas aguas arriba de la estación. Así mismo, aguas abajo de la estación PTE FERROCARRIL hay un grupo de 5 subcuencas que requieren de la transferencia de los parámetros desde las subcuencas calibradas. Para la SZH del río Sogamoso también se evidencia la condición anteriormente mencionada por lo que se hace necesaria la transferencia de parámetros hacia subcuencas en la parte baja asociadas a la quebrada La Vizcaína. Además, la construcción de la hidroeléctrica generó cambios significativos en el régimen de caudal sobre el río Sogamoso, por lo que se plantea la calibración de las subcuencas en un escenario para el periodo anterior a la construcción de la hidroeléctrica (1990-2014) y un segundo escenario para el periodo posterior a la entrada en operación del

embalse, conservando los parámetros para las subcuencas hallados en el primer escenario e introduciendo la serie de descargas (generación + vertimientos) desde el embalse para obtener los resultados en el tramo del río Sogamoso aguas abajo del sitio de presa.

Las subcuencas en un mismo conjunto no tendrán los mismos valores de parámetros, lo compartido entre las subcuencas de un conjunto son los factores de calibración. En consecuencia, los valores de los parámetros finales dependerán tanto del valor preasignado como del factor de calibración ajustado y la transferencia hacia las subcuencas no monitoreadas será de factores de calibración.

Factores de ajuste de parámetros

El ajuste de los parámetros relacionados a los flujos en las coberturas y en los suelos se llevó a cabo mediante la modificación de los valores de los parámetros de forma relativa a través de un factor de calibración. Esta estrategia permite mantener la variabilidad espacial de los parámetros preasignada a través de la reclasificación de la información fisiográfica realizada para la definición de los HRUs. En la Figura 2.26 se ejemplifica el uso de los factores de ajuste de los parámetros. Los demás parámetros son preasignados por SWAT de manera estandarizada, por lo que el ajuste de estos se debe realizar de manera absoluta, es decir remplazando el valor preasignado por SWAT por uno dentro del posible rango de variación.

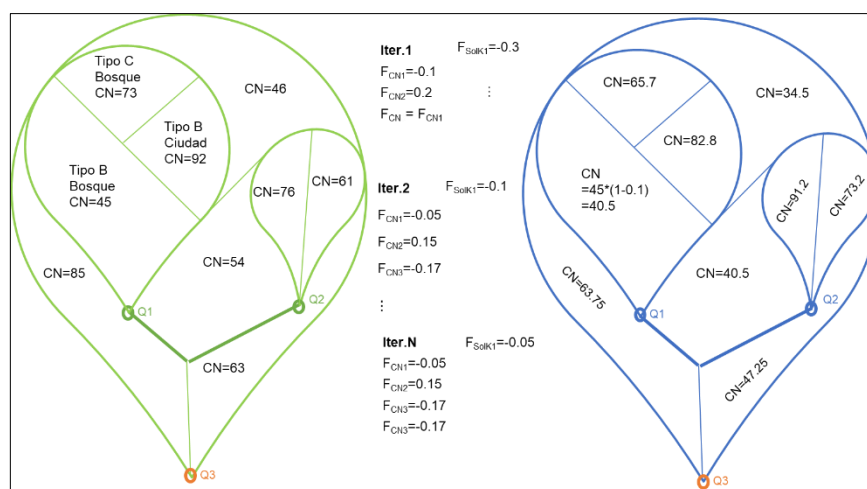


Figura 2.26 Aplicación factores de ajuste de parámetros

Análisis de sensibilidad paramétrica

El aplicativo SWAT cuenta con más de 60 parámetros en lo que a hidrología respecta, por lo que el análisis de sensibilidad paramétrica inició con la revisión de la literatura en específico de aplicaciones previas del modelo SWAT en las que se detalla los parámetros de calibración utilizados con el fin de limitar los parámetros iniciales para la calibración. Arnold et al., (2012) realizó una recopilación de los estudios y en la Figura 2.27 detalla el número de veces que dicho parámetro fue usado para la calibración de los modelos.

Table 1. Calibration parameters reported in 64 selected SWAT watershed studies.^[a] Numbers in parentheses are the number of times the parameter was used in calibration. Definitions of variables are found in the SWAT user manual (<http://swatmodel.tamu.edu/documentation>).

Process	Input Parameters					
Surface runoff	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)
Baseflow	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELP (21)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)
Snow	SFTMP (11)	SMFMN (14)	SMFMX (18)	SMTMP (13)	TIMP (7)	SNO50COV (4) SNOCOVMX (3)
Sediment from channels	PRF (10)	APM (7)	SPEXP (10)	SPCON (11)	CH_EROD (6)	CH_COV (7)
Sediment from landscape	USLE_P (7)	USLE_C (7)	USLE_K (7)	LAT_SED (1)	SLSOIL (2)	SLOPE (8)
N from landscape	RCN (1)	UBN (3)	GWNO3 (2)	ERORGN (5)	NPERCO (11)	ANION_EXCL (2)
P from landscape	PSP (5)	PHOSKD (6)	UBP (5)	PPERCO (8)	GWQMINP (1)	ERORGP (5)
Pesticides	KOC (1)	HL_SOIL (1)	HL_FOL (1)	WSOL (1)	WOFFW (2)	
Subsurface tile	TDRAIN (1)	GDRAIN (2)	DEP_IMP (1)			
N and P from channels	BC1 (2)	BC2 (2)	BC3 (2)	BC4 (2)	RS4 (2)	RS5 (1)
Plant growth	GSI (3)	HI (1)	BLAI (3)	PHU (1)	CN_YLD (1)	
Bacteria	BACTRDQ (1)	BACTMIX (1)	BCNST (1)	CFRT_KG (1)	WDPRCH (1)	WDPQ (1)
Other	BIOMIX (4)	SOL_ROCK (1)	MSK_COL (1)	MSK_CO2 (2)	CBNINT (1)	SOL_BD (3) ALPHA_BNR (1) EVRCH (1) SOL_ALB (2) LAT_TTIME (1)

Figura 2.27 Parámetros usados en la calibración del SWAT

A partir de la revisión bibliográfica realizada se seleccionó un grupo de 12 parámetros los cuales se considera pueden ser los más sensibles con base a las características de las SZH de interés. Estos parámetros y la metodología usada para su variación son presentados en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11 Parámetros para la calibración de los modelos

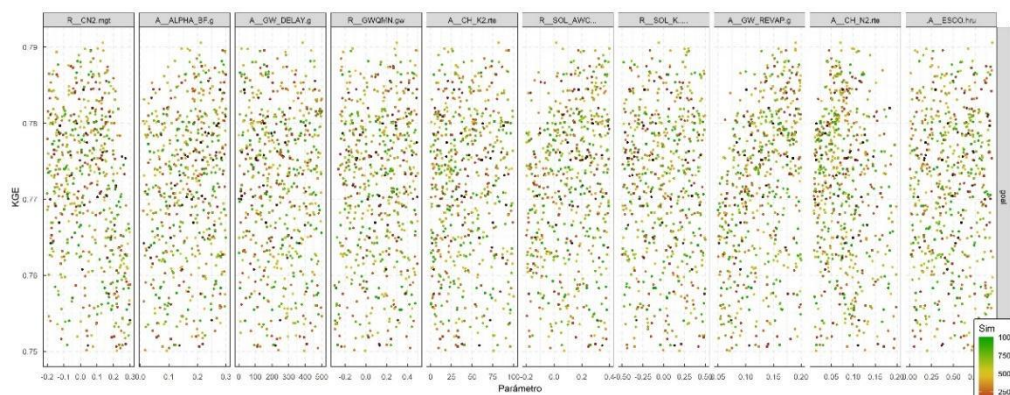
Parámetro	Proceso hidrológico	Tipo de variación
CN2	Escorrentía superficial	Relativa
SOL_AWC	Escorrentía superficial	Relativa
SOL_K	Escorrentía superficial	Relativa
ALPHA_BF	Flujo base	Valor
GWREVAP	Flujo base	Valor

Parámetro	Proceso hidrológico	Tipo de variación
GWDELAY	Flujo base	Valor
GWQMN	Flujo base	Valor
CH_N2	Flujo base	Valor
CH_K2	Flujo base	Valor
REVAPMN	Flujo base	Valor

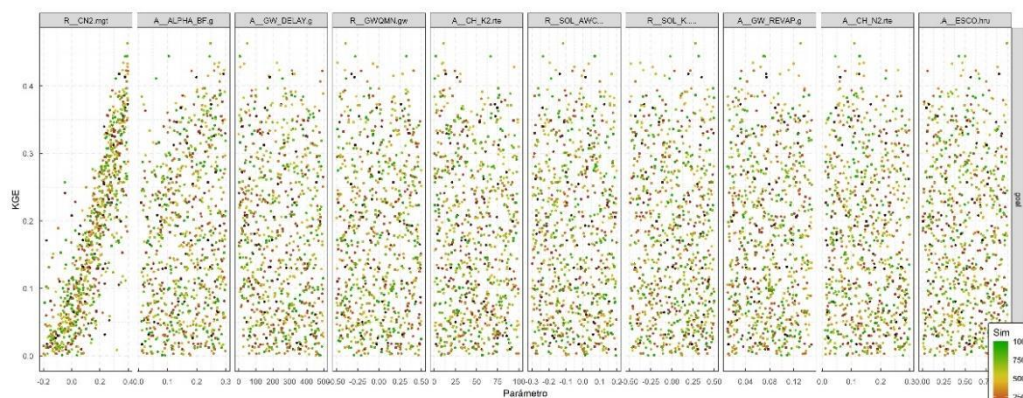
Para el análisis de sensibilidad paramétrica se seleccionaron las estaciones PTE FERROCARRIL, AYACUCHO AUT en la SZH del río Opón y PTE SOGAMOSO como estación de cierre en la SZH del río Sogamoso, pues son estas estaciones las que monitorean lo acumulado en la mayor parte de sus SZH.

Los parámetros seleccionados fueron evaluados simultáneamente en grupos de 300 simulaciones hasta alcanzar un total de 1,200 simulaciones en cada una de las estaciones seleccionadas. Este ejercicio se realizó haciendo uso de la herramienta para la calibración del modelo SWAT-CUP y seleccionando el algoritmo SUFI-2. Con los resultados que se obtuvieron de cada grupo de simulaciones se evaluó la sensibilidad global de los parámetros y se realizó el ajuste de los rangos de variación propuestos inicialmente, con el fin de orientar las simulaciones hacía una mejor respuesta. Los diagramas de dispersión con los resultados en rangos de variación a los que se llegó después de completar las iteraciones son presentados en la Figura 2.28.

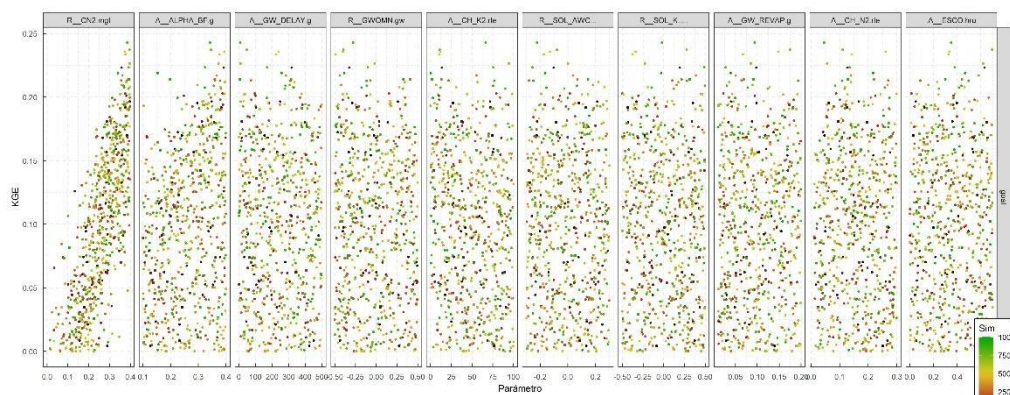
Como se parecía en la Figura 2.28 los resultados obtenidos de manera preliminar en la estación PTE SOGAMOSO son buenos en términos de KGE alcanzando un valor de aproximadamente 0.8. Esto se debe a que el flujo en esta corriente es altamente influenciado por los caudales provenientes de la SZH del río Chicamocha y la SZH del río Suarez. En el caso de la estación PTE FERROCARRIL los resultados son satisfactorios en términos del KGE y se logró una mejora con los ajustes realizados pasando de un KGE de 0.35 a 0.43. Tanto en la estación PTE FERROCARRIL como en la Estación AYACUCHO se evidenciaron posibilidades de mejora. Sin embargo, el algoritmo SUFI-2 al operar secuencialmente sin interpretar los resultados de las simulaciones realizadas se hace altamente ineficiente para alcanzar el objetivo que se persigue. Con base en lo anterior, se planteó una posterior etapa de ajustes automáticos con el algoritmo inteligente PSO disponible en la herramienta SWAT CUP.



a) Desempeño de las simulaciones en la estación PTE SOGAMOSO



b) Desempeño de las simulaciones en la estación PTE FERROCARRIL



c) Desempeño de las simulaciones en la estación AYACUCHO

Figura 2.28 Diagramas de dispersión en análisis de sensibilidad

Adicionalmente, con los resultados obtenidos se identificó que los parámetros CN2, SOL_AWC, SOL_K, GWDELAY y CH_K presentan una sensibilidad local alta en la totalidad de las estaciones en las que se realizó la evaluación. La modificación del CN2 cambia el valor de los picos de caudal y del valor de los periodos de recesión. El aumento del SOL_AWC reduce los picos de caudal. La reducción del SOL_K se reducen los picos de caudal. El aumento del GWDELAY hace que se baje la pendiente en la curva de recesión, por lo que no se llega a valores muy bajos. Una modificación abrupta en el parámetro CH_K hace que se reduzcan los picos del caudal hasta el punto de tener una hidrógrafa totalmente plana.

Otros parámetros como el GWQMN y CH_N tienen una incidencia media la determinación de los caudales pico y en la magnitud del caudal en periodos de bajas afluencias. El incremento del parámetro ALPHA_BF tiene una incidencia alta en la determinación de la pendiente de la curva de recesión de caudales.

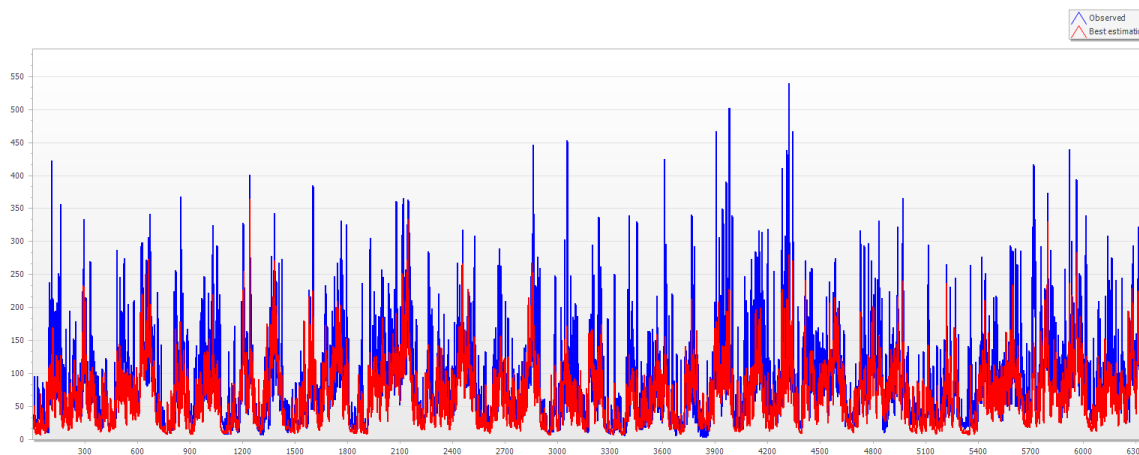
Las métricas estimadas para la evaluación diagnóstica de los modelos implementados en la etapa de sensibilidad paramétrica se presentan en la Tabla 2.12. Las hidrógrafas correspondientes a la simulación con mayor KGE son presentadas en la Figura 2.29.

Tabla 2.12 Métricas iniciales proceso de calibración

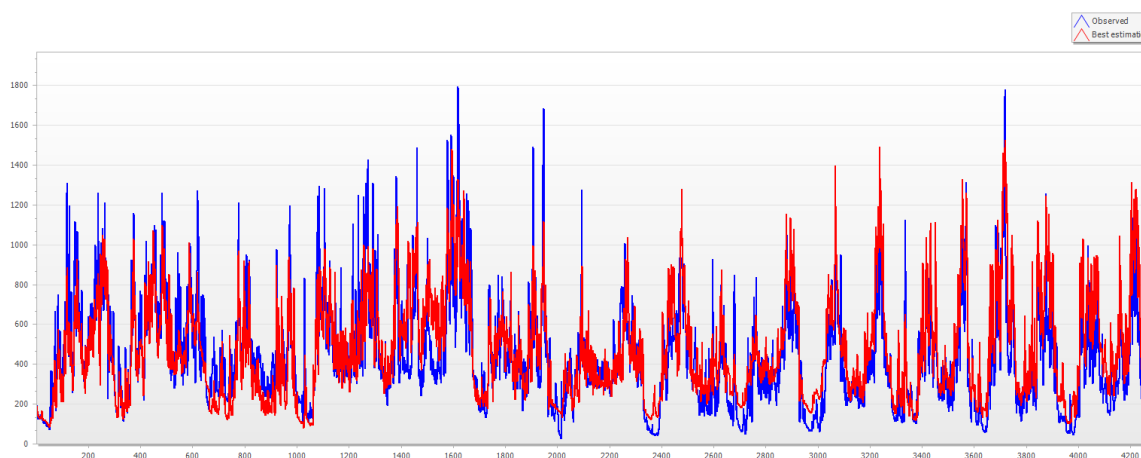
Variable	Corriente	R2	NSE	PBIAS	KGE
PTE FERROCARRIL	Río Opón	0.43	0.33	24.6	0.46
PTE SOGAMOSO	Río Sogamoso	0.65	0.56	-8	0.78
AYACUCHO	Río La Colorada	0.23	0.2	17.3	0.29

Estos resultados hacen evidente la necesidad de una exploración más detallada del espacio parametral que se puede dar con un incremento en el número de simulaciones o con la implementación de un algoritmo de calibración evolutivo cuyo avance entre generaciones se dé

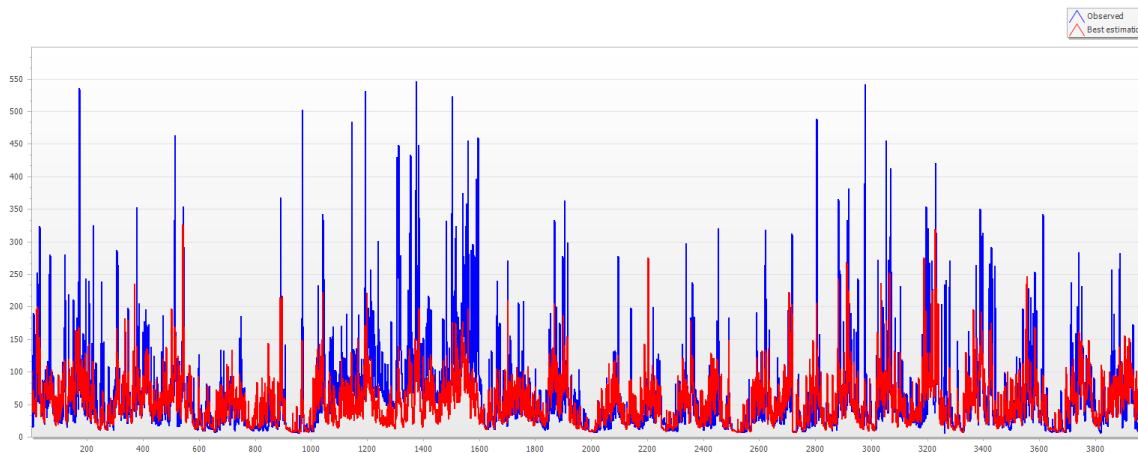
intencionalmente en la selección de parámetros que permitan un mejor ajuste de las series observadas y simuladas.



a) Resultados en la estación PTE FERROCARRIL, río Opón.



b) Resultados en la estación PTE SOGAMSO, río Sogamoso.



c) Resultados en la estación AYACUCHO, río La Colorada.

Figura 2.29 Hidrógrafas observadas y simuladas en las estaciones analizadas

Calibración y validación

Posterior al proceso de análisis de sensibilidad paramétrica se llevó a cabo el ajuste automático de los parámetros, pero esta vez haciendo uso del algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) en los rangos paramétricos previamente definidos, con el fin de identificar los factores de calibración relativa y los valores absolutos de los parámetros que hacen que los modelos reproduzcan acertadamente los procesos hidrológicos en las cuencas estudiadas. Para esta etapa se incluyeron adicionales a las estaciones utilizadas en el análisis de sensibilidad, las estaciones EL TABLAZO y PUENTE COMUNA para su calibración escalonada con las demás estaciones en la SZH del río Sogamoso.

Para cumplir el objetivo de ajuste de los parámetros, se definió un número de simulaciones por iteración con base en el desempeño alcanzado por los modelos en las etapas previas y se buscó alcanzar entre 10 y 12 iteraciones, de modo que el algoritmo PSO pudiese mejorar en estas iteraciones los resultados producto del muestreo aleatorio. Para cada conjunto de subcuencas objeto de calibración se definieron las simulaciones presentadas en la Tabla 2.13

Tabla 2.13 Simulaciones planteadas para la calibración

Estación	Simulaciones	Iteraciones	Total simulaciones	Observación
----------	--------------	-------------	--------------------	-------------

Pte Sogamoso	65	50	3250	Realizar una búsqueda general complementaria a la realizada con las simulaciones semi-manuales y refinar los valores paramétricos
Tablazo	50	50	2500	
Pte Comuna	60	50	3000	
Pte Ferrocarril	50	50	2500	
Ayacucho	65	50	3250	

El proceso de calibración llevado a cabo en la SZH del Río Sogamoso fue realizado de manera escalonada por bloques de subcuencas. En primer lugar, se realizó el ajuste en las subcuencas que drenan hasta la estación EL TABLAZO y paralelamente se realizó el ajuste de los parámetros para el bloque del río Chucurí (hasta la estación PTE COMUNA). Seguidamente, fijando los parámetros encontrados para los anteriores bloques, se realizó la calibración en la estación PTE SOGAMOSO. Finalmente, se fijaron los parámetros encontrados en los 3 bloques de calibración y se realizó la transferencia hacia las subcuencas aguas abajo de la estación PTE SOGAMOSO, para así obtener los resultados en la SZH.

En cuanto a la SZH del río Opón se realizó la calibración en paralelo de los bloques de subcuencas que drenan hasta las estaciones PTE FERROCARRIL y AYACUCHO. Una vez finalizado el proceso de calibración se fijaron los parámetros encontrados y se transfirieron hacia las subzonas no instrumentadas para obtener los resultados de la SZH.

Posterior al proceso de calibración llevado a cabo con el algoritmo PSO, en el que se llegó a los conjuntos de parámetros que generaron un mejor desempeño de los modelos a través de la métrica de calibración KGE, se revisó la lógica de los parámetros obtenidos y su incidencia en los resultados de la modelación. Los parámetros encontrados son presentados en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14 Valores de los parámetros ajustados

Parámetro	PTE FERROCARRIL	AYACUCHO	PTE_SOGAMOSO	EL TABLAZO	PTE_COMUNA
CN	-0.380	-0.209	-0.042	-0.157	-0.341
SOLK	0.333	0.279	-0.119	-0.112	0.331
AWC	0.000	0.371	0.102	0.147	-0.258
AlphaBf	0.957	0.719	0.486	0.717	0.994
GWrevap	-0.024	0.027	0.196	0.211	0.009

Parámetro	PTE FERROCARRIL	AYACUCHO	PTE_SOGAMOSO	EL TABLAZO	PTE_COMUNA
GWQMN	-0.187	0.440	0.208	-0.045	-0.195
GWdelay	1.000	0.512	1.21	2.158	0.755
CH_N	0.140	0.105	0.13	0.044	0.091
CH_K	31.222	68.98	42.97	0.004	31.869
Rchrg DP	0.050	0.016	0.138	0.031	0.017

El parámetro que mostró mayor sensibilidad en el proceso de calibración fue el CN, por lo que los resultados que se obtuvieron en las diferentes simulaciones estuvieron sujetos al incremento o reducción de este parámetro. El CN es asignado automáticamente a las subcuencas con base en la información de cobertura de la tierra y de los suelos. Sin embargo, en general se apreció que dicha asignación al estar influenciada por la pendiente del terreno, en zonas muy planas/altas se subestimaba significativamente. Lo anterior justifica los incrementos altos en los valores ajustados de CN en algunas subzonas.

Por otra parte, los parámetros asociados al flujo en el subsuelo y a la generación del flujo base, los cuales son asignados arbitrariamente por el modelo, también mostraron sensibilidad y en general distaron en gran medida de los parámetros que SWAT utiliza por defecto. Lo anteriormente descrito puede verse en la Figura 2.30 la cual muestra el avance del PSO a través de las iteraciones y las mejoras que se obtuvieron en la función objetivo.

Los parámetros presentados en la Tabla 2.14 fueron fijados y se realizaron las simulaciones que permitieron obtener las series en la totalidad de las estaciones para el periodo 1983-2019. Teniendo en cuenta que no todas las series de caudal observado tenían esta longitud, se debe contemplar las limitaciones asociadas a los datos generados fuera de los periodos observados.

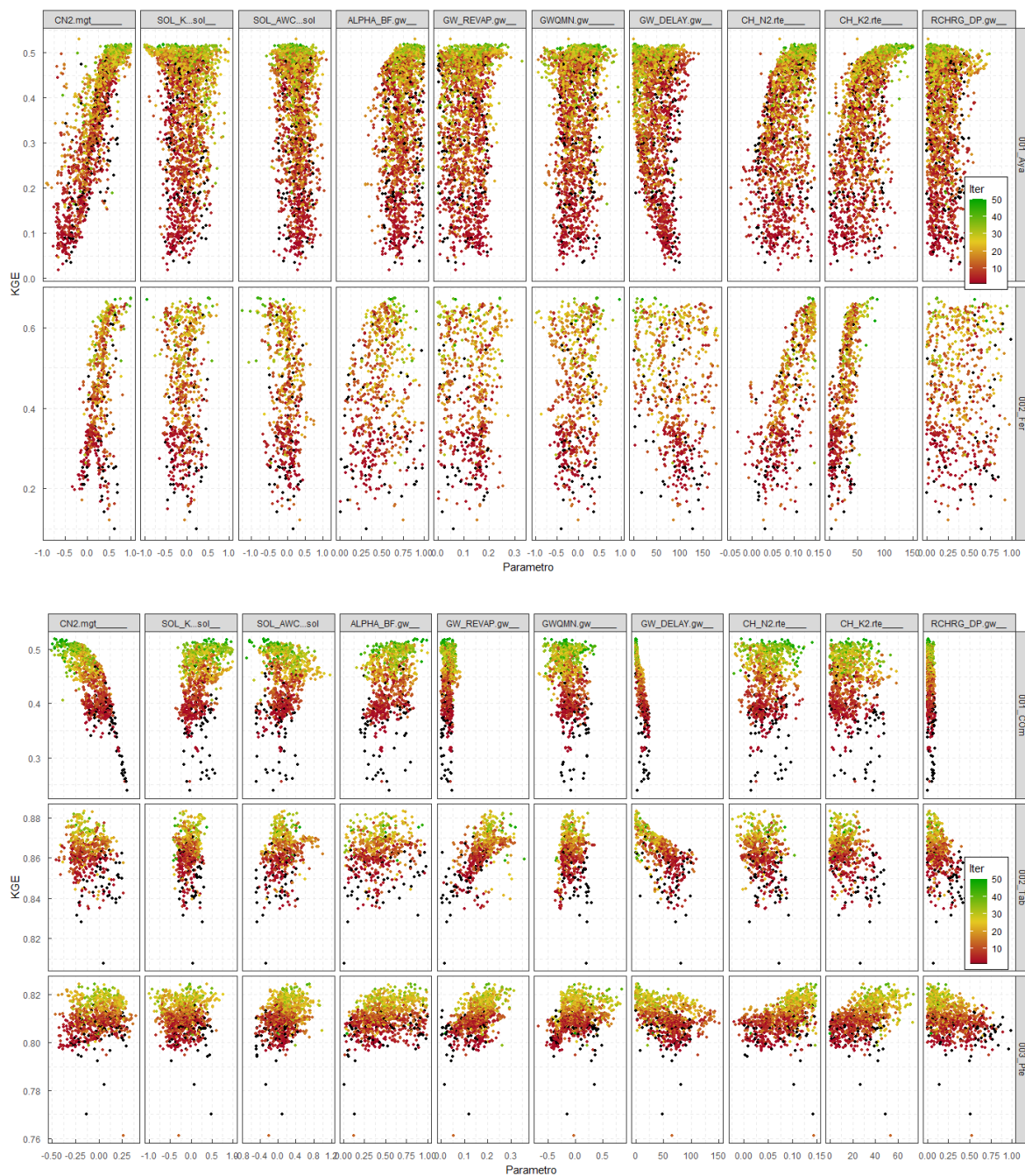


Figura 2.30 Dotty plots de la calibración con PSO

Pese a los esfuerzos realizados por obtener una mejor calibración en la estación PTE COMUNA, no fue posible encontrar una solución paramétrica. Si bien algunos de los parámetros muestran alta

sensibilidad, el ajuste de estos no guía la simulación hacia resultados satisfactorios. Con base en esto, se realizó un análisis de la precipitación reportada por la estación pluviométrica SAN VICENTE en la cuenca del río Chucurí y se evaluó la correlación de esta con la serie de caudal reportada en la estación PTE COMUNA, encontrándose que el coeficiente de correlación es inferior a 0.3 y, además no se aprecia que la serie de caudales responda a los pulsos de precipitación. Lo anterior es una señal que el problema puede encontrarse en alguna de las series de entrada a la modelación (precipitación o caudal).

2.3.2. Desempeño del modelo, validación y evaluación diagnóstica de las simulaciones

El desempeño del modelo se evalúa a través de la evaluación de métricas y en combinación con gráficas para diagnosticar el comportamiento alcanzado por el modelo. Esto se realiza para el periodo de calibración y de manera separada para el periodo de validación, resaltando que ciertas estaciones de caudal no tienen registros en ciertos periodos. Primero se hace una evaluación general a escalas mensual y diaria, y posteriormente se hace una evaluación detalla que explique el resultado general en cada estación.

2.3.2.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

La Tabla 2.15 muestra el desempeño alcanzado a nivel mensual para calibración, expresado a través de varias métricas donde se puede ver un comportamiento variado (en la Figura 2.31 se muestra la ubicación de las estaciones con el desempeño expresado en términos del KGE). En la Tabla 2.16 se pueden ver los resultados para el periodo de validación. Se puede ver que hay resultados aceptables pero insatisfactorios y también hay algunos satisfactorios, pero para la estación San Rafael se encontraron resultados clasificados como buenos (Moriasi, y otros, 2007). Se debe resaltar que el sesgo en prácticamente todas las estaciones se encuentra dentro del rango de 30% de sub o sobreestimación, lo cual garantiza una estimación a nivel anual multianual muy parecida a la reportada por las estaciones de caudal más la estimación en puntos no instrumentados. Se resalta también que a nivel mensual la correspondencia temporal (expresada a través de coeficiente

de determinación, es aceptable y en algunos casos buena; lo anterior permite confiar en la variación intraanual de las simulaciones. De igual manera, la relación de varianzas también es cercana a la unidad en varios casos, solo siendo la estación Tamarindo la que presenta una gran desviación.

Tabla 2.15 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de calibración

Estación	NSE	KGE	RMSE (m³/s)	Sesgo (%)	R²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
EL HOYO [23197410]	0.37	0.69	9.90	-11.40	0.56	1.14
SAN RAFAEL [23197370]	0.71	0.81	23.01	-5.40	0.79	1.15
ANGOSTURAS [23197400] * validación	0.42	0.62	16.72	6.80	0.69	1.27
PUENTE SARDINAS - AUT [23197130]	0.20	0.59	1.84	-27.50	0.57	0.82
PUENTE PANEGA [23197270]	0.26	0.61	1.01	16.20	0.60	1.29
CHOCOA LA [23187040]	-0.02	0.25	4.33	-53.60	0.46	0.55
TAMARINDO [23187240]	-0.57	0.13	0.96	47.30	0.57	1.63
CAFE MADRID [23197290]	0.68	0.77	4.10	4.80	0.78	1.19
COLOMBIA [23197680]	0.90	0.92	1.06	-1.90	0.91	1.16
MAJADAS - AUT [23197700]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PALOGORDO - AUT [23197690]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESPERANZA LA [23197460]	-0.39	0.46	0.45	-21.90	0.26	1.12

Tabla 2.16 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel mensual en periodo de validación

Estación	NSE	KGE	RMSE (m³/s)	Sesgo (%)	R²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
EL HOYO [23197410]	0.40	0.67	10.41	-8.00	0.62	1.23
SAN RAFAEL [23197370]	0.70	0.84	29.56	4.70	0.74	1.07
ANGOSTURAS [23197400] ¹	-0.06	0.27	19.21	15.30	0.78	1.75
PUENTE SARDINAS - AUT [23197130]	0.53	0.76	1.38	-15.50	0.67	1.01
PUENTE PANEGA [23197270]	0.64	0.74	0.96	10.70	0.78	1.15
CHOCOA LA [23187040]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TAMARINDO [23187240]	NA	NA	NA	NA	NA	NA

¹ La cantidad de datos con los que se calculan las métricas para estas estaciones es bastante reducida en el periodo de validación.

Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
CAFE MADRID [23197290]	0.71	0.83	4.64	-3.60	0.72	1.15
COLOMBIA [23197680]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MAJADAS - AUT [23197700]	0.74	0.59	4.06	-14.10	0.85	0.62
PALOGORDO - AUT [23197690]	-0.33	0.42	2.13	-44.10	0.60	0.66
ESPERANZA LA [23197460] ¹	-3.06	-0.02	0.39	-25.10	0.35	2.30

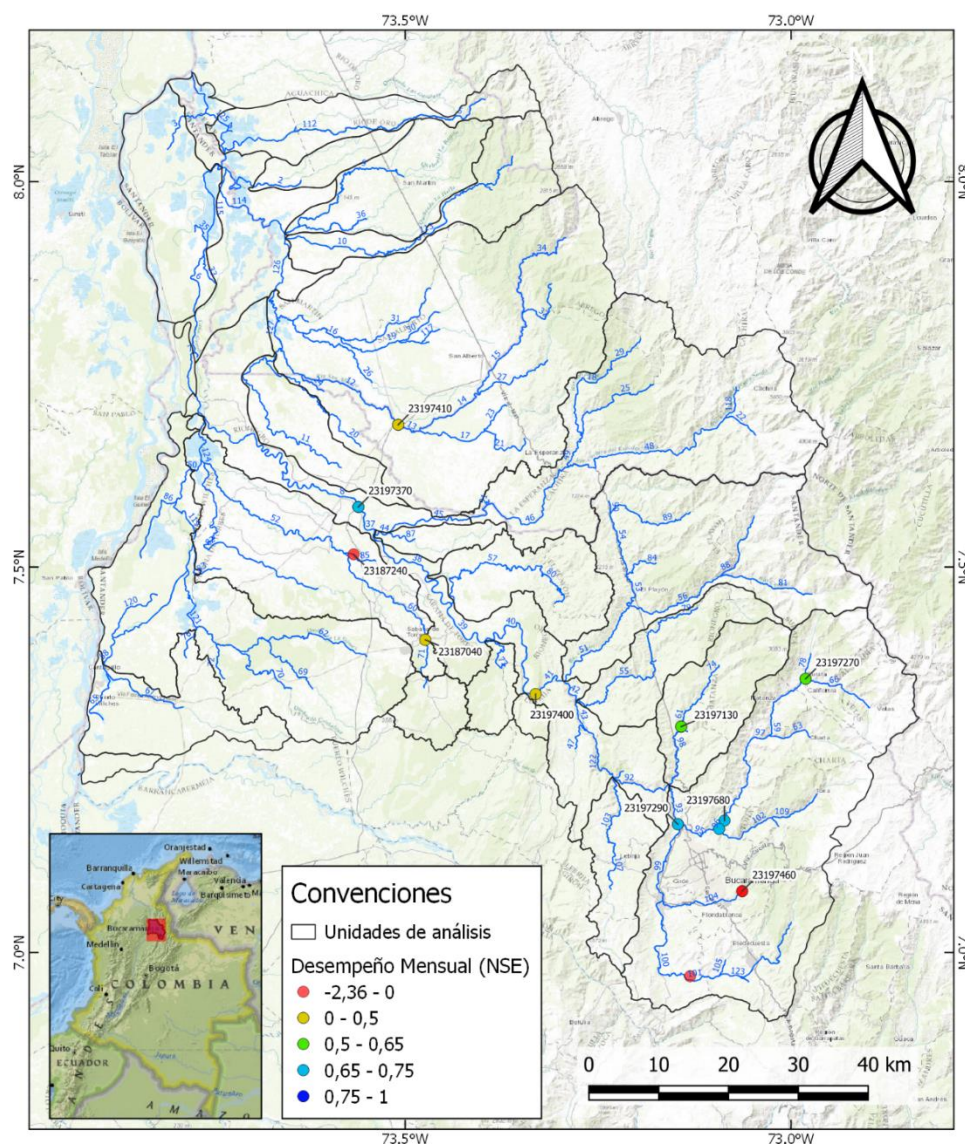


Figura 2.31 Desempeño de los caudales a escala mensual

Igualmente, para el periodo de validación se encontraron desempeños mejores en varias estaciones, mientras que otras desmejoraron. Los desempeños en las estaciones de Puente Sardinas y Puente Panega son satisfactorios y para San Rafael y Majadas son buenos y muy cercanos a muy buenos, de acuerdo con Moriasi y otros (2007). Se debe resaltar que el sesgo en casi todas las estaciones es menor al 30% lo cual es muy bueno en relación con la estimación del caudal anual multianual (se resalta de Puente Sardinas que para este periodo de tiempo se sigue presentando subestimación, es menor que para calibración, pero su correspondencia temporal es bastante alta). Sin embargo, las simulaciones en muchas de las estaciones a nivel mensual no tienen una varianza similar a la observada, en parte por los promedios generados para hallar las series a escala mensual. A pesar de esto, la correlación temporal es alta en la mayoría de las estaciones evidenciando que el régimen estacional se encuentra bien representado en las simulaciones.

La Tabla 2.17 muestra el desempeño alcanzado a nivel diario, (en la Figura 2.32 se muestra la ubicación de las estaciones con el desempeño expresado en términos del KGE). En la Tabla 2.18 se pueden ver los resultados para el periodo de validación. Las estaciones que se encuentran en la parte alta de la cuenca presentan desempeños aceptables, pero no satisfactorios y en un solo caso es satisfactorio, en dos casos no se alcanzó un desempeño aceptable; en la parte baja los resultados son en general aceptables. Se resalta que solo dos estaciones en toda la cuenca tienen un sesgo significativo entre las simulaciones y las observaciones (superiores al 30%), y pertenecen a estaciones con las áreas de drenaje pequeña lo que dificulta la medición de caudal y limita la posibilidad que existan pluviómetros dentro de sus límites. El sesgo de la variabilidad (α), se encuentra acotado dentro de rangos aceptables, no mayores al 30%. Sin embargo, la correlación temporal no es alta a excepción de una estación a esta escala temporal, y una posible razón es la estimación de los campos de lluvia que pueden no haber registrado lluvias localizadas en ciertas subcuencas de la subzona en días específicos.

Tabla 2.17 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de calibración

Estación	NSE	KGE	RMSE (m ³ /s)	Sesgo (%)	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
EL HOYO [23197410]	0.23	0.53	18.18	-10.80	0.32	0.87

Estación	NSE	KGE	RMSE (m³/s)	Sesgo (%)	R²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
SAN RAFAEL [23197370]	0.50	0.72	43.97	-5.70	0.54	0.93
ANGOSTURAS [23197400] * validación	0.31	0.67	26.24	5.10	0.47	1.08
PUENTE SARDINAS - AUT [23197130]	0.11	0.48	2.65	-27.70	0.36	0.82
PUENTE PANEGA [23197270]	0.35	0.66	1.30	12.10	0.47	1.09
CHOCOA LA [23187040]	0.08	0.05	7.23	-54.20	0.24	0.40
TAMARINDO [23187240]	-0.03	0.31	1.92	44.30	0.23	0.94
CAFE MADRID [23197290]	0.47	0.74	6.76	4.70	0.57	1.08
COLOMBIA [23197680]	0.72	0.85	2.20	-2.20	0.74	1.07
MAJADAS - AUT [23197700]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PALOGORDO - AUT [23197690]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
ESPERANZA LA [23197460]	-0.23	0.41	0.56	-21.80	0.20	0.98

Tabla 2.18 Métricas de desempeño del modelo en las estaciones de caudal a nivel diario en periodo de validación

Estación	NSE	KGE	RMSE (m³/s)	Sesgo (%)	R²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
EL HOYO [23197410]	0.24	0.61	18.31	-7.30	0.38	0.97
SAN RAFAEL [23197370]	0.52	0.72	51.59	4.30	0.55	0.90
ANGOSTURAS [23197400] ²	0.17	0.52	24.19	12.00	0.62	1.50
PUENTE SARDINAS - AUT [23197130]	0.27	0.63	2.21	-16.80	0.45	1.04
PUENTE PANEGA [23197270]	0.58	0.78	1.32	8.70	0.66	1.05
CHOCOA LA [23187040]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
TAMARINDO [23187240]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
CAFE MADRID [23197290]	0.57	0.71	7.72	-4.40	0.59	0.99
COLOMBIA [23197680]	NA	NA	NA	NA	NA	NA
MAJADAS - AUT [23197700]	0.63	0.51	6.12	-14.90	0.73	0.56
PALOGORDO - AUT [23197690]	-0.09	0.25	2.81	-44.40	0.36	0.53
ESPERANZA LA [23197460] ²	-2.67	0.06	0.44	-28.00	0.28	2.35

² La cantidad de datos con los que se calculan las métricas para estas estaciones es bastante reducida en el periodo de validación.

Para el periodo de validación se registra una mejora de los desempeños a escala diaria. Esto puede deberse a una mayor cantidad de mediciones pluviométricas para el periodo posterior al año 2001 como se evidencio en los análisis de disponibilidad de datos. Los sesgos entre las simulaciones y las observaciones también se mantienen bajos (menores al 30% absoluto). En varias estaciones la correlación temporal se encuentra bien representada con coeficientes mayores a 0.5 y uno cercano a 0.7.

A continuación, se detallan las hidrógrafas simuladas y observadas en algunas estaciones para diagnosticar las fortalezas y valencias de la modelación. Esto incluye también el análisis de las Curvas de Duración de Caudales (CDC) que permiten observar si los caudales bajos, medios y altos están siendo bien representados.

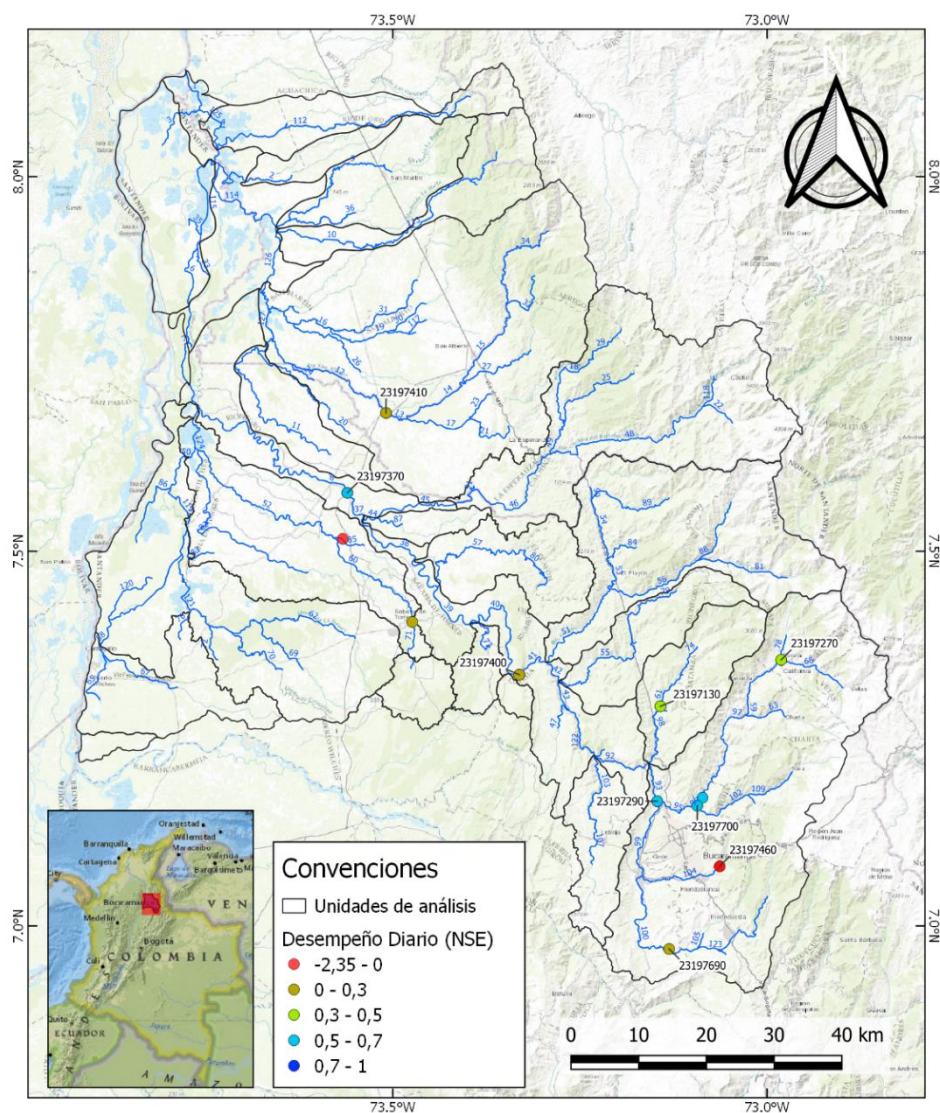


Figura 2.32 Desempeño de los caudales a escala diaria

Majadas - Aut [23197700]

Esta estación se destinó para validación del modelo debido a periodo en el cual cuenta con registros y a su cercanía con la estación Colombia [23197860]. Se resalta que a pesar de las subestimaciones presentes en el fenómeno de la Niña del 2010-2011, los caudales diarios se reproducen de buena manera. El sesgo se da principalmente por la temporada mencionada, pero la correlación temporal es alta de acuerdo con Moriasi y otros (2007). La relación de variabilidades (α), se encuentra

alejada del valor de 1 principalmente por la subestimación en el periodo mencionado. Las subestimaciones de las simulaciones en esa temporada invernal pueden deberse a dos razones: primero al inevitable suavizamiento de los campos de precipitación producto de realizar la interpolación de datos pluviométricos, y la segunda a una sobreestimación del caudal observado producto de la incertidumbre propia de la curva de gasto de la estación de caudal.

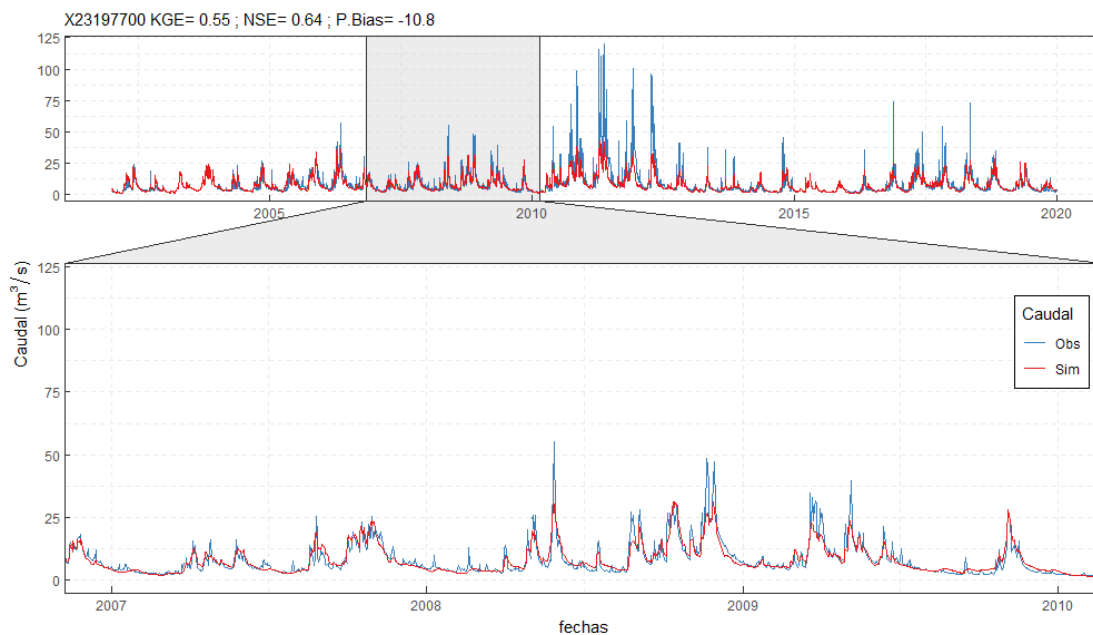


Figura 2.33 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Majadas a escala diaria

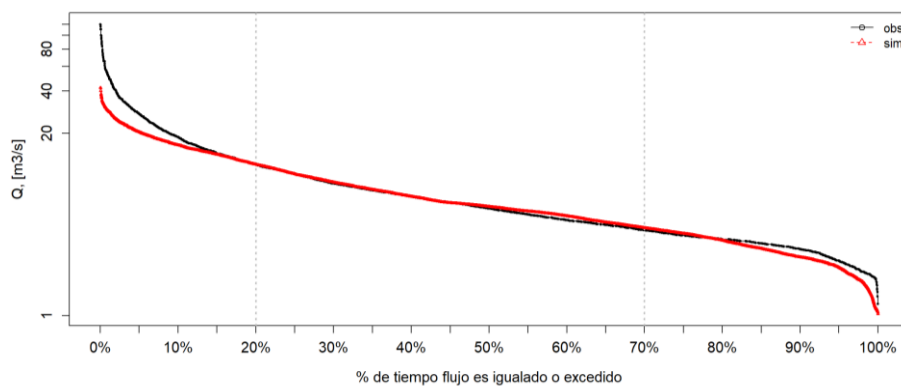


Figura 2.34 CDC diarios para la estación Majadas en el periodo posterior a 2001

De igual manera, la Figura 2.34 muestra que las simulaciones tienen una buena correspondencia para casi todos los rangos de caudal. Solo para aquellos caudales superiores al 10% del tiempo se evidencia la subestimación.

Para corroborar que la precipitación ingresada al modelo se encuentra estimada de manera acorde se comparó contra el producto CHIRPS-IRE desarrollado por la subdirección de meteorología. Esto se realizó en la cuenca aferente a la estación Majadas y en otras estaciones, comparando los estimados de manera agregada debido a que las cuencas no son de gran tamaño (menores a 200 km²). En la Figura 2.35, se puede ver la comparación de la interpolación con IDW contra la precipitación de CHIRPS-IRE a nivel mensual. Se aprecia que existe una alta correspondencia entre los dos productos de precipitación, con un sesgo absoluto menor al 5% estando CHIRPS un poco por encima, y la correlación temporal es también muy alta. Estos resultados resaltan la consistencia de la estimación realizada con el método de IDW.

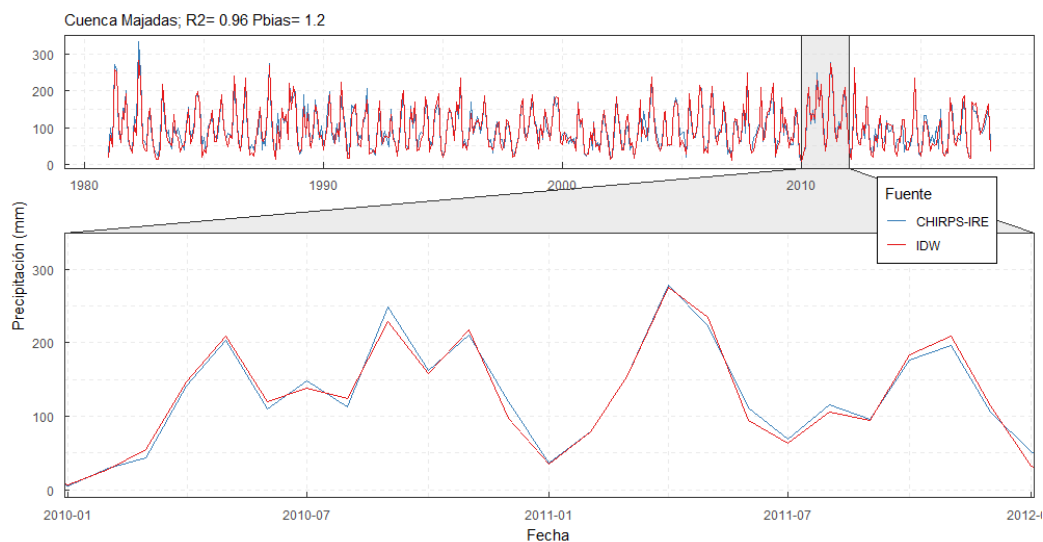


Figura 2.35 Comparación de las precipitaciones estimadas en la cuenca aferente a la estación Majadas

La Esperanza [23197460]

Esta estación drena una subcuenca de aproximadamente 40 km² en la zona oriental de la SZH el río Lebrija. El desempeño del modelo en la estación es bajo en la correspondencia temporal, pero tiene un sesgo bajo. Al observar la Figura 2.36, se puede ver que los datos observados no tienen

una estacionalidad bimodal y desde el año 1994 hacia adelante y es muy claro que no tiene la reducción de caudales esperada para el periodo de sequía del año de 1997 (IDEAM, 2019). En la revisión de análisis de homogeneidad, la estación La Esperanza cumple con algunas de las pruebas de homogeneidad, pero se debe resaltar que tiene varios vacíos y tendencias que no concuerdan con la hidrología de la zona. La cantidad de datos con los que se pudo calcular las métricas para el periodo de validación (posterior al 2001), fue muy baja con lo cual se afecta el valor y se da un concepto sesgado del desempeño del modelo. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda mirar los resultados de bajo desempeño en esta estación con cautela debido a las dudas que existen sobre los registros observados.

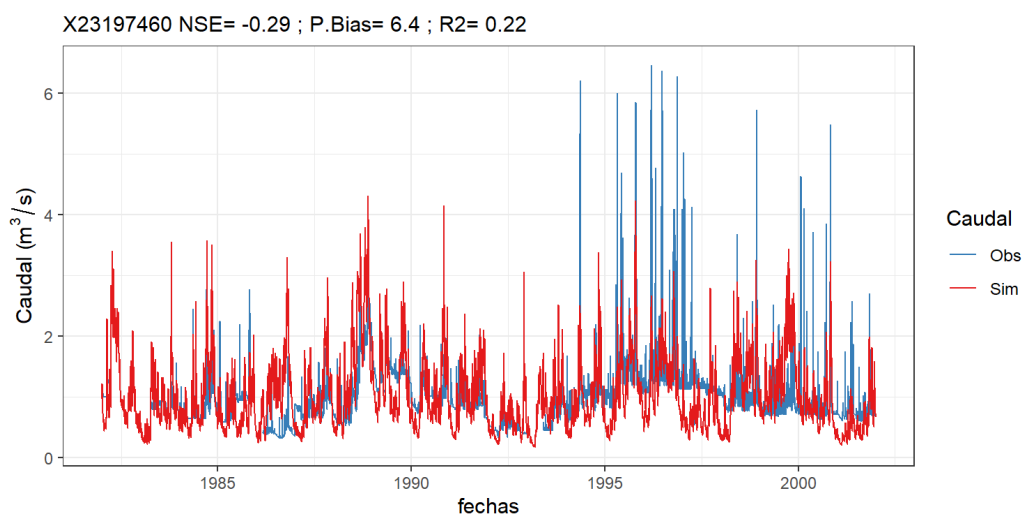


Figura 2.36 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación La Esperanza a escala diaria

Palogordo - Aut [23197690]

Esta estación también se dedicó exclusivamente al periodo de validación por la disponibilidad de datos y a pesar de que no paso las pruebas de homogeneidad, debido a su importante posición dentro de la parte alta de la SZH. Por tanto, es otra estación “ciega” al ajuste de parámetros. Se ve en la Figura 2.37, que durante el periodo comprendido del 2004 al 2009 la serie observada no presenta periodos de estiaje como si se dan para finales de 2009 y en los valles del 2010 y 2011. Lo anterior no concuerda con lo reportado por la simulación, pero si se observa una mejor correspondencia entre los caudales simulados y observados para la temporada invernal del 2010-

2011 siendo que las subcuencas que drenan a esta estación no fueron calibradas con sus registros. Esto conlleva a considerar que los caudales observados si tienen deficiencias en su estimación sobre todo para los primeros años de registro, lo que en parte explica el bajo desempeño hallado.

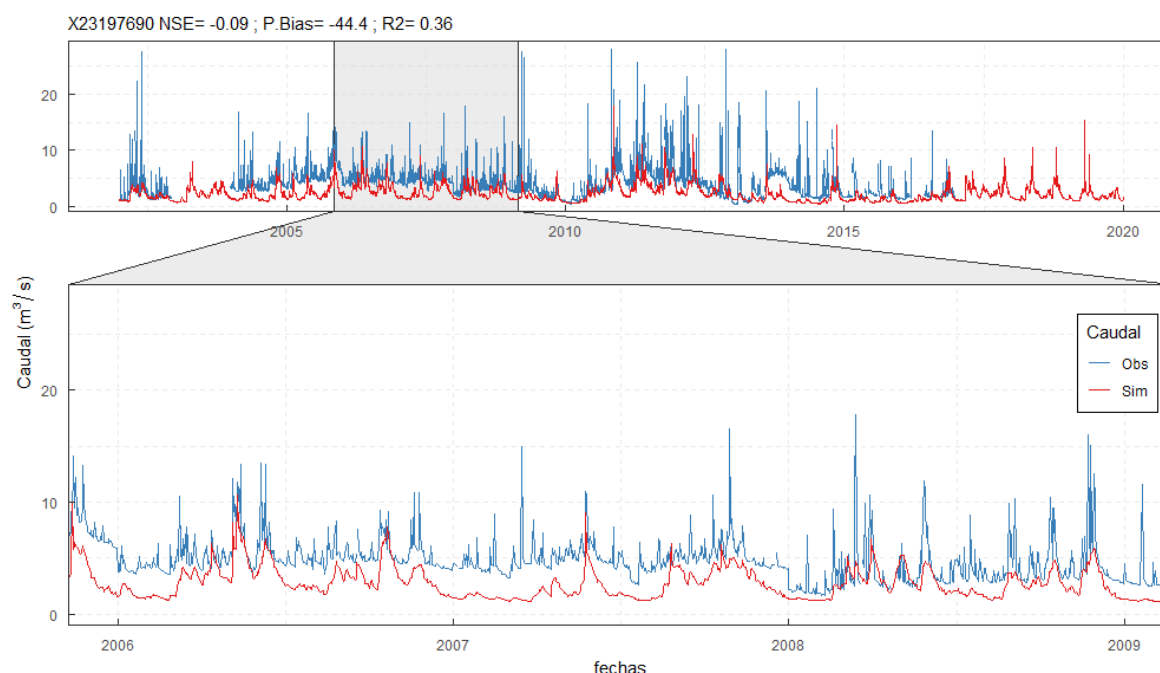


Figura 2.37 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Palogordo a escala diaria

También se debe resaltar que las subcuencas que drenan hacia la estación también se encuentran poco instrumentadas. Sobre todo, en la parte alta hacia y el único pluviómetro al interior del área drenante se encuentra muy cercano a la salida en el municipio de Piedecuesta.

Angosturas [23197400]

Esta estación se dedicó como punto “ciego” a la calibración a pesar que la mayoría de sus registros se encuentran antes del año 2001. Esto se debió a que sus registros están bastante fragmentados y no pasaron completamente las pruebas de homogeneidad. Sin embargo, las simulaciones mantienen la variación estacional del caudal, pero tiende a sobreestimar los caudales en las temporadas lluviosas (Figura 2.38). Estas deficiencias no se registran en la estación aguas abajo San Rafael, lo cual puede ser un indicio de errores en los caudales observados en la estación Angosturas, ya que el área que drena a esta estación fue también calibrada. Para el periodo de validación se registra a

nivel mensual un valor negativo del coeficiente NSE, esto se da por la poca cantidad de datos con la que se puede calcular la métrica después del año 2001.

Con respecto a los datos diarios, el régimen de caudales simulados representa bien la parte media y baja (Figura 2.39). No obstante, tiende a sobreestimar los caudales medio altos y altos, al igual que los extremos bajos. Esto también se da por la no calibración de los parámetros de las subcuencas que drenan hacia esta estación, por las razones ya mencionadas.

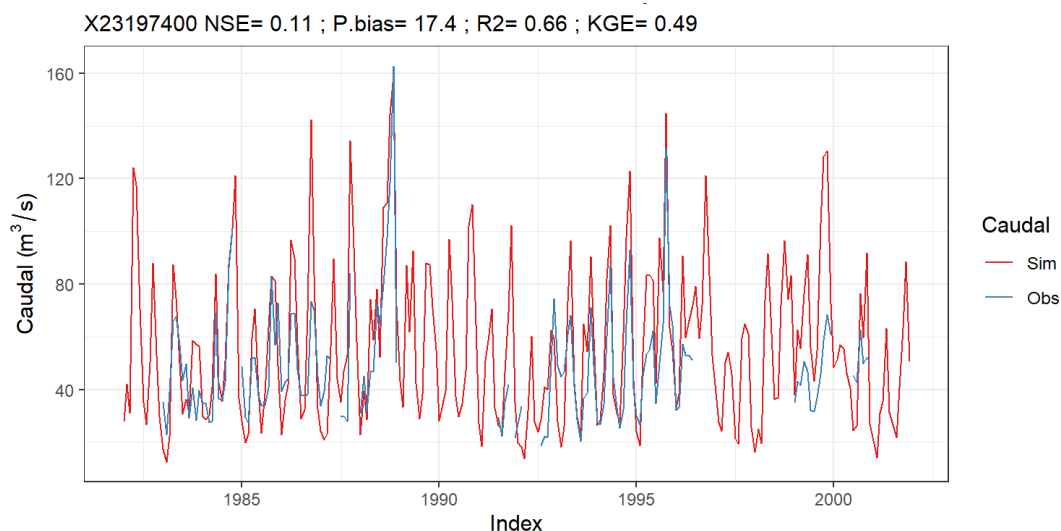


Figura 2.38 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Angosturas a escala mensual

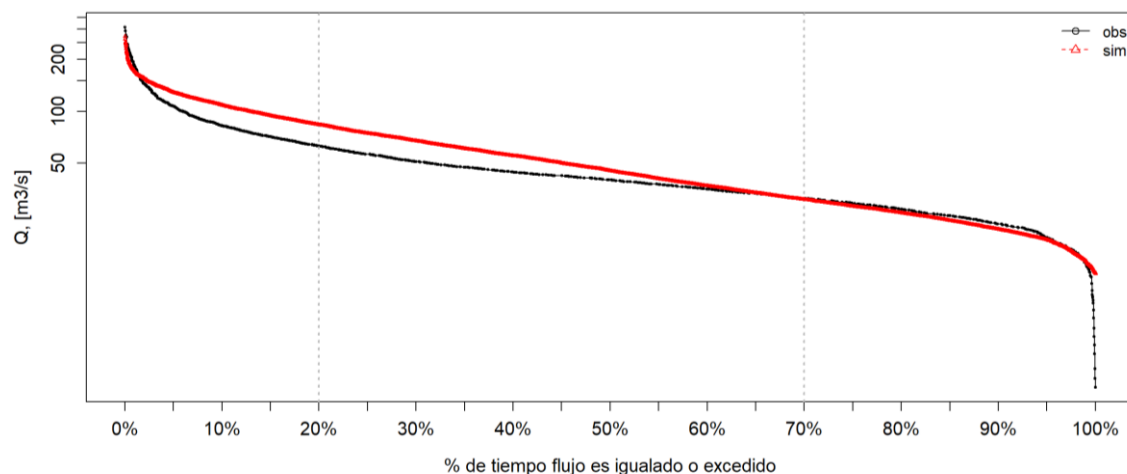


Figura 2.39 CDC diarios para la estación Angosturas en el periodo previo a 2001

A pesar de lo señalado, se debe resaltar que los resultados para este punto “ciego” a la calibración son bastante buenos.

Puente Sardinas [23197130]

La Figura 2.40 muestra que las hidrógrafas simuladas en esta estación siguen la estacionalidad de los caudales. El valor del coeficiente de correlación corrobora esta afirmación, a pesar que su valor no es alto. Al detallar las curvas de recesión se puede apreciar que se subestiman los caudales bajos, lo que se puede corroborar a través de la Figura 2.41, donde se ve que el mayor sesgo se presenta en los caudales de bajo valor.

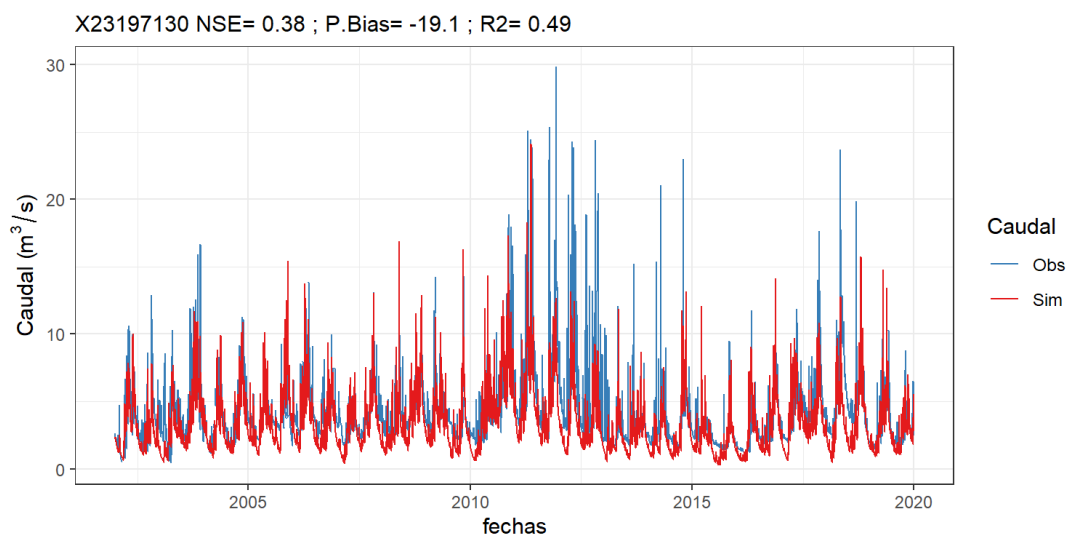


Figura 2.40 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Puente Sardinas a escala diaria

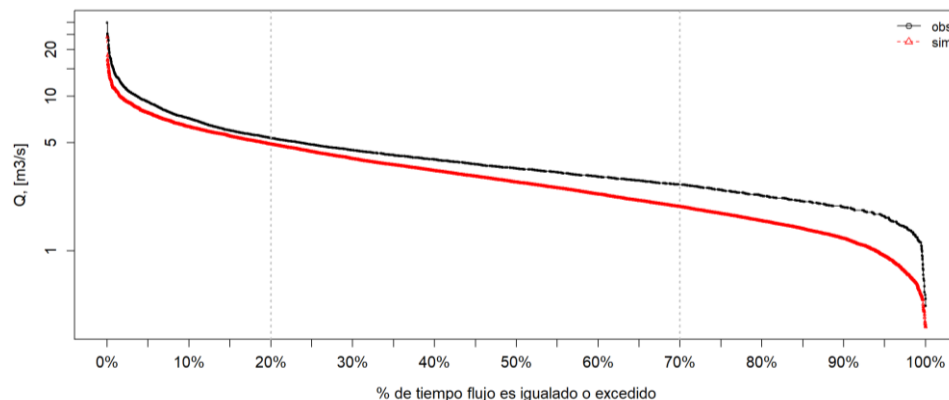


Figura 2.41 CDC diarios para la estación Puente Sardinas en el periodo posterior a 2001

La subestimación se puede deber a una baja precipitación en las subcuencas que drenan hacia esta estación, y al suavizamiento del campo de lluvia producido por la interpolación. En la Figura 2.42 se ve que dentro de la subcuenca no existe ningún pluviómetro que permita estimar de mejor manera la precipitación en dicho territorio y tampoco permita validar los estimados del campo de precipitación. A pesar que la calibración del modelo no debe y no logra corregir estas falencias, se resalta que la estimación de los caudales con el modelo en la estación son aceptables de acuerdo con Moriasi y otros (2007).

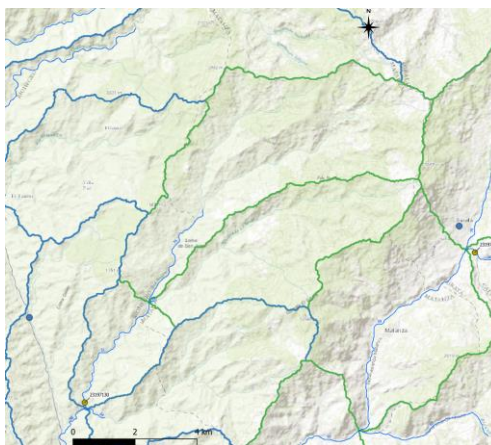


Figura 2.42 Ubicación de estaciones pluviométricas cercanas a las subcuencas drenantes a la estación Puente Sardinas

Igualmente, se corroboró que la precipitación ingresada al modelo de la misma manera que en la estación Majadas. En la [Figura 2.43](#), se puede ver la comparación de la interpolación con IDW contra la precipitación de CHIRPS-IRE a nivel mensual. Se aprecia que existe una alta correspondencia entre los dos productos de precipitación, con una subestimación del 7% por parte de la interpolación con IDW, y la correlación temporal es también muy alta. Estos resultados resaltan la consistencia de la estimación realizada con el método de IDW y evidencian que los resultados con sesgo en los caudales tienen su raíz en la subestimación de la precipitación que puede estar presente en la cuenca.

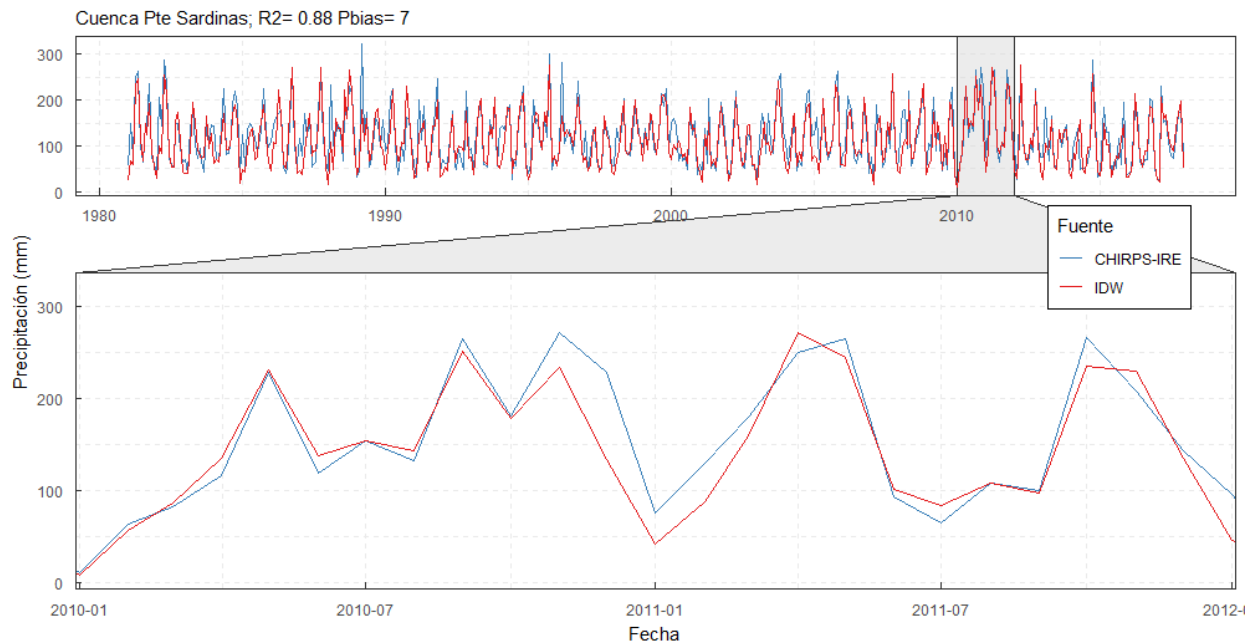


Figura 2.43 Comparación de la precipitación estimada en la cuenca aferente a la estación *Puente Sardinás* *Café Madrid [23197290]*

En esta estación se alcanzó un mejor resultado en el periodo de validación que en calibración probablemente debido a la mayor cantidad de datos pluviométricos que existen sobre el segundo periodo. En la Figura 2.44, se puede ver que existe una leve tendencia a sobreestimar el caudal en las temporadas de lluvias (sobre todo en el periodo desde 1989 hasta 1991). Sin embargo, la temporalidad está bien representada (el R^2 es mayor a 0.7) y la varianza de los caudales simulados es muy parecida a los observados, sobre todo en el periodo de validación (Figura 2.45). En el intervalo de tiempo detallado para el periodo de validación se puede apreciar que en general la simulación está acorde con todos los picos y valles del caudal observados, a excepción de algunos pocos como por ejemplo los del mes de enero y febrero del año 2007. La razón por la que estos picos de caudal no fueron representados es porque en el forzamiento de precipitación no se debieron registrar algunos pulsos localizados de lluvia que pudieron ocurrir en subcuencas no instrumentadas (esto de acuerdo con lo planteado por Arnold y otros (2012)). La certeza sobre la ocurrencia de esos pulsos de lluvia se da porque la transformación de la lluvia a caudal terminó siendo registrada en los caudales observados en la estación.

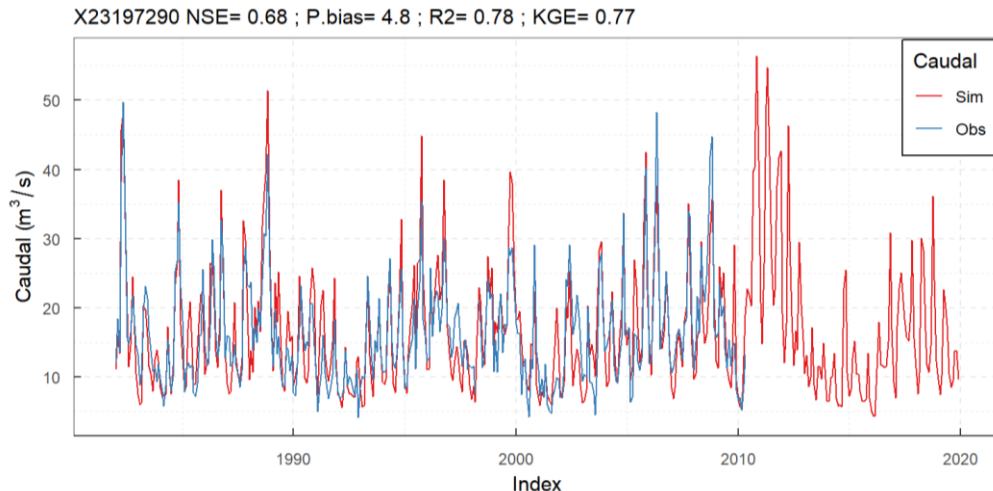


Figura 2.44 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala mensual

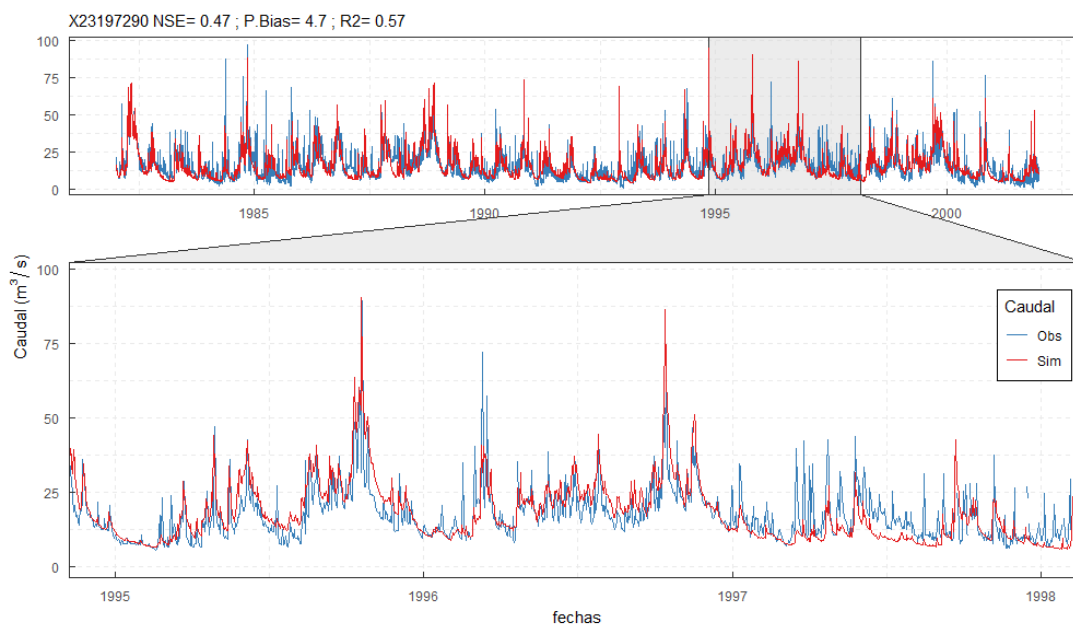


Figura 2.45 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación Café Madrid a escala diaria

En la Figura 2.46, se puede ver que en general el modelo está representando bien los caudales medios y la mayor parte de los caudales altos. En los caudales bajos, si bien tiene una buena correspondencia en casi todos los valores, en la parte más baja se presenta una diferencia que en volumen no es significativa. Sin embargo, se deber resaltar que los resultados mostrados en la

figura son a temporales y se debe recordar que el coeficiente de determinación tuvo un valor de 0.57 para el periodo de validación.

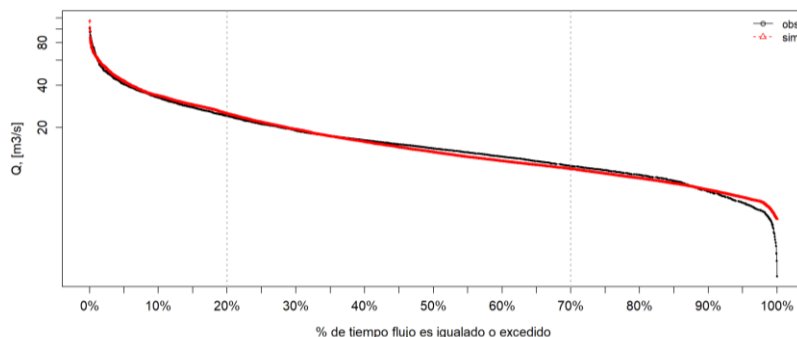


Figura 2.46 CDC diarios para la estación Café Madrid en el periodo posterior a 2001

San Rafael [23197370]

Esta estación acumula el tránsito del agua que se produce en la parte alta y media de la SZH. Tanto a nivel diario como a escala mensual se obtuvieron buenos resultados. En la Figura 2.47 se puede ver que en general la correspondencia es buena, pero se presentan algunas fallas a nivel diario en periodos cortos de tiempo en algunos picos de caudal quizás también debido a lluvias localizadas en algunas subcuencas no instrumentadas.

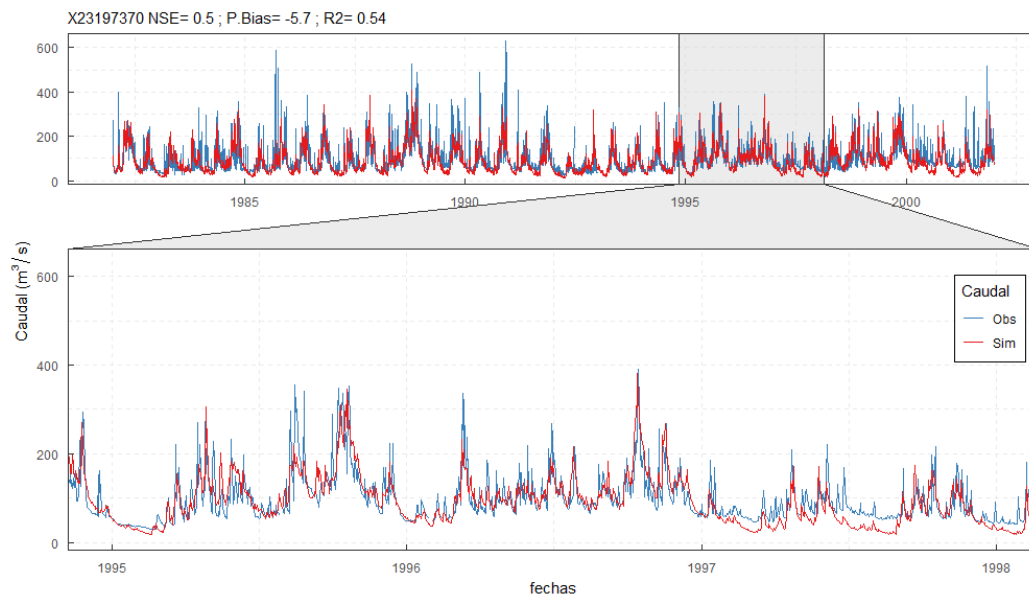


Figura 2.47 Hidrógrafas simuladas y observadas en la estación San Rafael a escala diaria

También se analizó la dispersión de los caudales a nivel diario y mensual para evidenciar posibles sesgos en algunos rangos de caudal. En la Figura 2.48 no se evidencia un sesgo hacia la sobre estimación o subestimación para algún rango y solo se presentan pocos datos que se alejan de manera significativa desde la línea central con pendiente unitaria.

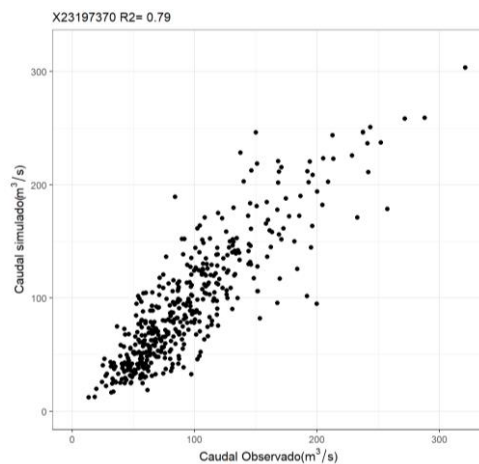


Figura 2.48 Scatter plot de los caudales simulados y observados mensuales para la estación San Rafael posteriores al año 2001

Todos los tipos de gráficas mostradas en esta sección se realizaron para todas las estaciones y se anexan a este documento. Los archivos de salidas del modelo SWAT también se anexan a este documento.

2.3.2.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

En las SZH Opón y Sogamoso, el desempeño de los modelos fue evaluado a través del conjunto de métricas KGE, NSE, PBIAS y la revisión gráfica de las series, esto con el objetivo de tener una evaluación diagnóstica de las simulaciones. Para esto, se consideraron dos etapas de manera independiente, la calibración y la validación según los periodos definidos en el planteamiento del modelo conceptual.

Debido a que los modelos fueron construidos a resolución temporal diaria, la primera evaluación se realizó a esta escala. Posteriormente, teniendo en cuenta que existe literatura que permite clasificar el desempeño de los modelos con base a las métricas obtenidas (Moriassi y otros, 2007),

se generó la agregación a escala mensual de las series observadas y simuladas para la estimación de las métricas.

En la Tabla 2.19 se presentan los resultados para la calibración diaria en cada una de las estaciones consideradas. En general se obtuvo una mejoría significativa respecto a los resultados obtenidos en la etapa de análisis de la sensibilidad de los parámetros, salvo en la estación PTE SOGAMOSO en la cual, debido al proceso de calibración escalonado, que no se realizó en el primer ejercicio, se tuvo una reducción en las métricas evaluadas. En todas las estaciones se obtuvo valores de NSE superiores a cero, lo que significa que los caudales simulados tienen un desempeño más alto que el de la reproducción de la media de los valores observados.

Tabla 2.19 Métricas periodo de calibración diarias

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.33	0.41	53.76	-18.9	0.36	0.62
Pte Ferrocarril	0.46	0.63	50.43	-15.6	0.51	0.83
Pte Sogamoso	0.64	0.82	152.50	4.3	0.68	1.07
El Tablazo	0.80	0.88	113.50	6.7	0.83	1.03
Pte Comuna	0.13	0.51	11.07	-8.2	0.28	0.91

En cuanto al porcentaje de sesgo (PBIAS) se tiene que este se encuentra en general alrededor del $\pm 15\%$ lo cual es aceptable y satisfactorio. Los resultados en la SZH del río Opón tienden a la subestimación de los caudales, mientras que en las estimaciones sobre el río Sogamoso tienden a levemente sobreestimar el caudal. El KGE utilizado como métrica de calibración es satisfactorio en la mayoría de las estaciones a excepción de la estación PTE COMUNA en la que el modelo construido no tiene la capacidad de reproducir los caudales observados, subestimándolos en gran medida.

Tras agrupar a resolución mensual los resultados, se obtuvieron las métricas de la Tabla 2.20 para el periodo de calibración. Según los valores de NSE propuestos por Moriasi y otros (2007), el desempeño en la mayoría de las estaciones fue satisfactorio ($0.50 < \text{NSE} < 0.65$), llegando a ser bueno en la estación PTE FERRROCARRIL y muy bueno en la estación EL TABLAZO. Sin

embargo, los resultados para las estaciones AYACUCHO y PTE COMUNA son aceptables, pero NO satisfactorios.

No obstante, la métrica KGE seleccionada como función objetivo para la calibración, la cual hace una evaluación holística de las series observadas y simuladas, presentó un valor superior a 0.5 en todas las estaciones a nivel mensual, por lo que en general el desempeño de los modelos fue satisfactorio a esta escala. A excepción de la estación PTE COMUNA, la correlación temporal de las series se encuentra bien representada con coeficientes superiores a 0.5.

Tabla 2.20 Métricas calibración mensuales

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.41	0.56	30.42	-20.3	0.51	0.78
Pte Ferrocarril	0.63	0.80	24.57	-13.6	0.76	1.07
Pte Sogamoso	0.81	0.84	84.33	4.1	0.86	1.20
El Tablazo	0.87	0.90	70.86	6.5	0.90	1.06
Pte Comuna	0.38	0.69	5.12	-7.3	0.58	1.18

Resultados de la validación

Con el fin de corroborar la robustez de los modelos y conjuntos de parámetros encontrados en la etapa de calibración, se realizó la validación con simulaciones en periodos de tiempo no incluidos en la calibración. Los resultados de las métricas de evaluación para el periodo de validación a resolución diaria y mensual son presentados en la Tabla 2.21 y Tabla 2.22 respectivamente.

Tabla 2.21 Métricas validación a escala diaria

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.28	0.28	79.30	-25.3	0.33	0.47
Pte Ferrocarril	0.53	0.64	49.42	-16	0.57	0.82
Pte Sogamoso	0.62	0.78	190.52	13.00	0.69	1.07
El Tablazo	0.84	0.85	112.08	11.9	0.88	1.14
Pte Comuna	0.20	0.23	22.65	-16	0.21	0.46

Los resultados de la validación a escala diaria muestran una reducción del KGE de alrededor del 10% en las estaciones de la SZH del río Opón y un aumento de aproximadamente el 6% en las estaciones de la SZH del río Sogamoso. Algo similar ocurre con el NSE solo que para esta métrica se tiene un incremento del 5% en la SZH hidrográfica del río Sogamoso y una reducción del 4% en la SZH del río Opón. Para todas las estaciones el sesgo se mantiene inferior al 30% por lo que los resultados de la modelación pueden considerarse buenos respecto a la estimación del caudal anual multianual.

En lo que respecta a la escala mensual, los resultados presentan una mejora significativa respecto a los resultados obtenidos en la etapa de calibración y respecto a los resultados de la validación diaria. A esta resolución los resultados de la modelación en cuanto al NSE son satisfactorios en todas las estaciones, inclusive en la estación PTE COMUNA, cuyos resultados en la calibración había sido aceptables, pero no satisfactorios. En las estaciones PTE FERROCARRIL, PTE SOGAMOSO, EL TABLAZO y PTE COMUNA son buenos según los criterios de Moriasi et al., (2007). El sesgo en las estaciones se mantiene por debajo del 25 % lo cual se considera satisfactorio y bueno por debajo del 15%. La correlación temporal de las series simuladas y observadas se considera bien representadas con coeficientes de determinación superiores a 0.6 en todas las estaciones.

En cuanto a la métrica de calibración KGE se aprecia un incremento de aproximadamente 9% para la etapa de validación. Con base en las evaluaciones realizadas, se concluye que los resultados obtenidos para este periodo fueron satisfactorios.

Tabla 2.22 Métricas validación mensuales

Estación	NASH	KGE	RMSE	PBIAS	R ²	$\alpha = \frac{\sigma_s}{\sigma_o}$
Ayacucho	0.55	0.65	29.22	-20.4	0.64	0.79
Pte Ferrocarril	0.70	0.77	28.03	-16.8	0.79	0.89
Pte Sogamoso	0.73	0.81	127.92	13.50	0.82	1.09
El Tablazo	0.87	0.82	78.07	13.9	0.96	1.12
Pte Comuna	0.38	0.53	9.22	-19.7	0.45	0.72

Análisis gráfico en las estaciones hidrométricas

En esta sección se detallan las hidrógrafas simuladas y observadas en las estaciones utilizadas para la calibración/validación a escala diaria y mensual. Adicionalmente, se presentan las Curvas de Duración de Caudal (CDQ) para el análisis de la representación de los caudales simulados.

PTE FERROCARRIL (23147020)

La estación 23147020 acumula el flujo que se genera en la parte alta y media de la cuenca del río Opón, pero se encuentra antes de la confluencia con el río La Colorada. En la Figura 2.49 se puede apreciar que existe una leve tendencia a la subestimación de los caudales más altos en el periodo simulado. Lo anterior puede estar relacionado con la baja densidad de estaciones pluviométricas en la cuenca alta y media del río Opón, lo cual sumado al suavizado del campo de precipitación producido por la interpolación realizada se traduce en una precipitación muy baja en las cuencas de modelación. No obstante, otros atributos del régimen de caudal como el régimen bimodal en el periodo intra-anual, caudales medios y el caudal base son bien representados en la simulación, esto es especialmente apreciable en las hidrógrafas de caudales medios.

El diagrama de dispersión entre los caudales observados y los caudales simulados muestran un resultado satisfactorio en caudales de hasta $150 \text{ m}^3/\text{s}$, cabe resaltar que los caudales altos observados pueden corresponder a extrapolaciones de la curva de calibración de la estación, por lo que puede existir un error asociado a estos.

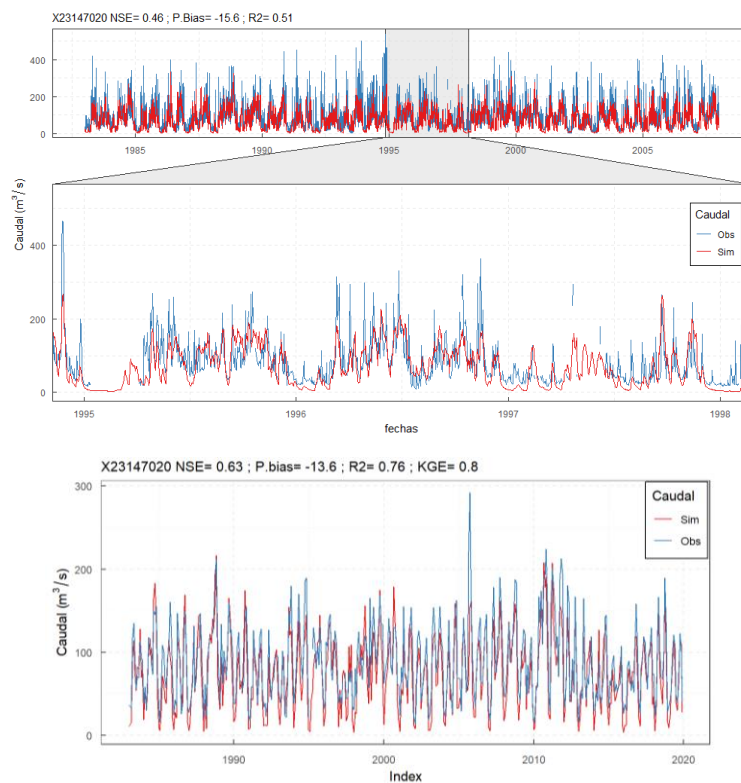
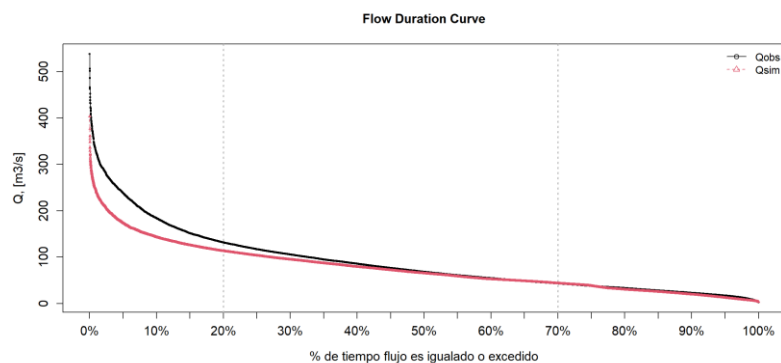


Figura 2.49 Hidrógrafas en la estación 23147020

En cuanto a las CDQ construidas con los caudales diarios observados y simulados para la estación PTE FERROCARRIL se aprecia una buena reproducción de los caudales bajos y medios, y la subestimación de los caudales más altos se empieza a presentar en aquellos que se presentan tan solo un 30% del tiempo, siendo más evidente la subestimación en aquellos que son igualados o excedidos el 15% de tiempo (ver Figura 2.50).



*Figura 2.50 CDQ en la estación 23147020***AYACUCHO AUT (23147040)**

La estación 23147040 sobre el río La Colorada registra el flujo generado de la parte alta y media de la cuenca de este río hasta antes de su desembocadura en el río Opón. En las hidrógrafas diarias de la Figura 2.51 se visualiza una subestimación generalizada de los caudales. Esta subestimación se hace más evidente en los periodos 1998-2000 y 2010-2012, los cuales corresponden a la ocurrencia del fenómeno ENSO en su fase fría, para los cuales se identificó en la caracterización hidrológica que existe un incremento en las afluencias asociado a un incremento en las lluvias en la SZH del río Opón.

Como es evidente en la Figura 2.51 no en todos los periodos mencionados existe una correlación de la precipitación observada con los caudales observados (p.ej. 1998-2000), esto permite ver que existe una deficiencia en la serie de lluvias generadas mediante la interpolación de los datos medidos en estaciones pluviométricas. Lo anterior hace que los resultados de la simulación no sean los mejores, puesto que el problema no es paramétrico al reproducirse acertadamente otras características del régimen de caudal, sino que el déficit se encuentra en la serie de lluvias ingresadas al modelo.

A partir de las series mensuales es posible observar que existe una buena simulación de los tiempos de ocurrencia y en general del régimen mensual intra-anual en los resultados. Sin embargo, en esta también es evidente el problema de subestimación en los periodos 1998-2000 y 2010-2012. El diagrama de dispersión muestra como para caudales superiores a $110 \text{ m}^3/\text{s}$ se subestima por completo los caudales observados.

En la CDQ se evidenció que los caudales subestimados son los que son igualados o excedidos hasta el 20% del tiempo (ver Figura 2.52). Sin embargo, los caudales inferiores a están siendo estimados satisfactoriamente por el modelo.

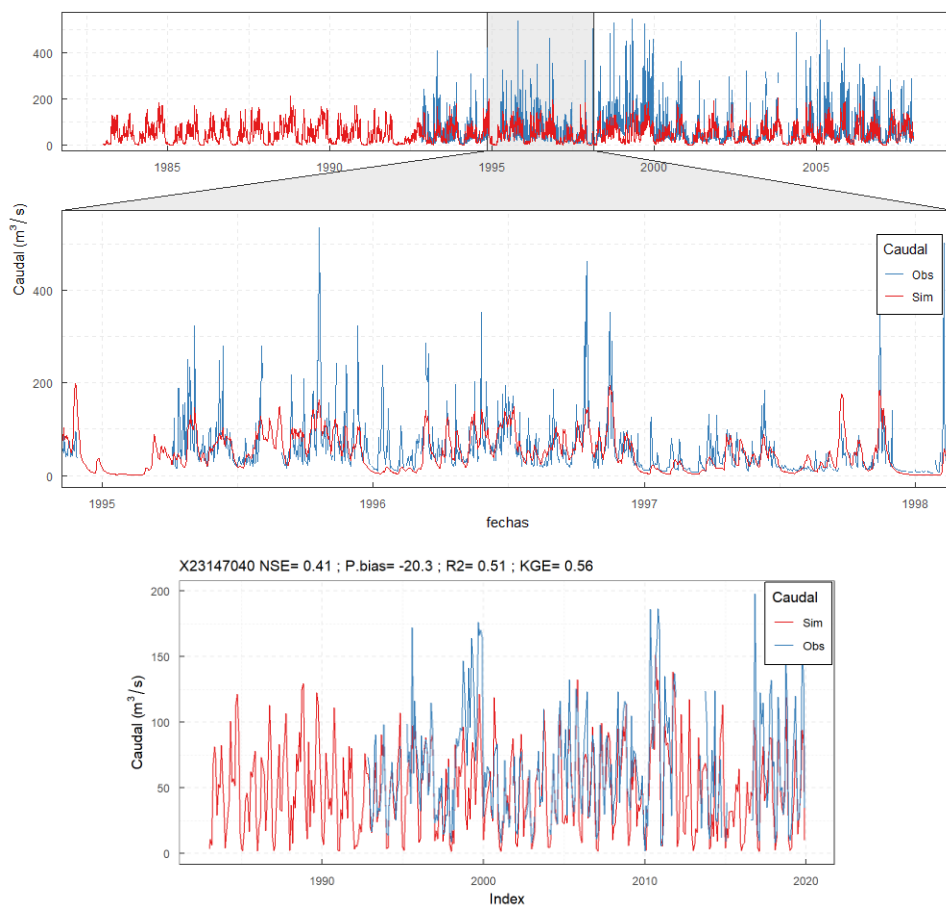


Figura 2.51 Hidrógrafas en la estación 23147040

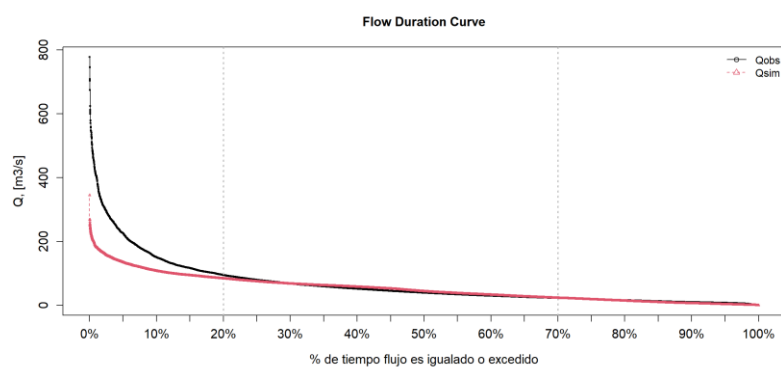
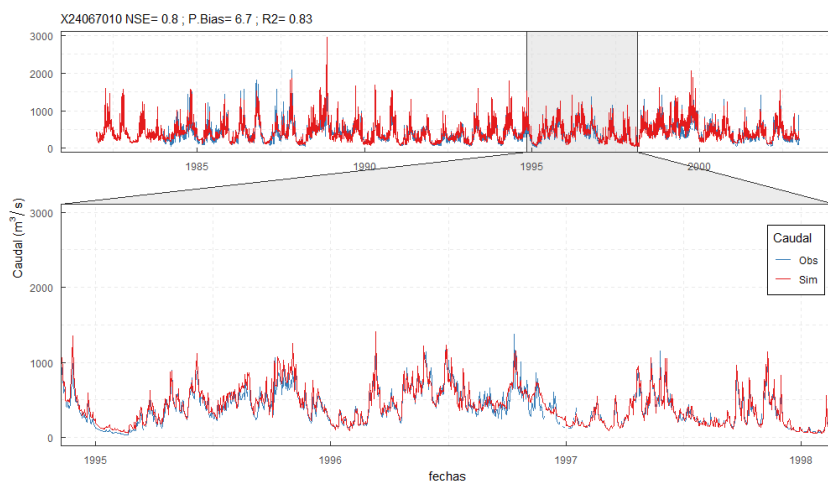


Figura 2.52 CDQ en la estación 23147040

EL TABLAZO (24067010)

La estación el tablazo en el río Sogamoso con registros hasta el año 2014 debido al llenado del embalse de Topocoro, es la estación localizada más aguas arriba del río por lo que sus registros incorporan las afluencias provenientes de los ríos Chicamocha y Suárez y lo transitado de las subcuencas altas de la SZH. El desempeño tanto en la calibración como en la validación de esta estación fue bueno con KGE por encima de 0.8 y NSE de 0.76. Esto es evidente en la comparación de las hidrógrafas diarias y mensuales presentadas en la Figura 2.53.

Al contrario de lo mencionado para las estaciones de los ríos Opón y La Colorada, los resultados de la simulación en esta estación sobreestiman los caudales observados en aproximadamente un 10%. De lo registrado en esta estación, la mayoría del flujo proviene de los registros de las estaciones EL JORDAN, SAN GIL y LA CEIBA AUT por lo que las incertidumbres y errores en la medición de caudales en estas estaciones son transmitidos directamente a las estaciones localizadas aguas abajo. Lo anteriormente mencionado puede ser causal de las sobreestimaciones apreciadas. Adicionalmente, es posible se estén realizando extracciones en los tramos de río comprendidos entre las estaciones mencionadas. No obstante, una sobreestimación de menos del 15% es considerada satisfactoria.



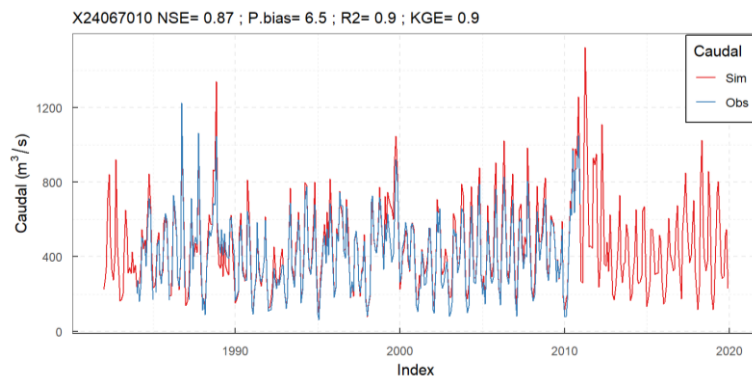


Figura 2.53 Hidrógrafas en la estación 24067010

El gráfico de dispersión muestra una muy buena correlación lineal de los caudales observados y simulados salvo algunos valores que en general se encuentran por encima de lo esperado. En la serie mensual se evidencia una buena reproducción del régimen mensual intra-anual, pero contrario a las estaciones anteriores, es posible observar una leve sobreestimación de los caudales base en periodos específicos de la serie.

Por último, en la CDQ de esta estación se puede ver que en general el modelo representa de buena manera los caudales medios, bajos y la mayor parte de los caudales altos (ver Figura 2.54). Sin embargo, la curva de duración de caudales es atemporal y el coeficiente de determinación para esta estación a resolución diaria fue de 0.82.

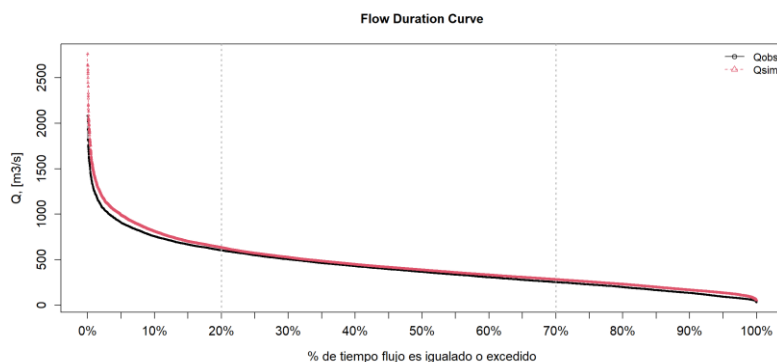


Figura 2.54 CDQ en la estación 24067010

PTE COMUNA (24057050)

Los resultados en la estación 24057050 fueron aceptables, pero no satisfactorios en las escala diaria tanto en calibración como en validación. En general no se encontró una correlación entre la precipitación registrada en la estación pluviométrica SAN VICENTE (24050060) localizada en la parte media de la cuenca del río Chucurí y los caudales observados, lo que deja en evidencia un déficit en la información de entrada que probablemente esté asociado a la serie de precipitación y a la calidad de la serie de caudales observados. Teniendo en cuenta que existe una estación de precipitación directamente en la cuenca y que esta fue utilizada en el proceso de interpolación para la creación del campo de lluvia, se considera que las falencias pueden obedecer a fallas en la medición del caudal por lo que se debe revisar con más detalle las mediciones de niveles y las curvas de calibración nivel- caudal en la estación PTE COMUNA.

Como se aprecia en la Figura 2.55, las hidrógrafas mensuales en general tienen un buen ajuste de los caudales mínimos y el tiempo de ocurrencia de los picos y valles. Para el periodo de validación se presenta una gran mejoría en las métricas mensuales, sin embargo, esto pudo estar influenciado por la baja cantidad de datos disponibles para el periodo analizado.

En lo que respecta a la CDQ se presenta una pendiente muy baja, poco característica de un río de montaña como el estudiado. A pesar de que se evidencia una buena correlación desde el Q100 hasta el Q10 (ver Figura 2.56) se debe considerar la atemporalidad de esta gráfica y que el coeficiente de determinación obtenido para los caudales diarios es de apenas 0.14 en calibración y 0.23 en validación.

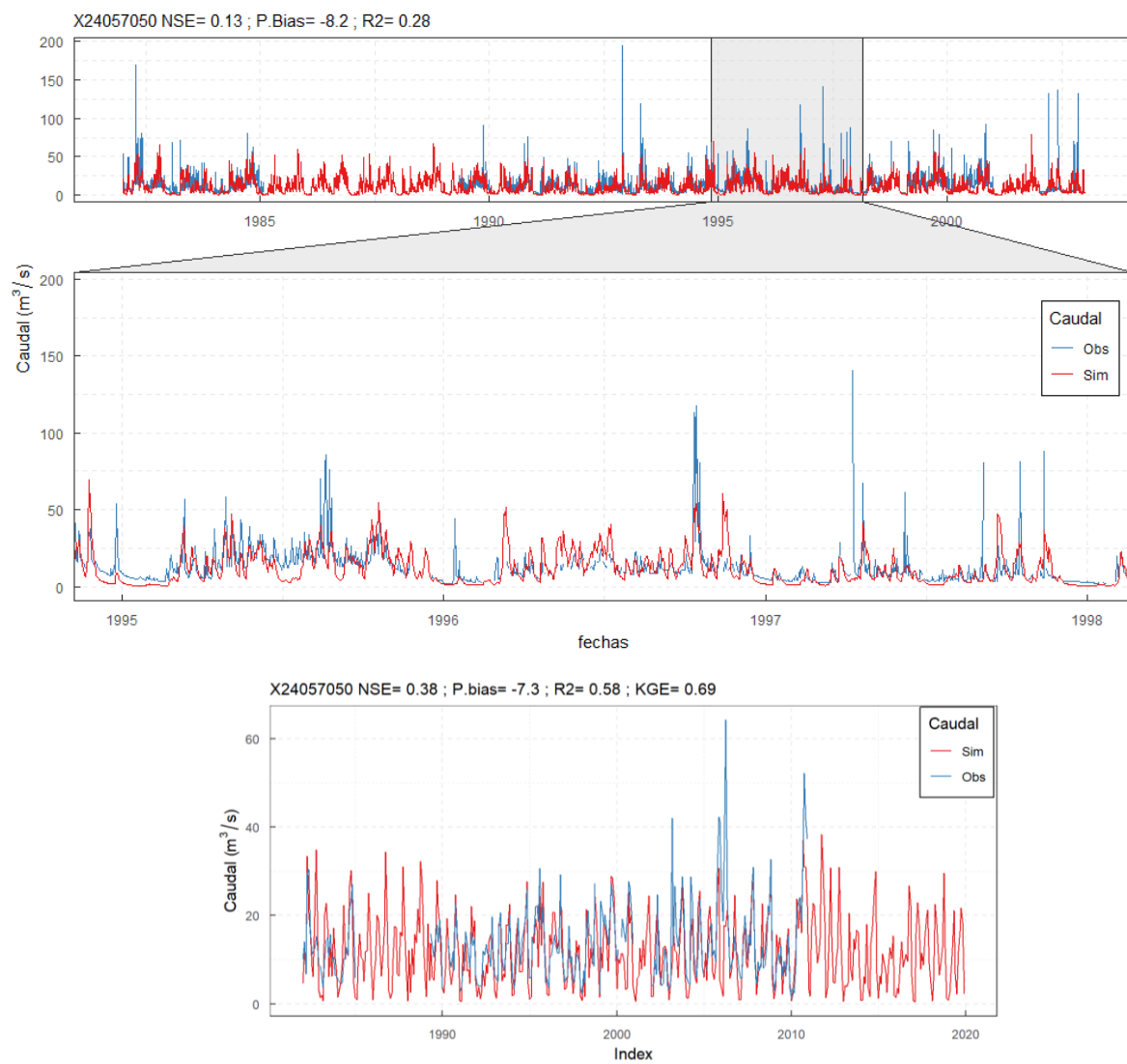


Figura 2.55 Hidrógrafas en la estación 24057050

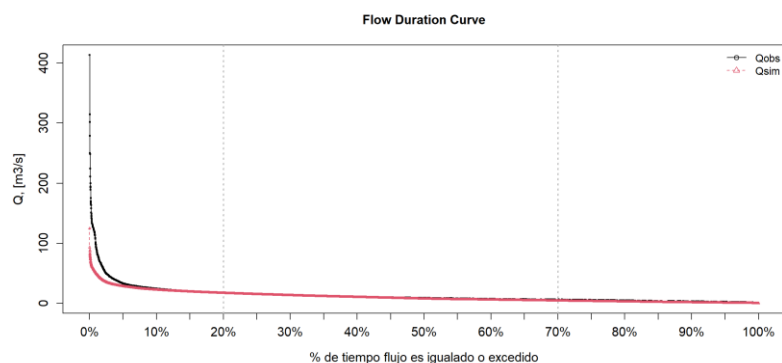


Figura 2.56 CDQ en la estación 24057050

PTE SOGAMOSO (24067020)

La estación 24067020 localizada en la parte baja del río Sogamoso registra el flujo de toda la Zona Hidrográfica del río Sogamoso. Para esta estación tanto a nivel diario como a nivel mensual se obtuvieron buenos resultados, lo cual también es evidente en las gráficas de las hidrógrafas generadas (ver Figura 2.57). Como se aprecia en las hidrógrafas diarias, en general se tiene una buena correspondencia entre lo simulado y lo observado. Sin embargo, se evidencian algunas desviaciones como la que se puede apreciar en los caudales base para el periodo 1999 -2010 en el cual son sobreestimados.

La condición anteriormente descrita se hace evidente de la misma manera en las hidrógrafas mensuales, solo que allí la sobreestimación además de en los caudales valles, también se presenta en los caudales pico. Lo anterior puede deberse a la no consideración de las infiltraciones que se pueden presentar desde el cauce principal del río Sogamoso hacia el subsuelo, lo cual puede llegar a ser considerablemente alto si se tiene en cuenta que el ancho medio del río es de aproximadamente 200 metros.

El diagrama de dispersión de los caudales muestra que dicha sobreestimación que se mide en aproximadamente un 16% se presenta en mayor medida en el rango de 400 a 900 m³/s, lo que corresponde a un rango de caudales medios.

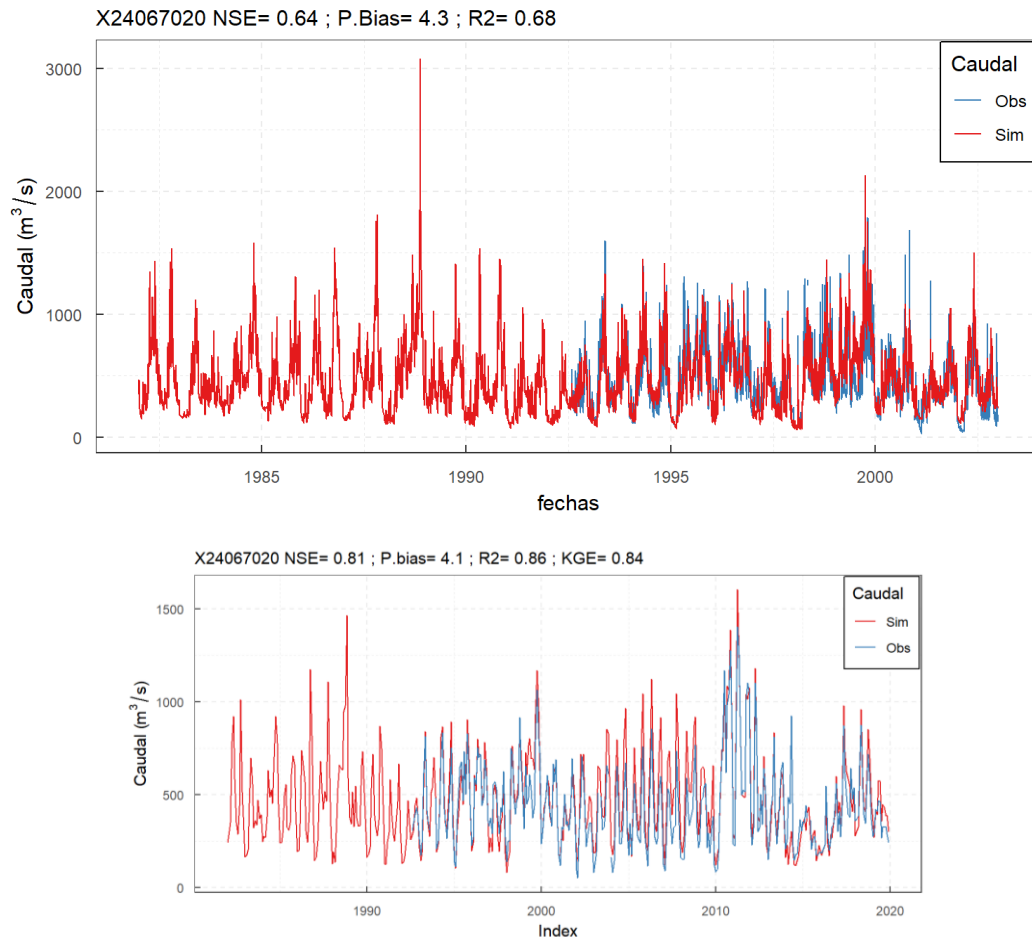


Figura 2.57 Hidrógrafas en la estación 24067020

Complementariamente la CDQ construida para esta estación muestra un ajuste satisfactorio en caudales bajos y la mayoría de los caudales altos, pero deja en evidencia la leve sobreestimación entre los caudales que son excedidos el 70% del tiempo y los que los excedidos el 10% del tiempo (ver Figura 2.58). No obstante, una sobreestimación inferior al 25 % en caudales diarios y mensuales según lo planteado por Moriasi et al., (2007) puede ser considera satisfactoria.

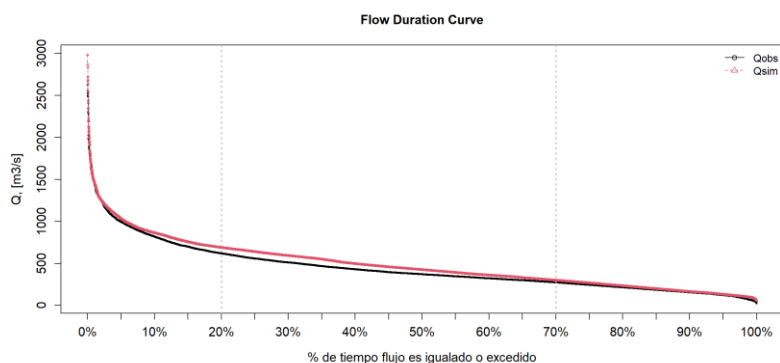


Figura 2.58 CDQ en la estación 24067020

Consideraciones y recomendaciones

En general se identificaron tres situaciones que se considera condicionan los resultados de la modelación y los valores de desempeño obtenidos. La primera de ellas está asociada con los campos de precipitación generados para el ingreso de estas series a cada una de las subcuencas de los modelos. Se considera que debido a la baja densidad de estaciones con registros de lluvia en las SZHs estudiadas, la interpolación realizada genera un suavizamiento excesivo de este proceso lo que impone un déficit de hídrico en la modelación que imposibilita que en muchos casos se llegue a los picos de caudal observados. La mezcla con datos de satélite mejoro el campo de precipitación y en consecuencia los desempeños del modelo en términos de caudal, pero no puede llevar todas las estaciones a desempeños buenos o muy buenos.

En segundo lugar, en cuanto a las series de caudal de las estaciones hidrométricas utilizadas para la modelación, se recomienda hacer un ejercicio exhaustivo en la revisión de las curvas de calibración debido a que las dinámicas fluviales y el comportamiento no estacionario de los ríos puede llevar a errores asociados a cambios de la sección de aforo no identificados a tiempo. Adicionalmente, se desconoce el rango de caudales realmente aforados en las estaciones, por lo que una cantidad de los caudales pico existentes en la serie se considera pueden corresponder a extrapolaciones de la curva, que incrementan considerablemente la incertidumbre asociada a estos al no necesariamente corresponder a las condiciones naturales de la climatología y geomorfología del río.

Finalmente, se resalta que la parte baja de las SZH, en especial las subcuencas aguas abajo de las estaciones de caudal utilizadas para el análisis, presentan un comportamiento muy complejo debido a las interacciones mayoritariamente hidráulicas entre las ciénagas y ríos o caños. Dichas interacciones no fueron consideradas en la modelación hidrológica en gran parte debido a que no existen estaciones de niveles o caudales con registros consistentes que permitan la calibración de estas. Por lo anterior, las estimaciones de oferta hídrica carecen de calibración y el tránsito generado por el modelo SWAT puede distanciarse en gran medida de la realidad. La oferta y regulación hídrica estimadas deben analizarse bajo estas consideraciones y se recomienda la realización de ejercicios de modelación acompañados de mediciones que permitan obtener una mejor representación de estas interacciones y así mismo la oferta y regulación asociada a estos cuerpos hídricos.

2.3.3. Evaluación de la incertidumbre

En esta sección se hace un recuento de las principales fuentes de incertidumbre que se considera inciden directamente en los resultados obtenidos, con el fin de que estas sean consideradas al momento de interpretar los resultados presentados.

Según Montanari, Shoemaker, & Van De Giesen (2009) la incertidumbre es un producto de la falta de comprensión de los fenómenos hidrológicos y procesos involucrados; esta puede surgir de cuatro fuentes: La aleatoriedad propia de las variables climáticas; El error estructural de los modelos que le impide reproducir con precisión el comportamiento real de los sistemas; El error asociado a los parámetros del modelo; y el error de los datos de entrada utilizados. Se puede clasificar las fuentes de incertidumbre como acotadas y las no acotadas. Las acotadas se refieren al sistema sobre el cual todos los posibles resultados se conocen o pueden ser tratados a través de probabilidades, y las no acotadas se refiere a aquellos en los que los resultados no se conocen.

La incertidumbre asociada al error en los parámetros del modelo y sus efectos en la modelación puede ser estimada con relativa facilidad; así mismo la asociada al error en los datos de entrada, sobre la cual ya se realizaron consideraciones en la anterior sección. Con base en lo anterior en esta

sección se darán las consideraciones sobre la incertidumbre asociada a los parámetros del modelo SWAT.

La incertidumbre paramétrica puede ser representada mediante intervalos de confianza, estos se construyen definiendo unos límites de confianza, usualmente el 5 y 95%, sobre la variable de salida del modelo implementado. El algoritmo SUFI-2 disponible en la herramienta SWAT-CUP como una aproximación estocástica a la calibración reconoce la incertidumbre en el trabajo de modelación e intenta capturar alguna medida dicha falta de conocimiento. Para ello se busca que las simulaciones que generan la banda de confianza envuelvan a las observaciones en la mayor medida posible. Lo anterior es medido a través de dos simples métricas: en primer lugar, el factor P correspondiente al porcentaje de datos observados que se encuentran dentro de los intervalos de confianza y en segundo lugar el factor R correspondiente al ancho de las bandas (K. C. Abbaspour, Johnson, & van Genuchten, 2004).

El concepto del análisis de incertidumbre de SUFI-2 es representado gráficamente en la Figura 2.59. Allí se evidencia que un valor de parámetro único (a) conduce a una respuesta de modelo única, mientras que la propagación de la incertidumbre en el mismo parámetro (línea) conduce a la 95PPU ilustrada por la región sombreada (b). En la medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre de salida también aumenta (c). (Karim C. Abbaspour, 2015)

La bondad del ajuste y el grado en que el modelo calibrado tiene en cuenta las incertidumbres paramétricas se evalúa mediante las dos métricas anteriores. El valor del factor P varía entre 0 y 1, mientras que el factor R varía entre 0 e infinito. Un factor P de 1 y un factor R de 0, indican que los resultados de la simulación corresponden exactamente a los datos medidos.

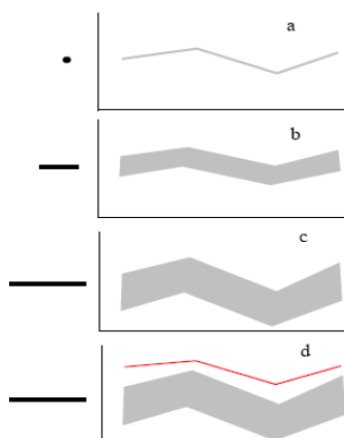


Figura 2.59 Esquemización del enfoque del SUFI-2. Tomado de: Karim C. Abbaspour, (2015)

Con base en lo anterior se utilizó el SUFI-2 para la determinación de la incertidumbre asociada a los parámetros utilizados en la calibración del modelo, a partir de la estimación de las bandas de incertidumbre de las simulaciones en un rango ampliado de los parámetros óptimos encontrados en el proceso de calibración. A continuación, se presentan los resultados del factor P y factor R estimado en cada una de las estaciones contempladas en la modelación.

2.3.3.1. Resultados de la evaluación de incertidumbre en la SZH del río Lebrija

La Figura 2.60 muestra un ejemplo de las bandas de confianza del 95% central de 1550 simulaciones realizadas en el espacio parametral que superaron el umbral definido para simulaciones comportamentales. Se puede ver como la mayor variación producida por el cambio en los parámetros se encuentra en los flujos base y un poco en los picos (esto también sucede en las demás estaciones, en algunas en menor medida). En la figura se resalta la mejor simulación obtenida en las simulaciones, que es distinta a la conseguida con el algoritmo PSO, no es la intención con el algoritmo SUFI2 alcanzar el mejor desempeño. Se puede también ver que la incertidumbre paramétrica no puede reducir la incertidumbre en las entradas del modelo; las simulaciones que componen las bandas en algunos casos no presentan picos de simulación cuando se presentaron picos de caudal, indicando que no se registraron datos de lluvias en algunos

intervalos de tiempo. Por otra parte, se observa que las bandas tienden a envolver más las curvas de recesión que los picos de caudal, resultado que puede darse por haber limitado el espacio parametral a la zona cercana a simulaciones con un alto valor de desempeño.

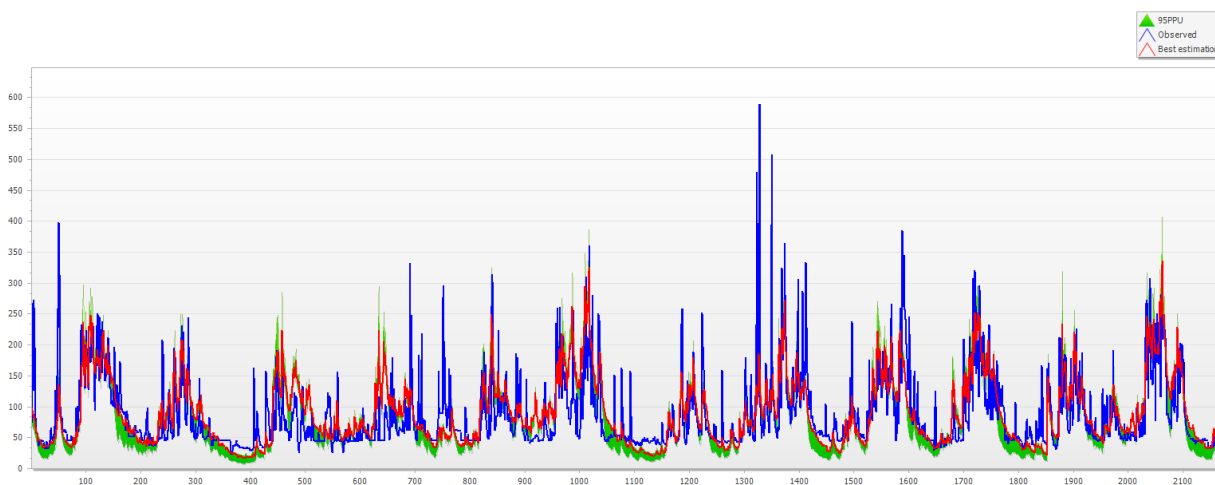


Figura 2.60 Detalle de las bandas de confianza del 95% para la estación San Rafael

En la Tabla 2.23 se indican algunas métricas relacionadas con la incertidumbre estimada por las bandas de confianza. Allí se puede apreciar que el porcentaje de cubrimiento no es elevado debido a que se realizó el análisis sobre un espacio parametral reducido. Se resalta que las estaciones con mayor cubrimiento fueron aquellas con mejores desempeños en la calibración y validación. Esto indica que el rango parametral escogido es suficientemente robusto para no solo contener la respuesta escogida para la estimación de los flujos (aquella con los parámetros escogidos para ser fijados), sino también para tener en cuenta las variaciones de aquellos parámetros que tuvieron una incertidumbre mayor por no evidenciar un valor claro en los dotted plots (ver Figura 2.25). Estaciones ejemplo de esto son Café Madrid, Colombia y San Rafael. Los factores de anchura de la banda en muchos casos son bastante bajos (el factor de ancho es el ancho de la banda normalizado por la desviación estándar de las observaciones), lo cual sería muy buen si el porcentaje de cubrimiento fuera elevado; en este caso los valores son reducidos debido a que el espacio parametral muestreado también se redujo. Se resalta que tanto el ancho medio, cómo el

máximo y el mínimo se relacionan con el tamaño de la corriente, a mayor caudal promedio en el cauce mayor son los anchos de las bandas. Los valores del espacio parametral muestreado se anexan a este documento, así como los valores del límite superior y del inferior de las bandas para cada estación.

Estación	Código	% Cubrimiento	Factor de ancho	Ancho Medio (m ³ /s)	Ancho Máximo (m ³ /s)	Ancho Mínimo (m ³ /s)
El Hoyo	23197410	0.2	0.23	4.75	38.05	0.30
San Rafael	23197370	0.42	0.4	25.08	128.41	6.19
Puente Sardinas	23197130	0.34	0.44	1.23	6.35	0.26
Puente Panega	23197270	0.28	0.27	0.43	3.50	0.09
La Chocóa	23187040	0.12	0.07	0.54	4.62	0.05
Tamarindo	23187240	0.19	0.16	0.30	2.80	0.02
Café Madrid	23197290	0.46	0.62	5.73	55.04	1.95
Colombia	23197680	0.43	0.3	1.26	22.22	0.35
La Esperanza	23197460	0.24	0.29	0.15	3.01	0.03

Tabla 2.23 Métricas de incertidumbre de las simulaciones de caudal en la SZH del río Lebrija

Estos resultados resaltan que, a pesar de las falencias que se puedan presentar en la simulación con los parámetros escogidos, los estimados de caudal están lo suficientemente cerca de los observados. Por tanto, pueden usarse con cautela para estimar los flujos hídricos en la SZH teniendo en cuenta que estas bandas y valores indicados se encuentran alrededor de los valores estimados con los parámetros escogidos para ser fijados. Se debe resaltar que los flujos en las subcuencas que se encuentran aguas abajo de la estación San Rafael y El hoyo no se encuentran directamente calibrados y por tanto su incertidumbre será mayor y no puede ser estimada directamente con registros de caudal.

2.3.3.2. Resultados de la evaluación de incertidumbre en la SZH del río Opón y Sogamoso

Como se aprecia en la Tabla 2.24 el factor P indicativo del porcentaje de cubrimiento de los valores observados por las bandas, en la mayoría de las estaciones ronda el 47%, estos bajos porcentajes de cubrimiento se deben a que el análisis se realizó en un rango reducido de los parámetros. En este análisis no necesariamente las estaciones con mayor cubrimiento, como el caso de la estación puente ferrocarril, corresponden a las estaciones con mayor desempeño en las etapas de calibración. Esto puede deberse a que el aumento en la incertidumbre de los parámetros no necesariamente es lineal al aumento de la incertidumbre de salida del modelo (95PPU) (Karim C. Abbaspour, 2015).

Tabla 2.24 Resultados evaluación de la incertidumbre SUFI-2

Estación	Código	Corriente	N° Simulaciones SUFI-2	Factor P	Factor R
Pte Sogamoso	24067020	Río Sogamoso	1200	0.29	0.25
El Tablazo	24067010	Río Sogamoso	1200	0.48	0.22
Pte Comuna	24057050	Río Chucurí	1200	0.46	0.33
Ayacucho	23147040	Río La Colorada	1200	0.47	0.42
Pte Ferrocarril	23147020	Río Opón	1000	0.51	0.45

En lo que respecta al factor R correspondiente al ancho de la banda normalizado por la desviación estándar de las observaciones, es bastante bajo en estaciones como el Tablazo y Puente Sogamoso, lo que se considera bueno en caso de que el factor P sea muy alto, en este caso los valores son bajos debido a la reducción en el espacio parametral. Por el contrario, en las estaciones Ayacucho y Pte Ferrocarril con valores altos del factor R implican que se debe aumentar en exceso la incertidumbre de los parámetros para tener un cubrimiento satisfactorio de los valores observados. En la Figura 2.61 se muestra el ejemplo de las bandas de confianza del 95% construidas a partir de 1000 simulaciones realizadas para El río Opón en el rango parametral establecido con base en los resultados del proceso de calibración. En esta se aprecia como las variaciones más significativas debido al cambio de los parámetros se reflejan en cambios en el caudal base y muy poco en los picos más altos, con lo que se evidencia que existen incertidumbres más allá de los parámetros, como la ausencia de una muy buena representación espacial y temporal de la lluvia. La línea roja

de la mejor estimación no necesariamente corresponde a la obtenida mediante el algoritmo PSO, sino que corresponde a la mejor de las simulaciones realizadas con el SUFI-2.

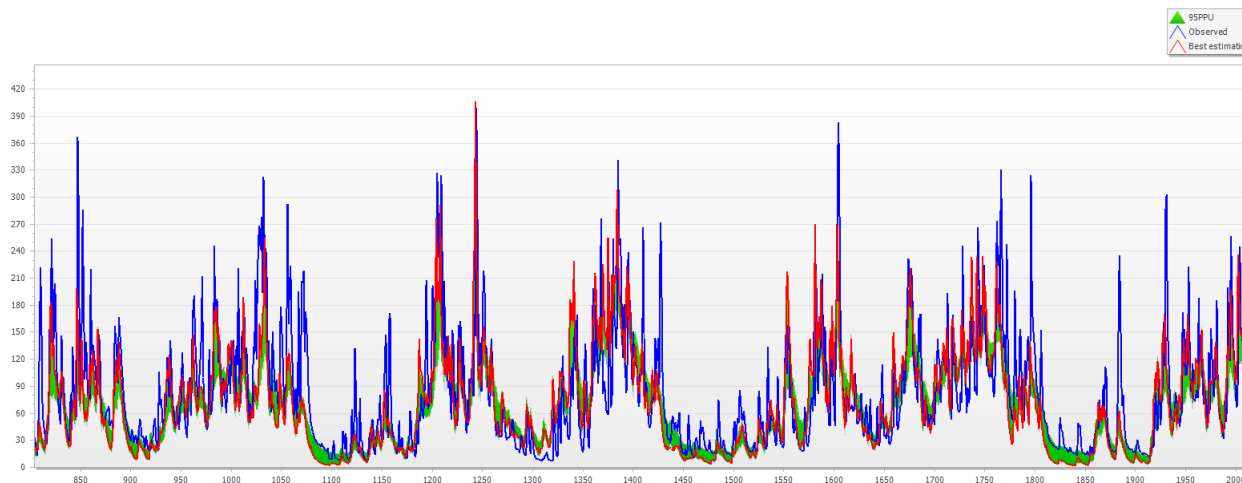


Figura 2.61 95PPU para la estación PTE FERROCARRIL

En conclusión, a pesar de las desviaciones observadas en los caudales simulados respecto a las observaciones, los parámetros escogidos como óptimos generan resultados satisfactorios al encontrarse bastante cerca de los observados, por lo que el modelo podría utilizarse para la simulación de los procesos hidrológicos en las SZHs estudiadas teniendo en cuenta las limitaciones. Adicionalmente, es posible que se logre una mejora en el desempeño de los modelos al tener una mejor información de entrada.

2.4. Posibles escenarios de caudal a 5 y 10 años

Con el objetivo de caracterizar los posibles eventos de estiaje y alta disponibilidad del recurso, se pretende realizar un análisis estadístico de las series para prever las posibles condiciones extremas a cinco y diez años. Debe recalcar que los resultados de este análisis se basan en la climatología ingresada al modelo, transformada a escorrentía y posteriormente a caudal, y en consecuencia corresponde a las condiciones de la normal climatológica actual. En consecuencia, este análisis *NO* es un estudio de escenarios de cambio climático debido a que no se cambia la climatología ingresada al modelo, condición que implica primero realizar un “downscaling” de las proyecciones

del IPCC para generar un estimado de la climatología y variabilidad climatológica futura y posteriormente evaluar los impactos a través de la modelación (Arora, 2002) (Kolokytha, Oishi, & Teegavarapu, 2017).

El análisis consiste en estimar el periodo de caudales con mayores y menores volúmenes, para las dos ventanas de tiempo mencionadas (cinco y diez años). Es decir, con los promedios móviles centrados de 5 y 10 años, se puede identificar el punto central con mayor o valor caudal promedio.

2.4.1. Subzona hidrográfica del río Lebrija

En la Figura 2.62 se puede ver que en periodos de 5 años el caudal promedio presenta cambios importantes y que hacia el final del periodo se ha ampliado el rango en el cual han variado los caudales (esto puede ser producto de la variabilidad climática o a cambio climático, pero se requieren estudios más detallados para saber su origen). Se identifica un periodo de 5 años centrado hacia finales de 2009 como el más húmedo ocurrido en el periodo 1982 a 2019, mientras que el periodo más seco se centra hacia finales de 2014 y cabe resaltar que los periodos logran sobreponerse en unos días para este caso particular. Estos periodos se explican debido a los fenómenos de la Niña de 2010-2011 y al de el Niño de 2015-2016. Los caudales que generan ese periodo más húmedo y el más seco se pueden ver en la Figura 2.63 para la desembocadura del río Lebrija en el río Magdalena, donde se ve que no solamente el año 2010 y 2011 tuvieron altos valores de caudal, sino que también el año 2008 presento temporadas invernales bastante extendidas.

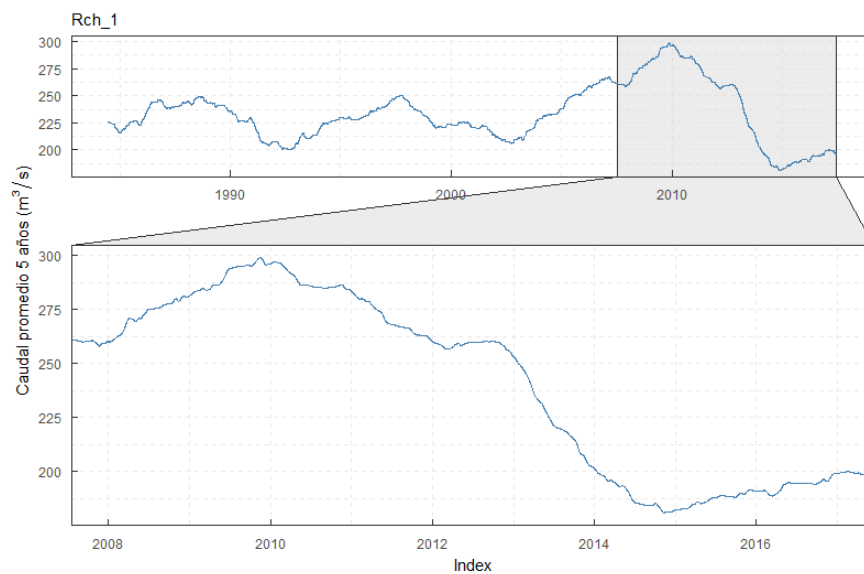


Figura 2.62 Media móvil de 5 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija

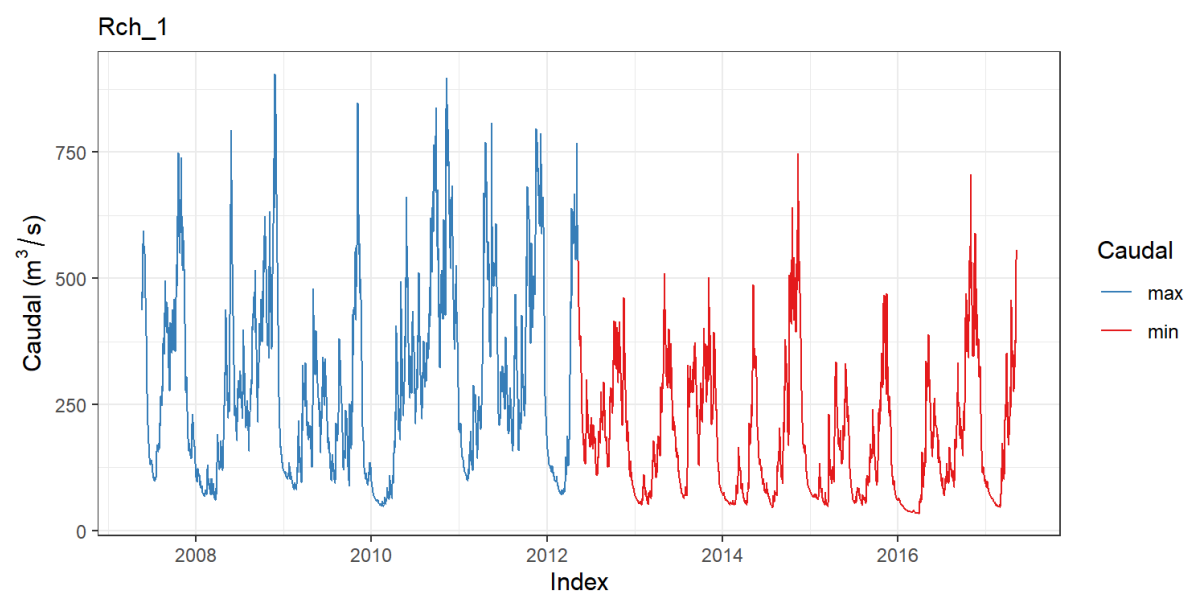


Figura 2.63 Series de caudales para el periodo más húmedo y seco de 5 años

Este mismo procedimiento se realizó con ventanas de una década, encontrando que también se presentan cambios, pero no se identifican ciclos tan claros. En la Figura 2.64 se puede ver que el primer tercio del periodo de estudio tiene un comportamiento relativamente estable entre los 225 y

los 230 m³/s, con algunas reducciones y ascensos no significativos. Sin embargo, desde mediados de la década de los 2000 se presentó un ascenso consistente que se mantuvo hasta casi llegar al 2012 que se debió a varios fenómenos de la Niña registrados en 2007-2009 y la Niña de 2010-2011 (en varios de estos periodos no se registró el veranillo de mitad de año). Los periodos de 10 años tienen en algunos casos un traslape mayor entre aquella década identificada como la más húmeda y la más seca (lo cual se puede ver en las gráficas de 10 años anexas), pero en prácticamente todos los canales simulados, el periodo más húmedo contuvo a los fenómenos de la Niña mencionados.

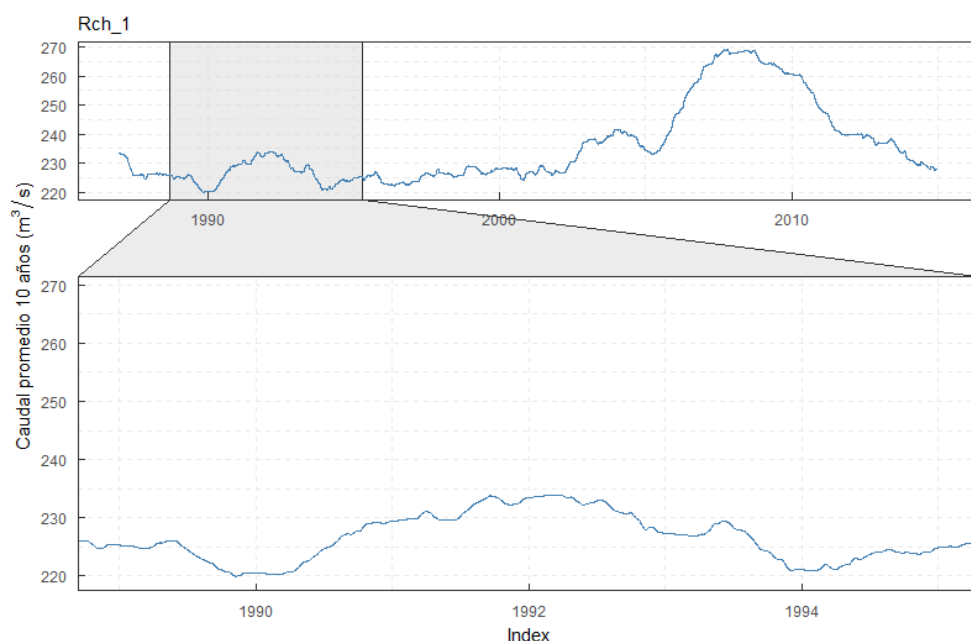
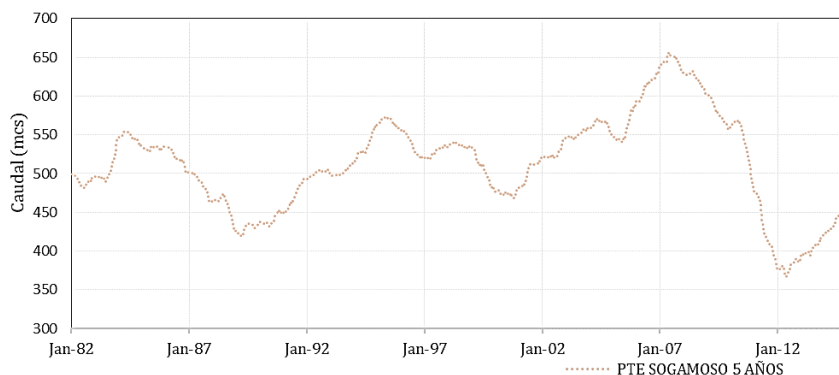


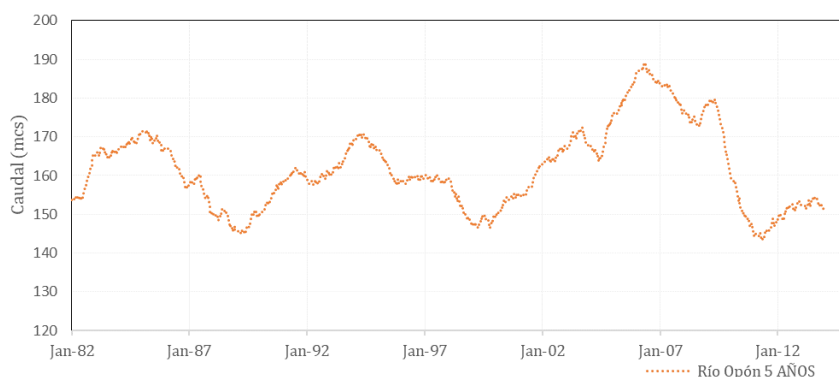
Figura 2.64 Media móvil de 10 años del caudal en la desembocadura del río Lebrija

2.4.2. Subzonas hidrográficas de los ríos Opón y Sogamoso

En la Figura 2.65 se presenta la media móvil estimada para las series de caudales en la desembocadura de los ríos Opón y Sogamoso al río Magdalena en la ventana de 5 años. Estas gráficas son representativas del comportamiento de toda la SZH asociada, por lo que los periodos identificados pueden ser replicados en cualquiera de los ríos al interior de las SZH.



a) Río Sogamoso



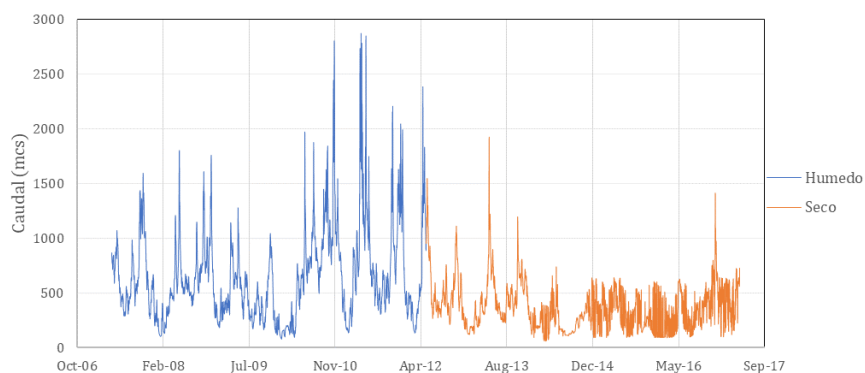
b) Río Opón

Figura 2.65 Media móvil de caudal simulado en ventanas de 5 años

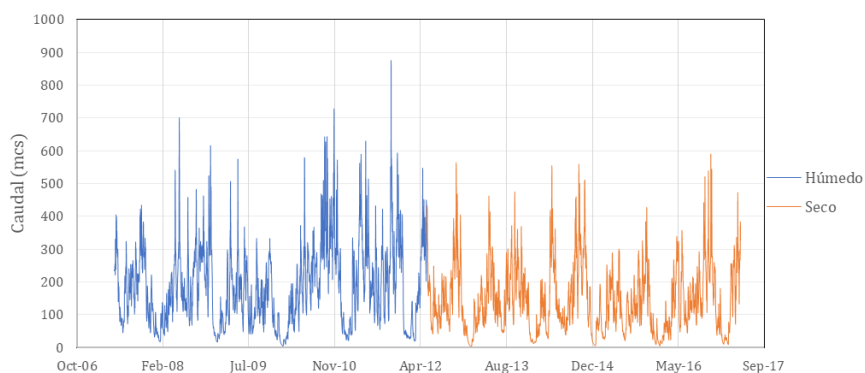
Como se aprecia en la Figura 2.65 para las dos SZHs el periodo identificado como húmedo inicia en el año 2007 y se extiende hasta el 2012. Este periodo se debe a la ocurrencia del fenómeno de La Niña 2010-2011 el cual se encuentra categorizado como fuerte. En lo que respecta al periodo más seco, este se identificó inmediatamente posterior al escenario húmedo iniciando en el año 2012 y extendiéndose hasta el año 2017 sobreponiéndose en unos cuantos días los dos escenarios. Durante este periodo más seco se tuvo el fenómeno del Niño 2015-2016.

En la Figura 2.66 se presentan las hidrógrafas de caudales asociadas a cada uno de los escenarios en los periodos identificados, en estas es evidente el incremento de las afluencias durante el periodo bajo la influencia del fenómeno de La Niña 2007-2008 y 2010-2011. Este incremento es evidente no solo en la ocurrencia de caudales máximos sino que también se aprecia el incremento de la

media y el caudal base registrados. Para la SZH del río Sogamoso el decremento en las afluencias para el escenario seco se ve influenciado tanto por la ocurrencia del fenómeno del niño 2015-2016, como por la regulación impuesta por la entrada en operación del embalse.



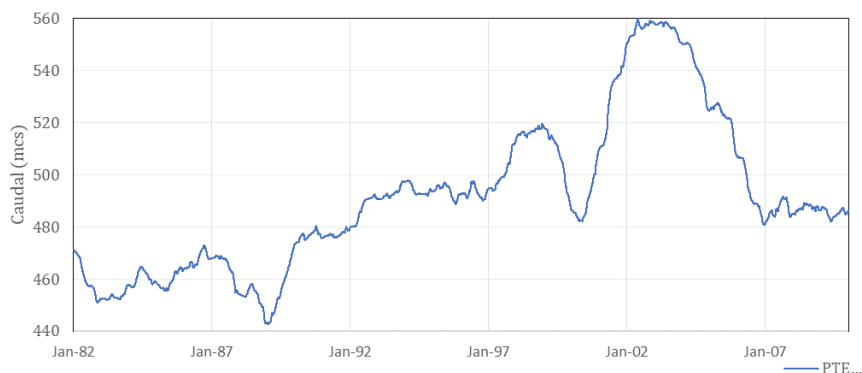
a) hidrógrafas escenarios río Sogamoso



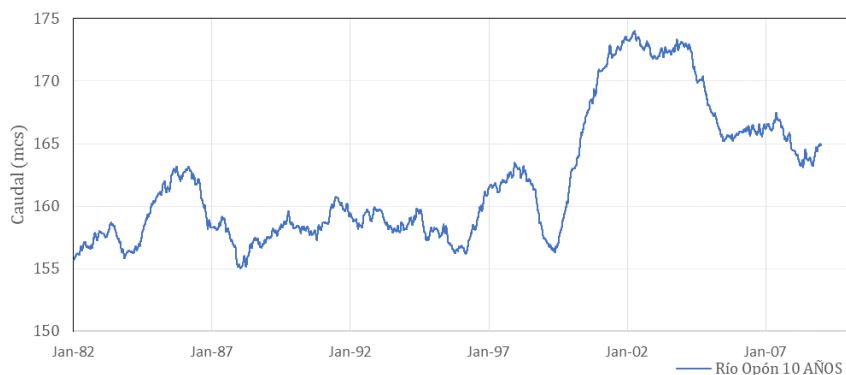
b) hidrógrafas escenarios río Opón

Figura 2.66 Hidrógrafas escenarios húmedo y seco de 5 años

En cuanto los escenarios de 10 años continuos se siguió el mismo procedimiento aplicando una ventana en la media móvil de 10 años, las gráficas de la media móvil para las series de caudal en la desembocadura de los ríos Opón y Sogamoso son presentados en la Figura 2.67. En ellas es posible identificar un incremento en la media de caudal que se estuvo presentando constantemente hasta el año 2012.



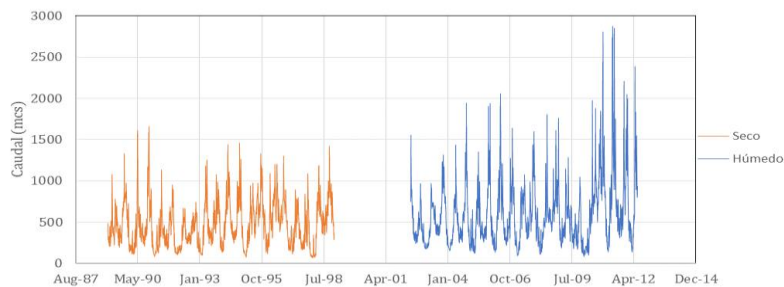
a) Media móvil río Sogamoso



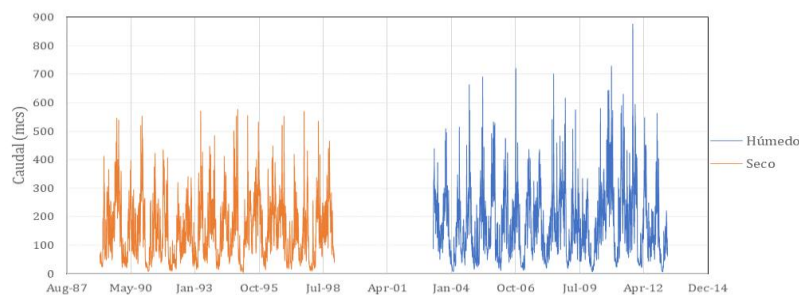
b) Media móvil río Opón

Figura 2.67 Media móvil de las series de caudal en ventana de 10 años

El periodo 2002-2012 fue seleccionado para el escenario húmedo en las dos SZHs, mientras que para el escenario seco se identificó el periodo 1989 – 1999 en cual se presentaron los fenómenos del Niño 1991-1992 y 1997-1998. Las hidrógrafas para los escenarios húmedo y seco en cada uno de los ríos son presentadas en la Figura 2.68.



a) Hidrógrafas río Sogamoso escenarios seco y húmedo



b) Hidrógrafas río Opón escenarios seco y húmedo

Figura 2.68 Hidrógrafas para escenarios de 10 años

La diferencia en la media del escenario húmedo y seco para el río Sogamoso es de $116 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que equivale a un 20% menos. En lo que respecta al río Opón la diferencia de la media es de tan solo 10%, pero el caudal máximo registrado se reduce en aproximadamente $300 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Tabla 2.25 se presentan estadísticos descriptivos para cada uno de los escenarios en las dos ventanas de tiempo.

Tabla 2.25 Estadísticos descriptivos escenarios de caudal .

Corriente	Escenario	5 años				10 años			
		Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Río Opón	húmedo	188.80	875.40	5.32	123.40	174.01	875.40	5.32	117.71
	seco	143.54	586.40	5.58	99.62	155.00	576.80	5.01	102.11
Río Sogamoso	húmedo	652.70	2870.00	80.42	414.72	587.15	2870.00	80.42	370.99
	seco	368.50	1926.00	80.42	433.96	470.22	1657.00	65.55	265.94
Los valores presentados corresponden a caudales en metros cúbicos por segundo.									

3. Indicadores hídricos

En este capítulo se presentan los indicadores hídricos dependientes de la oferta hídrica obtenidos según la estrategia de modelación adoptada y explicada en el capítulo 2. Además, se presenta la estimación del componente hídrico del caudal ambiental para las unidades de análisis.

3.1. Oferta hídrica total superficial

Para determinar la Oferta Hídrica Total Superficial (OHTS) se definen unidades de análisis, que en el caso del acuerdo AC 04 corresponden a un nivel subsiguiente a las subzonas hidrográficas (ver numeral 1.5) y una resolución temporal anual. La OHTS está determinada por el ciclo hidrológico en cada unidad de análisis, por lo tanto, es el ciclo hidrológico y su distribución espacio – temporal la que define los aspectos conceptuales de la OHTS.

3.1.1. Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija

A continuación, se caracteriza el estado de la OHTS con la información proveniente de la modelación hidrológica en los tramos, subcuencas modeladas y unidades de análisis.

3.1.1.1. *Variación espacio – temporal de los caudales*

Dentro de la SZH del río Lebrija y otros directos al Magdalena [2319] se reportan un gran rango de caudales. Esto se debe a la acumulación del flujo de escorrentía que se genera en la cuenca y que ha sido estimada en otros estudios en el rango entre 800 y 1000 mm/año, lo que equivale aproximadamente a 9621 Mm³ (IDEAM, 2019) (Duque Gardeazabal, 2021). No obstante, dentro de la SZH existen variaciones de la escorrentía y en consecuencia del caudal registrado en estaciones. En la Tabla 3.1 se muestran los valores del caudal medio anual multianual y del volumen anual multianual que se estimó en algunos de los tramos de importancia dentro de la SZH.

Tabla 3.1 Caudales anuales multianuales en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	Q (m³/s)
Rch 1	Río Lebrija Desembocadura Magdalena	216.4
Rch 93	Río de Oro Desembocadura en río Lebrija	17.5
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo Desembocadura en río Lebrija	22.8
Rch 121	Quebrada La Gomez Desembocadura en la ciénaga de Paredes	16.8
Rch 51	Río Cachirí Desembocadura en el río Lebrija	17.2
Rch 52	Quebrada la Santa Desembocadura en ciénaga La Tigra	10.1

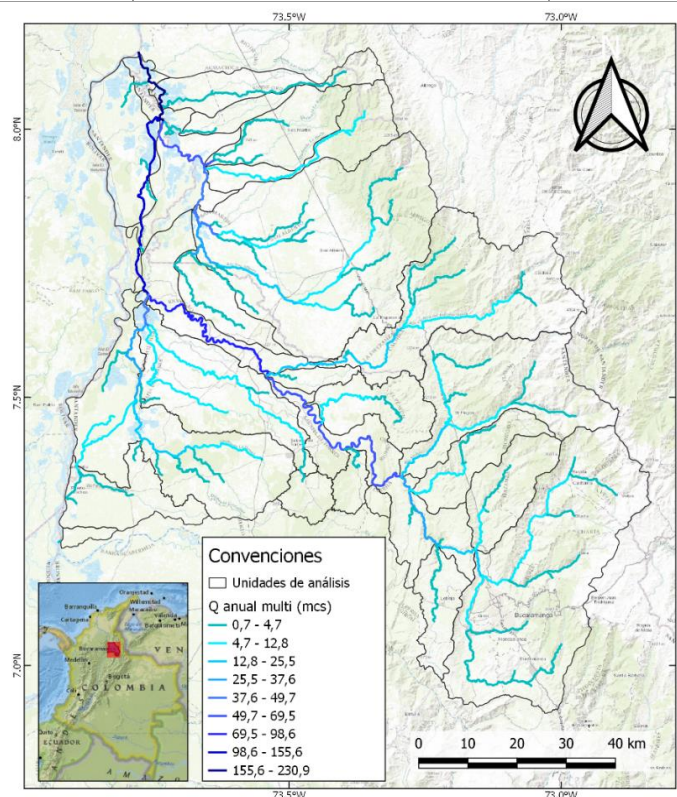


Figura 3.1 Caudal anual multianual en los canales simulados para la SZH del río Lebrija

En el Figura 3.1 se puede ver la ubicación de las estaciones y con la indicación del valor del caudal anual multianual registrado. Es claro que a medida que se acumula el flujo la cantidad del caudal va aumentando debido a que no se identificaron zonas donde se infiltrara el caudal por el lecho del río. Sin embargo, es bueno resaltar que considerando el tamaño de las subcuencas del río Cáchira este transporta bastante agua (en comparación con los demás canales de la SZH).

Con respecto a la variación intraanual de los caudales, se debe resaltar que todos los canales de la cuenca presentan un ciclo bimodal con periodos altos en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre. En la Figura 3.2 se muestra esa variación para el canal del río Lebrija que desemboca en el río Magdalena. Este comportamiento concuerda y es producto del régimen climatológico de la zona, que ya ha sido identificado y estudiado anteriormente (Arias, y otros, 2021). En algunos canales el veranillo de mitad de año es más marcado que en otras zonas, dicho veranillo en otras subcuencas no reduce su caudal drásticamente en dicho veranillo (principalmente en algunas subcuencas del sur occidente y en algunas del nororiente).

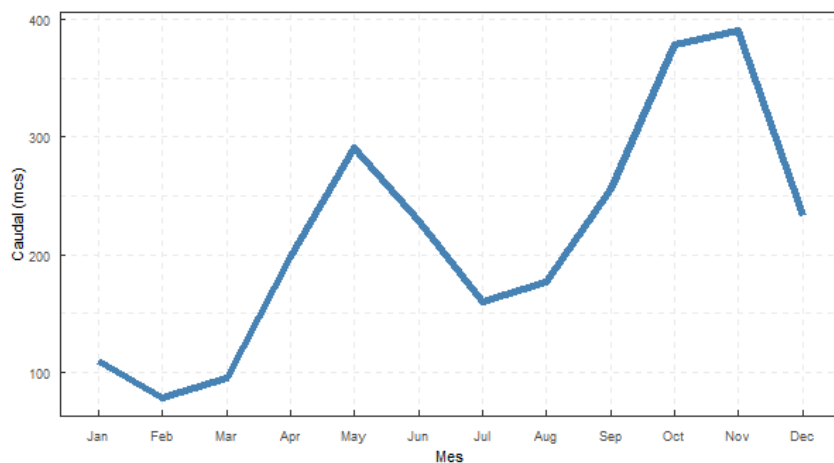


Figura 3.2 Variación intraanual de los caudales para el canal del río Lebrija que desemboca directamente al río Magdalena

Por otra parte, la variación inter-anual debe estudiarse debido a que su origen es la variabilidad climática, y recientes estudios alertan sobre la importancia de su caracterización con propósitos de gestión (Arias, y otros, 2021). De los fenómenos océano atmosféricos que más influye sobre la región del VMM, el ENSO (El Niño Southern Oscillation) es quizás el más importante y estudiado. Sus efectos radican en una intensificación o decaimiento de los valores promedio mensuales de

lluvia y caudal. Se presenta a continuación esa variación que, al igual que con la oferta anual y la variación estacional se realiza sobre los registros de las estaciones de caudal.

Tomando en cuenta la importancia de estos fenómenos, se ha desarrollado a partir de las simulaciones una caracterización de esa variabilidad mensual de los caudales. Para cada canal simulado se determinó el coeficiente de variación (CV), de cada mes con las series de tiempo de los caudales mensuales. Igualmente se hallaron y plasmaron en las gráficas los percentiles 0 %, 10%, 50%, 90% y 100% de la misma variable con lo que se pudo evidenciar los rangos de cambio de la variable. En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo del análisis realizado para todas las estaciones. Se puede ver también en las imágenes los valores registrados para el año de 1992, un año considerado de afectación debido al fenómeno de El Niño, en el que se evidencia que los caudales en muchos de los meses se encontraron cercanos a los mínimos del periodo de estudio. En este caso particular solo los meses de enero y diciembre registraron valores de caudal cercanos al valor mediano de esos meses. Los meses de marzo-abril y agosto-septiembre son para este caso los meses con mayor CV y por tanto los meses donde más probablemente se presenten caudales alejados del promedio multianual (superan el 40% que ya se considera alto).

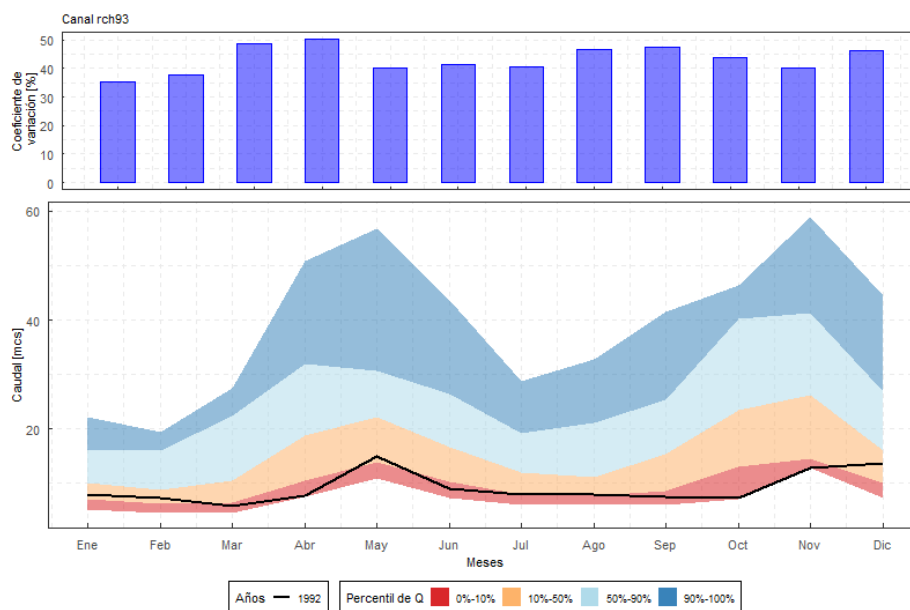


Figura 3.3 Variabilidad de los caudales simulados clasificados por mes para la desembocadura del río de Oro en la SZH del río Lebrija

3.1.1.2. Variación espacio – temporal de la escorrentía en las unidades de análisis

Se describe a continuación la escorrentía y los volúmenes generados en cada unidad de análisis definida para presentar los resultados, así como en las subcuencas utilizadas para la modelación. Se debe hacer la aclaración que los valores que se post-procesaron de los resultados arrojados por el aplicativo SWAT fueron los correspondientes a la “*producción de agua*” (WYLD), debido a que el aplicativo integra varios flujos que terminan aportando al flujo superficial que llega a los canales. Esto es concordante con la definición de OHTS porque, aunque cierta cantidad de este flujo se ha infiltrado, corresponde al flujo que vuelve a salir a la superficie en un periodo corto de tiempo y termina concentrándose en flujos en cauces y/o almacenándose en cuerpos lénticos.

En la Figura 3.4 se muestra la escorrentía en las subcuencas modeladas, aquellas que se encuentran en la zona sur oriental tienen una menor escorrentía y las del sur occidente las de mayor valor. Se resalta que algunas subcuencas del nororiente, en la zona del río Cáchira y específicamente en el río San Alberto, presentan una alta escorrentía en comparación con sus alrededores (los valores individuales y archivos geográficos se anexan a este documento). Con respecto a la oferta en términos de volumen, se muestra en la Tabla 3.2 y en la Figura 3.5 los valores para las 24 unidades de análisis en conjunto con la escorrentía ponderada para la cada unidad. Se puede ver que a mayor área de la unidad es mayor el valor de la OHTS, siendo la parte baja del río Cáchira la que tiene mayor volumen. El total de la oferta hídrica en volumen anual es de 7461.4 Mm³.

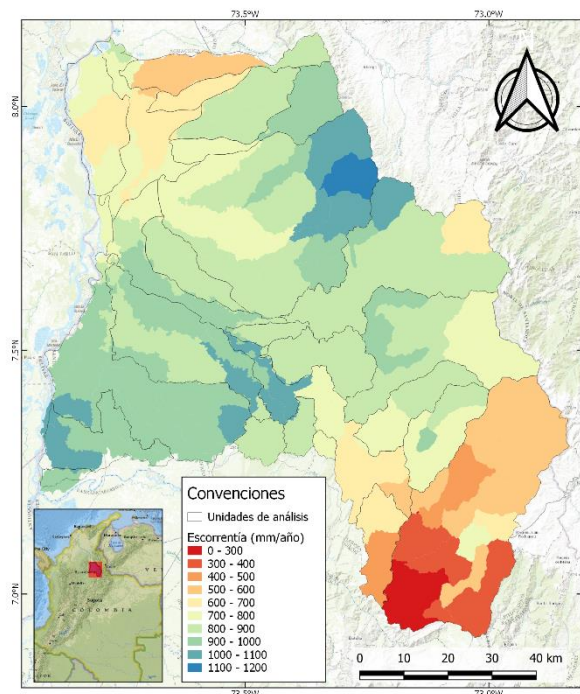


Figura 3.4 Escorrentía simulada en las subcuenas de la SZH del río Lebrija

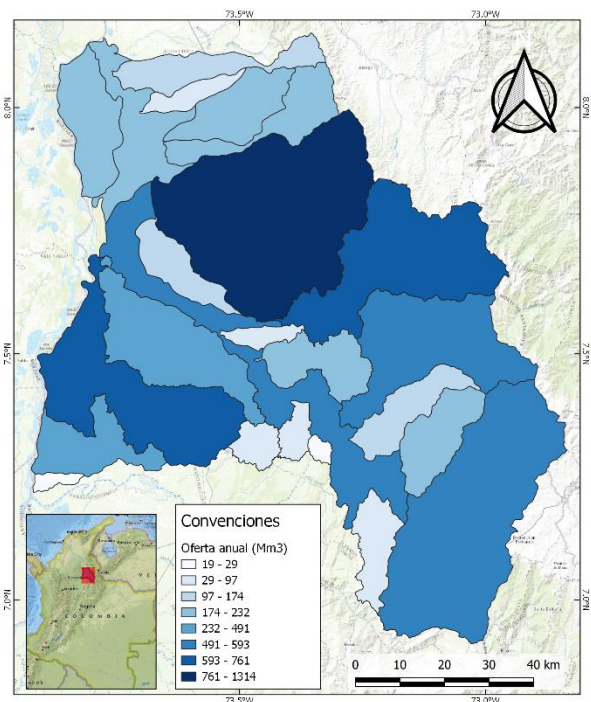


Figura 3.5 Oferta hídrica superficial anual simulada en las unidades de nivel subsiguiente

Tabla 3.2 Valores de oferta hídrica para las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija

Código	Corriente asociada	Oferta (Mm³)	Código	Corriente asociada	Oferta (Mm³)
231901	Río Lebrija medio directos	553.0	231913	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte baja)	1175.1
231902	Quebrada Doradas	61.8	231914	Quebrada Torcoroma	169.2
231903	Caño Cuatro	19.5	231915	Quebrada La Huila (Quebrada El Cacao)	140.2
231904	QUEBRADA LA TIGRA	220.2	231916	Quebrada Caimán	45.6
231905	Río Cáchira del Espíritu Santo (parte media)	717.8	231917	Quebrada Tisquirama - Ciénaga Doña María	139.0
231906	QUEBRADA LA PLATANALA	58.4	231918	Cga Guacamaya, Cga El Roble, Cga La Doncella	205.6

Código	Corriente asociada	Oferta (Mm ³)	Código	Corriente asociada	Oferta (Mm ³)
231907	QUEBRADA LA MUSANDA	137.0	231919	RÃO LEBRIJA BAJO DIRECTOS	198.9
231908	Quebrada La Santa	504.9	231920	Río Negro	190.2
231909	Quebrada La Gómez	792.5	231921	Río Salamaga	154.9
231910	Quebrada Lebrija	70.3	231922	Quebrada La Angula	94.1
231911	Quebrada Trece (Q. Nariño)	270.9	231923	Río de Oro	555.0
231912	Quebrada El Salado	28.6	231924	Río Cachirí	547.6

Con respecto a la variación de la escorrentía, se puede ver que ésta se relaciona directamente con el régimen climatológico de lluvias, el cual es bimodal. Los picos de escorrentía se corresponden con las épocas de lluvia de mayo y octubre (exceptuándose las unidades de la 231916 a la 231919 que presentan el primer pico en el mes de junio). Existen algunas unidades donde el veranillo de mitad de año no es tan marcado como el que se ve de ejemplo en la Figura 3.6, que se ubican en la parte norte de la SZH.

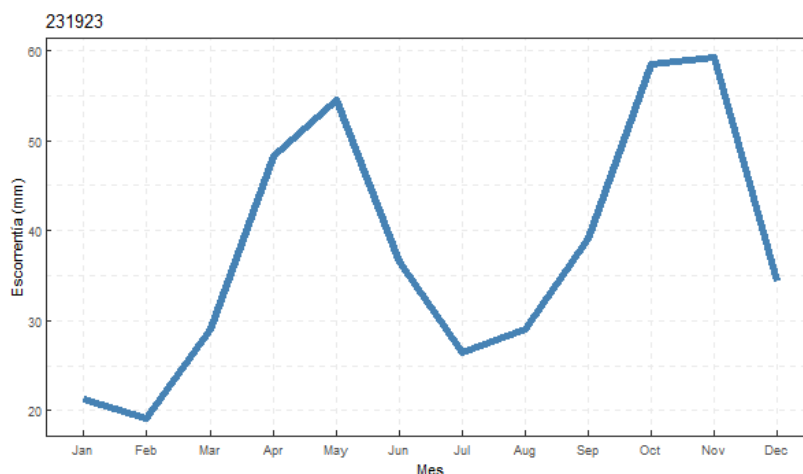


Figura 3.6 Variación intraanual mensual multianual para la unidad del río de Oro en la SZH del río Lebrija

Igualmente, la escorrentía mensual cambia dependiendo de la posición, lo que se representa en la Figura 3.7. Se puede confirmar lo mencionado anteriormente sobre el ciclo bimodal de la cuenca, aunque en la parte suroriental, que corresponde a la parte alta de la cuenca, se puede ver que los aumentos de los meses de mayo y noviembre no son tan notorios. Se resalta que en la zona del río

San Alberto al nororiente se presentan escorrentías muy altas en mayo y octubre, que contrastan con lo que ocurre en otras corrientes que bajan de la cordillera como lo son el río Cachira y el Cachira sur. La zona noroccidental es bastante seca en los meses de febrero y marzo pero en las temporadas lluviosas mantiene unos niveles similares a otras subcuencas. En la zona suroccidental se presentan niveles altos de escorrentía durante la mayor parte del año, sobre todo en octubre.

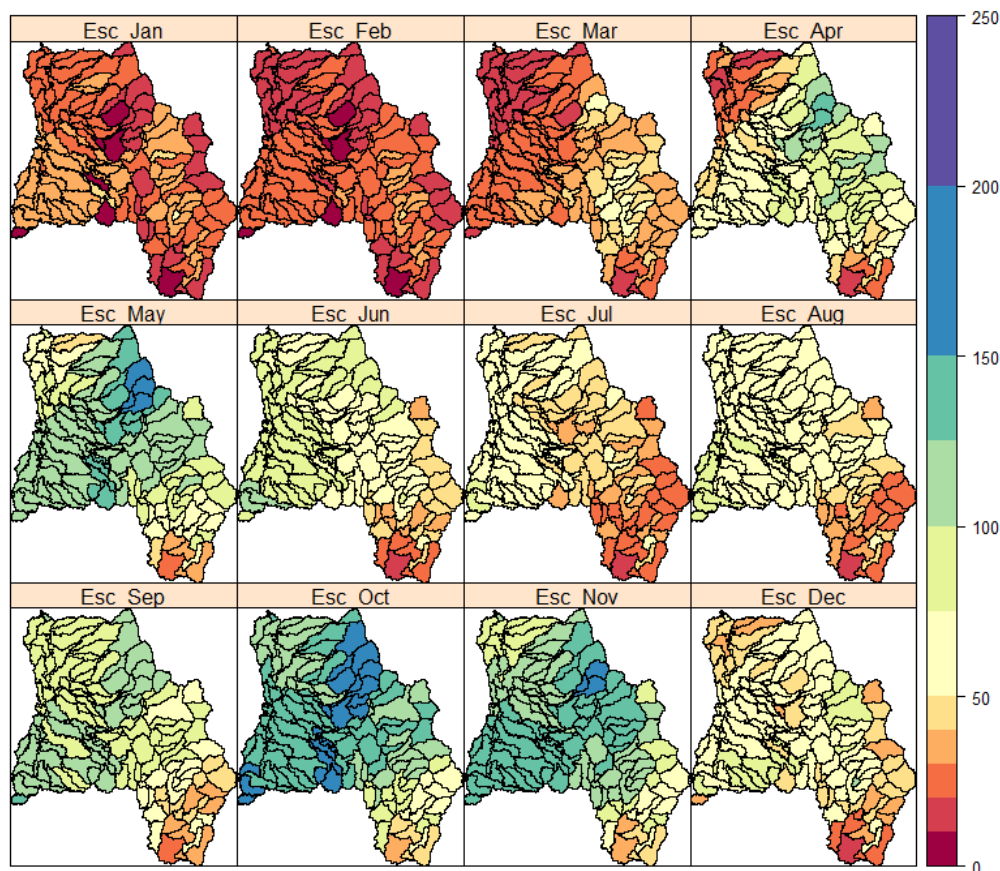


Figura 3.7 Variación espacial de la escorrentía mensual multianual en milímetros

Con respecto a la variabilidad interanual se debe resaltar que para las unidades de nivel subsiguiente que se encuentran al suroccidente, sin importar el año, en los meses de enero y febrero siempre se presentan valores muy bajos. En la Figura 3.8, se puede ver lo mencionado y que por el contrario los meses de julio y agosto tienen grandes variaciones dependiendo del año consultado. Se ha de resaltar que a mayor variabilidad haya en un mes es un indicativo de que pueden existir mayores

cambios en la tendencia de la disponibilidad de agua que se presenta en la zona en un año particular. Lo anterior está influenciado por las condiciones oceano atmosféricas que influyen sobre la región y que se estudian a través de pronósticos estacionales.

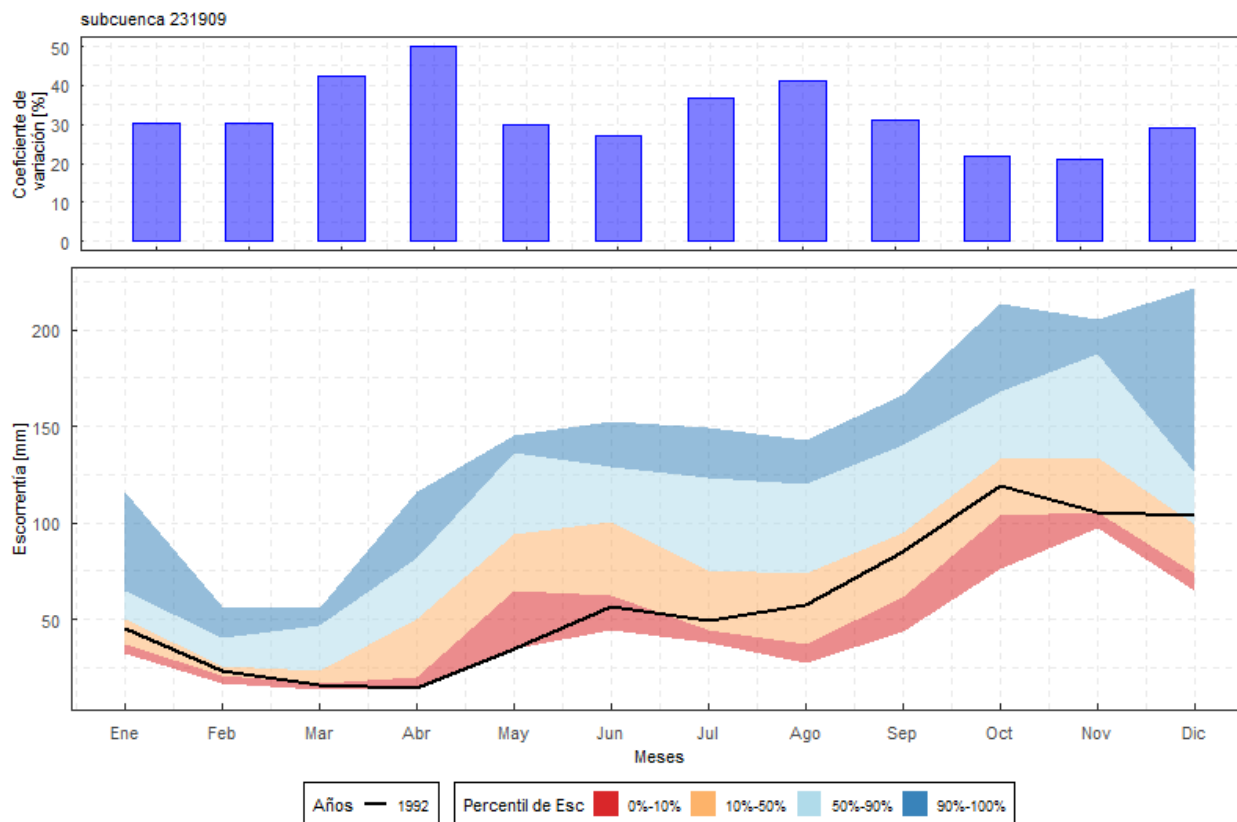


Figura 3.8 Variabilidad interanual de la escorrentía en la unidad de la Quebrada La Gómez en la SZH del río Lebrija

3.1.2. Resultados en la subzona hidrográfica del río Opón

3.1.2.1. Variación espacio – temporal de los caudales

En la subzona hidrográfica del río Opón producto de la modelación hidrológica se obtuvieron los caudales en 52 tramos de río asociados a la red principal del drenaje de la subzona. A partir de estos resultados se reconoció la variabilidad espacial de estos caudales en toda la extensión de la subzona. Existe un rango muy variado de caudales en los principales ríos, el caudal medio anual

multianual va desde aproximadamente $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta cerca de $161 \text{ m}^3/\text{s}$ estimados sobre el río Opón en su desembocadura al río Magdalena. La distribución espacial de los tramos de río y de los caudales medios anuales multianuales es presentado en la Figura 3.9.

En la Figura 3.9 es evidente el efecto de acumulación de caudales que se produce en tramos contiguos hacia aguas abajo de un mismo río, por esto las corrientes principales como el río Opón y el río La Colorada toman valores cada vez más altos hasta la desembocadura en el río Magdalena.

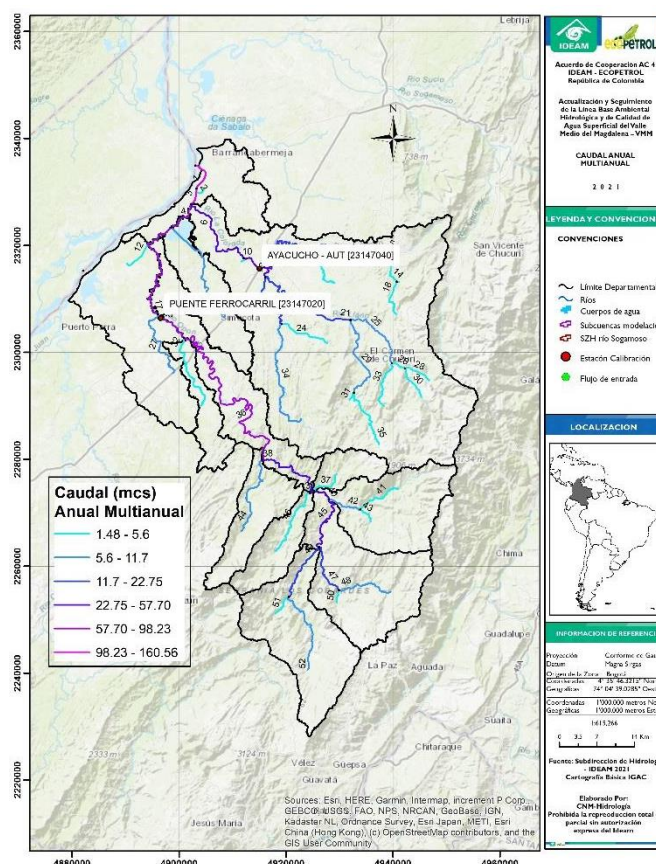


Figura 3.9 Caudal anual multianual en los cauces de la SZH del río Opón

En cuanto a la variación intra-anual de los caudales, se evidenció que en la totalidad de los cauces se presenta un ciclo bimodal con dos periodos de altas afluencias en los bimestres abril – mayo y octubre – noviembre. Las más bajas afluencias en el periodo intra-anual se presentan en general en el trimestre diciembre-enero-febrero. El comportamiento hidrológico evidenciado es producto del

régimen climatológico de la zona, siendo coincidentes con los picos de precipitación que se presentan en la región. Los valores mensuales multianuales y el valor anual multianual de las corrientes principales de la SZH del río Opón son presentados en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Opón

Cauce	Corriente	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AA
1	Río Opón desembocadura al río Magdalena	28.0	41.6	90.5	165.6	223.3	166.5	122.5	151.2	228.1	285.1	256.9	108.2	155.6
6	Río La Colorada, desembocadura al río Opón	8.4	12.1	30.4	57.0	77.1	57.5	40.4	51.5	79.0	101.4	94.1	39.3	54.0
9	Río Oponcito	2.1	3.6	9.1	15.8	20.7	15.4	10.5	13.6	21.0	27.8	26.1	10.8	14.7
11	Río La Colorada hasta la estación Ayacucho	7.5	11.5	28.0	52.3	69.7	51.9	37.2	47.2	72.0	92.3	84.6	35.2	49.1
23	Río Opón hasta estación punete Ferrocarril	15.2	24.4	46.8	83.1	108.0	81.3	63.2	73.8	109.1	132.4	116.3	50.6	75.4
27	Quebrada Aguas Negras	1.3	1.7	3.7	7.2	9.5	6.8	4.5	6.0	9.8	12.9	11.4	4.9	6.6
37	Río Verde	0.5	0.8	1.7	3.2	4.2	3.0	2.6	3.1	4.5	5.3	4.4	1.8	2.9
40	Quebrada Aragua	9.1	14.9	27.1	49.8	64.6	48.6	39.3	45.1	64.4	77.2	66.0	28.4	44.5
44	Río Blanco	1.6	2.7	5.0	8.3	10.3	8.0	6.3	7.2	10.7	13.0	11.8	5.2	7.5
46	Quebrada Negra de Armas	1.2	2.1	4.0	6.7	8.1	6.2	4.6	5.4	8.0	9.6	8.6	3.9	5.7
49	Río Quiratá	3.6	6.0	9.7	19.1	24.9	20.0	15.2	16.4	23.3	27.0	23.5	10.7	16.6

Adicionalmente, a partir de los caudales simulados se hizo la caracterización de la variabilidad mensual de estos. Para ello se estimaron para cada mes, partiendo de las series de tiempo de caudales mensuales: los percentiles 0%, 10%, 50%, 90% y 100 y el coeficiente de variación (CV). En la Figura 3.10 se presenta a modo de ejemplo el análisis para los caudales del tramo del río Opón que desemboca en el río Magdalena en el cual se tiene la cuantificación de toda la oferta de la SZH.

El río opón en su desembocadura para el año 1983 considerado un año de baja afectación por el fenómeno del niño, se registraron caudales mayoritariamente por debajo de la mediana de los caudales históricos allí estimados, tan solo el mes de abril estuvo levemente por encima del percentil 50%. En el mes de noviembre se alcanzó el valor mínimo histórico. Adicionalmente, los meses de enero, febrero y diciembre son los meses con mayor coeficiente de variación ($CV > 40\%$),

por lo que es precisamente en estos meses en los que pudiese esperarse tener valores alejados del promedio mensual multianual.

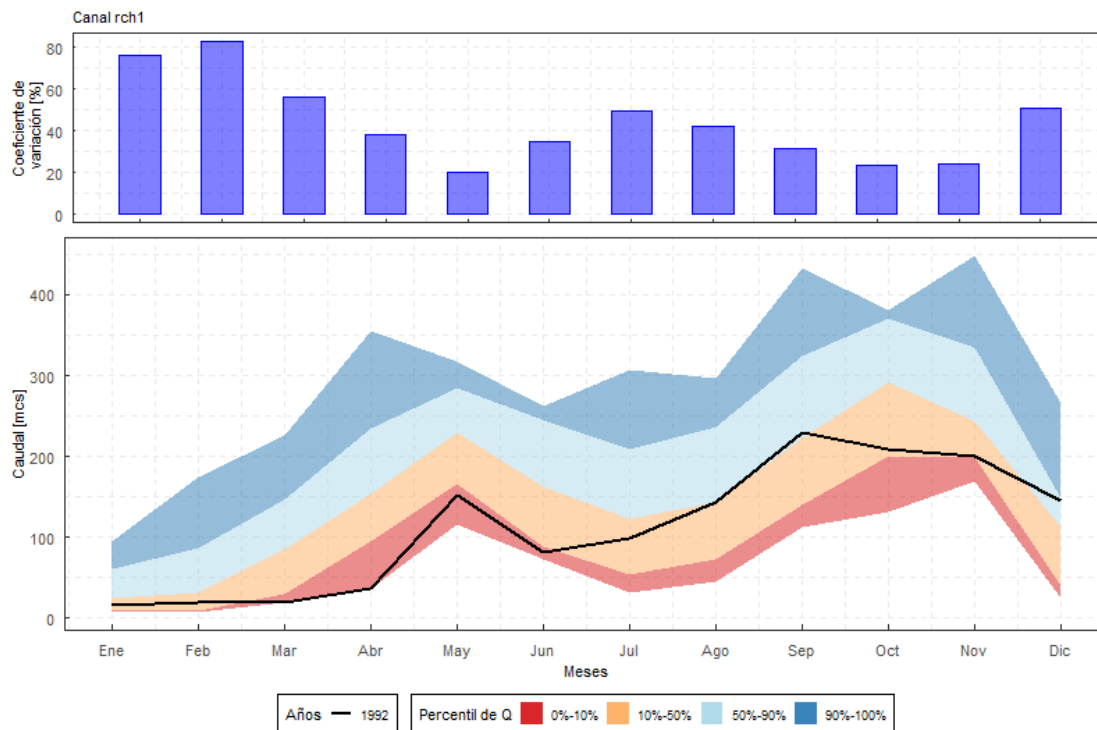


Figura 3.10 Variabilidad interanual de los caudales del río Opón

Adicionalmente, se aprecia que en el mes de septiembre considerado un mes de transición hacia el segundo bimestre de altas afluencias del año ha llegado a tener afluencias inclusive superiores a las del mes de octubre, probablemente bajo el efecto de la incidencia de un fenómeno de La Niña en la región. Los diagramas de variabilidad interanual fueron realizados para la totalidad de los tramos de río modelados y los resultados se encuentran en los anexos del presente documento.

3.1.2.2. Variación espacio – temporal de la escorrentía

La escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente la SZH del río Opón fluctúa entre los 1,100 y 1,600 mm/año, destacándose la cuenca del río *Opón entre San Joaquín y La Tablona* con una escorrentía anual promedio de 1588. Esta cuenca de nivel subsiguiente se encuentra localizada en sur de la SZH, lugar en el que se presentan las mayores precipitaciones de toda la SZH superando los 3,000 mm/año. En cuanto a la cuenca con la menor escorrentía, esta

corresponde a la cuenca del *Complejo de la Ciénaga del Opón* en la que se contabilizó una escorrentía media de 1,107 mm/año. En general son las cuencas localizadas al sur de la SZH las que presentan mayor escorrentía. En la Figura 3.11 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual en la SZH del río Opón.

La oferta hídrica en volumen es estimada como el producto de la escorrentía por el área de cada cuenca de primer nivel subsiguiente. Los resultados anuales multianuales en millones de metros cúbicos (Mm³) también son presentados en la Figura 3.11. En volumen es la cuenca de del río La Colorada la que aporta un mayor volumen en un año promedio en la SZH del río Opón.

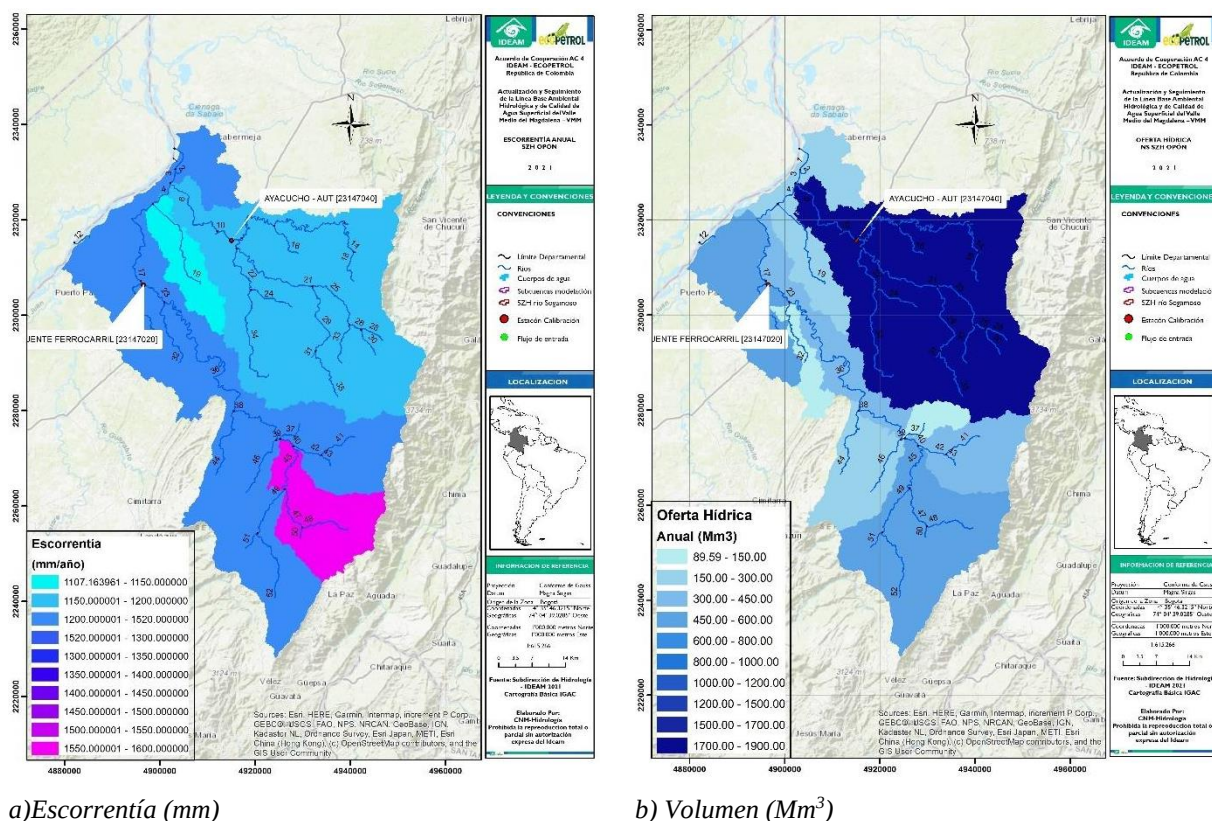


Figura 3.11 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis

El volumen total estimado para la SZH del río Opón es de 5,466 Mm³ lo cual es un 17 % inferior a la oferta estimada mediante el balance hídrico de largo plazo en el ENA 2018 para esta SZH en

el escenario de año medio ($6,575 \text{ Mm}^3$)(IDEAM, 2019) . Las diferencias entre el volumen anual multianual estimado para el ENA y la escorrentía obtenida mediante el modelo SWAT radican en la metodología de la estimación, puesto que la estimación del ENA se realiza mediante un balance hídrico de largo plazo, en escalas temporales y espaciales mucho menos detalladas que las utilizadas para la modelación en SWAT. Las agregaciones espacio-temporales realizadas para el balance hídrico de largo plazo pueden generar una sobreestimación de la escorrentía en una SZH, pues se obvia procesos hidrológicos que pueden tener relevancia para una SZH específica. En la Tabla 3.4 se presenta el detalle de la escorrentía y volumen anual multianual para las 12 cuencas de nivel subsiguiente.

Tabla 3.4 Oferta hídrica (escorrentía y Volumen) anual multianual en unidades espaciales de análisis

Código	Cuencas de nivel subsiguiente	AA_mm/año	AA_Mm ³
2314-01	Complejo Humedal Juan Esteban	1206.6	236.1
2314-02	Complejo Ciénaga de Chucurí y Quebrada Aguas Negras	1266.2	505.2
2314-03	Quebrada la India	1294.1	134.6
2314-04	Directos al Río Opón entre Vereda La Honda y Ciénaga del Opón	1273.2	384.3
2314-05	Río Blanco	1436.3	244.8
2314-06	Quebrada Negra de Armas	1468.8	182.3
2314-07	Río Quiratá	1482.5	525.7
2314-08	Río Opón entre San Joaquín y La Tablona	1453.7	540.8
2314-09	Quebradas La Aragua y La Colorada	1325.0	366.1
2314-10	Río La Colorada	1082.9	1775.7
2314-11	Complejo Ciénaga del Opón	1193.8	229.7
2314-12	Río La Verde	1203.6	88.9

En cuanto a la variación mensual multianual de la escorrentía, se observó que esta coincide con el régimen climatológico de la precipitación, presentando sus picos en los meses de mayo y octubre y teniendo un comportamiento bimodal. En todas las cuencas los valores más bajos de escorrentía

corresponden a los meses del trimestre diciembre-enero-febrero y en los meses de junio-julio-agosto, siendo el primer trimestre el que presenta las escorrentías más bajas del año. Las tablas con los valores medios mensuales multianuales de escorrentía son anexadas al presente informe.

La variabilidad interanual fue evaluada de la misma manera en que fueron evaluados los caudales en el capítulo anterior. A partir de los estadísticos determinados fue posible evidenciar que en general para las cuencas de esta SZH, en los meses en los que se observó las escorrentías más bajas se identificaron las mayores variabilidades estos son: enero, febrero, julio, agosto y diciembre. Estas altas variabilidades pueden ser interpretadas como un indicativo de que puede existir mayores fluctuaciones en la disponibilidad del recurso en estos meses y pueden deberse a la ocurrencia de fenómenos de variabilidad climática. En la Figura 3.12 se presenta como ejemplo la variabilidad de la cuenca del Río La Colorada. Las demás gráficas se encuentran en los anexos del documento.

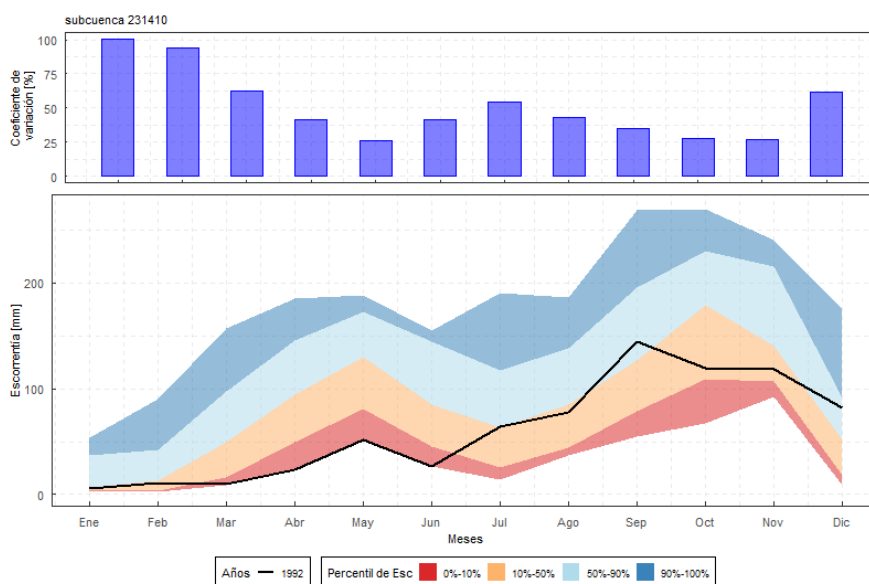


Figura 3.12 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca del río La Colorada

3.1.3. Resultados en la subzona hidrográfica del río Sogamoso

3.1.3.1. Variación espacio – temporal de los caudales

La modelación hidrológica semidistribuida de la SZH del río Sogamoso contempló la estimación de la oferta hídrica de 65 tramos de río o cauces, los cuales fueron utilizados para la revisión de la

variabilidad hidrológica espacial y temporalmente. El rango de caudales en esta SZH es aún más amplio que el que se obtuvo para la SZH del río Opón, esto debido a que esta subzona corresponde a la parte baja de la Zona Hidrográfica del Río Sogamoso y está constituida a partir de la confluencia de dos grandes ríos el Chicamocha y el río Suárez.

La modelación hidrológica de esta SZH debido a la construcción y entrada en operación del embalse de Topocoro y la hidroeléctrica del río Sogamoso en el año 2014, fue abordada en dos escenarios/etapas. En el primer escenario/etapa se ajustó el modelo para las condiciones previas al año 2014 lo que supuso resultados para una condición natural de flujo. El segundo escenario para el periodo 2014-2019 en el cual los caudales resultado de la primera etapa fueron ajustados con base en la información de generación y vertimientos reportada por ISAGEN a XM y adicionalmente contemplando las afluencias de los río aguas abajo del sitio de presa. De este modo, se obtuvieron las series de caudal para el periodo 1983-2019, en los tramos del río Sogamoso.

Los caudales medios anuales multianuales para los río de la SZH varían entre 0.5 y 517 m³/s . La distribución espacial de los tramos de río en los que se obtuvieron resultados y sus caudales medios anuales multianual resultado de la modelación son presentados en la Figura 3.13. Cabe resaltar que gran parte de los caudales transitados por el cauce principal del río Sogamoso provienen de los registros de caudal de los ríos afluentes que aguas arriba lo conforman (Suarez, Fonce y Chicamocha).

El cauce principal del río Sogamoso desde el ingreso al área delimitada como SZH, ya tiene el tránsito de un caudal medio anual multianual de un poco más de 440 m³/s y es evidente el efecto de acumulación de caudales que se produce en los tramos del río contiguos hacia aguas abajo, hasta alcanzar su desembocadura al río Magdalena un caudal medio anual multianual de aproximadamente 515 m³/s.

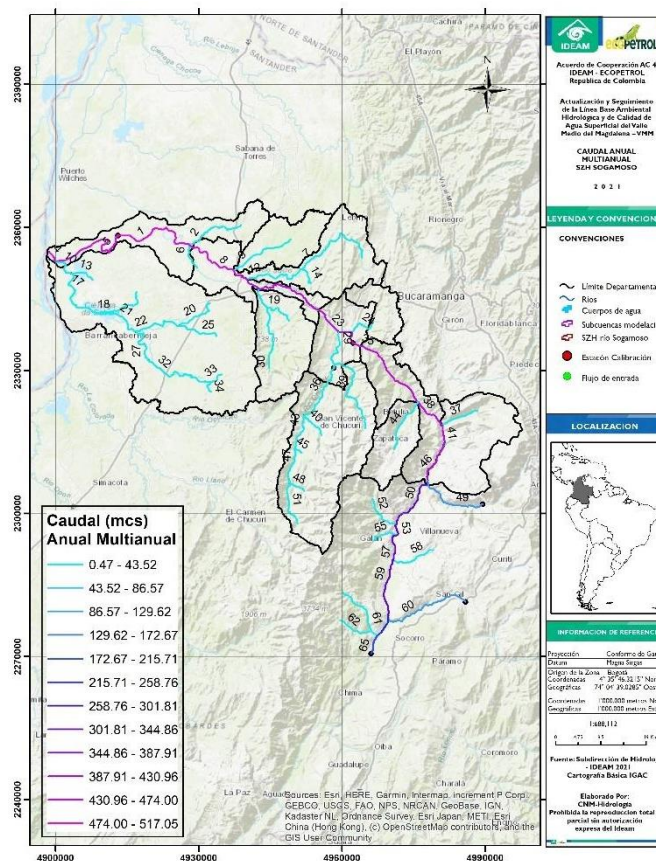


Figura 3.13 Caudales anuales multianuales en los cauces de la SZH del río SOGAMOSO

La variación intra-anual de los caudales presenta un ciclo bimodal con dos periodos de altas afluencias en los bimestres abril – mayo y octubre – noviembre, los cuales coinciden con los picos de precipitación que se presentan en la región. Las más bajas afluencias en el periodo intra-anual se presentan en general en los bimestres enero-febrero y julio-agosto, en este último bimestre se presenta una reducción más marcada de las afluencias respecto a lo evidenciado en la SZH del río Opón. Los valores mensuales multianuales de caudal en m^3/s y el valor anual multianual de las corrientes principales de la SZH del río Sogamoso son presentados en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Caudales mensuales y anual multianual en cauces principales. SZH río Sogamoso

Cauce	Corriente	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	AA
1	Río Sogamoso hasta estación PTE SOGAMOSO	223.9	242.5	329.2	556.0	706.0	515.8	398.5	396.3	495.7	719.3	699.3	427.8	475.9
2	Quebrada Cayumba	0.4	0.3	0.6	2.0	3.2	2.2	1.1	1.6	3.1	5.0	4.5	1.7	2.2
4	Río Sogamoso en desembocadura al Magdalena	231.2	246.4	335.6	568.9	744.9	557.0	419.7	415.7	528.9	775.9	759.8	462.5	503.9
9	Caño Corazones	0.8	0.7	1.2	3.7	5.7	3.7	1.9	2.5	5.1	8.9	8.3	3.6	3.8
12	Río Sucio	1.2	1.0	1.4	3.5	5.9	3.4	1.8	2.0	4.0	9.6	10.3	4.2	4.0
16	Quebrada La Putana	1.1	1.1	1.7	4.5	6.8	4.1	2.3	3.0	6.3	10.9	10.1	3.8	4.6
21	Quebrada La Vizcaína	4.4	3.5	6.6	14.5	25.7	20.9	11.2	11.9	23.4	38.3	37.2	17.6	17.9
22	Quebrada Zarzal	1.6	1.2	2.2	5.0	9.2	7.4	3.8	4.2	9.0	15.1	14.7	6.5	6.7
24	Quebrada Pujaman y Aguablanca	0.4	0.4	0.6	1.0	1.3	0.7	0.5	0.6	1.0	2.5	2.7	1.1	1.1
35	Río Sogamoso hasta estación EL TABLAZO	200.1	214.6	324.4	563.6	677.9	485.3	382.5	367.0	448.1	688.4	660.7	375.3	449.0
36	Río Chucurí	2.0	3.9	8.5	15.0	16.9	10.3	7.7	10.7	16.5	23.6	20.0	7.7	11.9
39	Quebrada el Ramo	0.7	0.6	1.0	2.0	3.1	2.1	1.3	1.4	2.4	5.4	5.3	2.2	2.3
44	Quebrada Zapatoca	0.2	0.3	0.4	1.0	1.5	1.0	0.8	1.0	1.9	3.6	3.1	0.8	1.3

En cuanto a la escala interanual se hizo la caracterización de la variabilidad mensual de los caudales al igual que en los demás cauces a partir de la estimación de los percentiles 100%, 90%, 50%, 10%, 0% y los coeficientes de variación para cada mes. En la Figura 3.14 se presenta cada uno de los estadísticos estimados y se imprime los valores mensuales multianuales del año 1983 considerado un año medio con una leve influencia del fenómeno del niño al comienzo de este, para el tramo de río correspondiente a la desembocadura del río Sogamoso al río Magdalena.

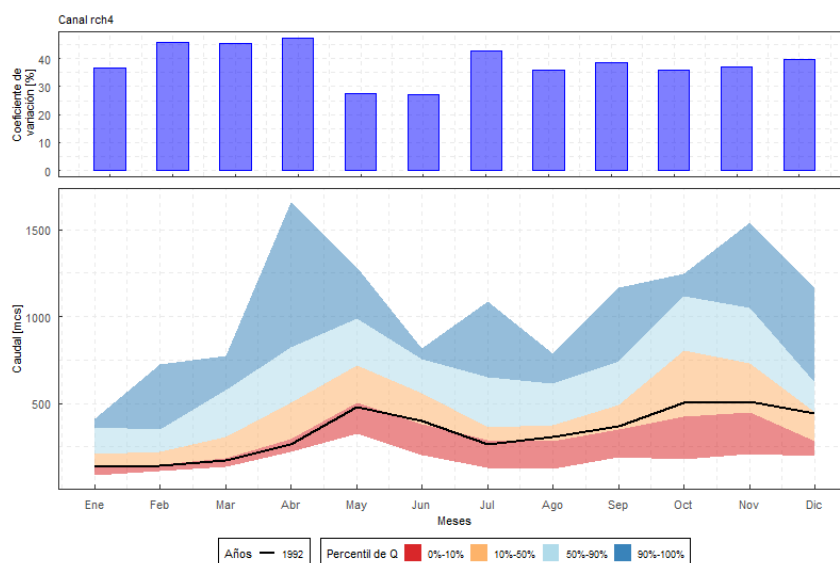


Figura 3.14 Variabilidad interanual de los caudales del río Sogamoso

El coeficiente de variación para los meses de febrero, marzo, abril, julio y diciembre es superior al 40% lo cual se considera alto, por lo que probablemente en estos meses se presenten valores alejados del promedio mensual multianual correspondiente a cada uno de ellos. Para el año 1983 los caudales fueron significativamente superiores a la mediana en los meses de altas afluencias y en los meses de julio, agosto y septiembre, fue en los que se pudo percibir los efectos del fenómeno de variabilidad climática que se presentó, pues los valores registrados se encuentran por abajo de la mediana.

3.1.3.2. Variación espacio – temporal de la escorrentía

En lo que respecta a la escorrentía anual multianual en las cuencas del primer nivel subsiguiente la SZH del río Sogamoso, esta varía en el rango entre los 360 y 850 mm/año, destacándose las cuencas de la parte baja de la SZH y la cuenca del río Chucurí en la que se presentan las mayores escorrentías anuales promedio. La cuenca con la menor escorrentía corresponde a la cuenca de la quebrada Aguablanca y Pujaman en la que se contabilizó una escorrentía media de 362 mm/año. En la Figura 3.15 se presentan los resultados de la escorrentía anual multianual en la SZH del río Sogamoso.

La oferta hídrica anual multianual en volumen estimada como el producto de la escorrentía por el área de cada cuenca de primer nivel subsiguiente, es presentada en la Figura 3.15 en millones de metros cúbicos (Mm³). En volumen es la cuenca del complejo de la Ciénaga de San Silvestre la que aporta un mayor volumen anual en la SZH del río Sogamoso.

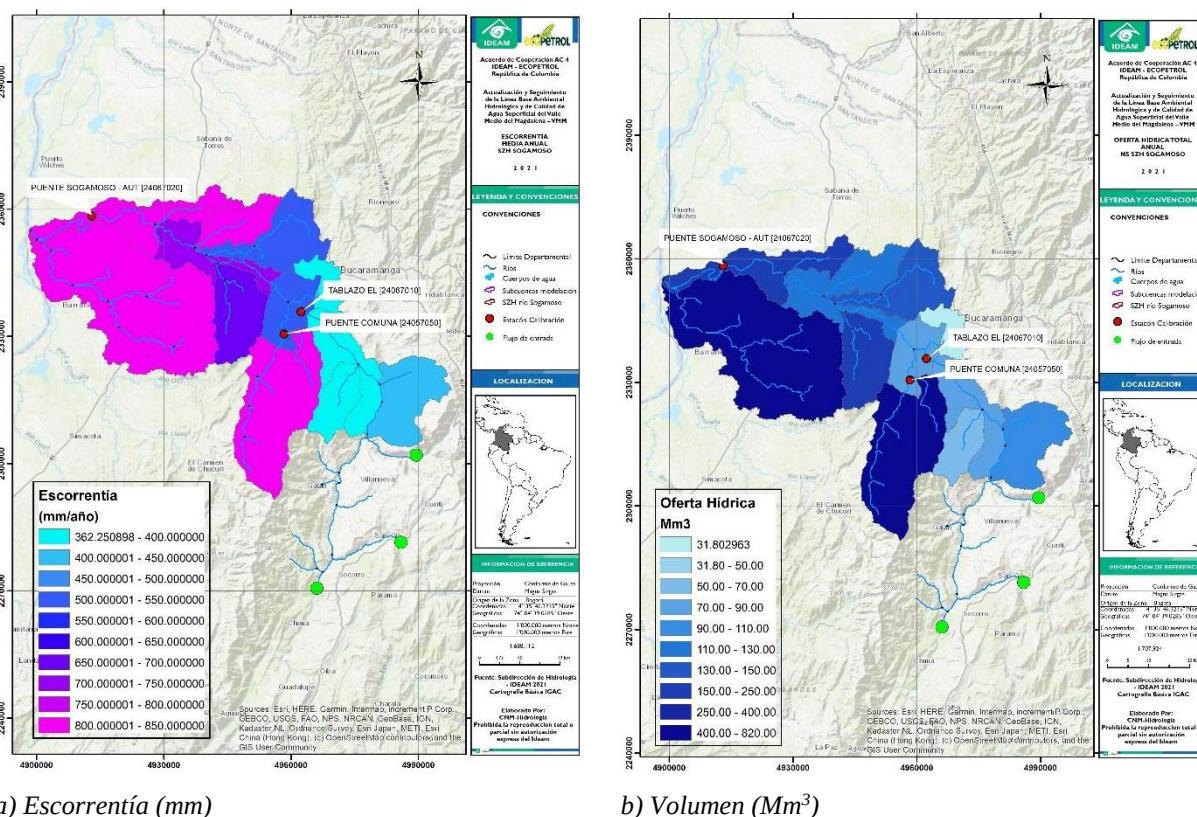


Figura 3.15 Oferta hídrica anual multianual en unidades espaciales de análisis río Sogamoso

El volumen total estimado para la SZH del río Sogamoso es de 2,357 Mm³, lo cual es inferior a la oferta estimada mediante el balance hídrico de largo plazo en el ENA 2018 para esta SZH en el escenario de año medio (3,575 Mm³)(IDEAM, 2019), lo cual es justificado por las mismas razones expuestas en la SZH del río Opón. En la Tabla 3.6 se presenta el detalle de la escorrentía y volumen anual multianual para las 12 cuencas de nivel subsiguiente.

Tabla 3.6 Oferta hídrica (escorrentía y volumen) anual multianual en unidades de análisis Sogamoso.

Código	Cuenca Nivel Subsiguiente	AA_mm	AA_Mm3
2405-01	Río Sogamoso entre Cayumba y el Río Magdalena	824.4	220.5
2405-02	Complejo Ciénaga San Silvestre	862.7	847.2
2405-03	Quebrada La Putana	675.8	155.0
2405-04	Río Chucurí	851.2	437.5
2405-05	Quebrada Zapatoca	309.7	41.7
2405-06	Quebrada La Betuliana y otros directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo e Hidrosogamoso	311.2	69.0
2405-07	Directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta (md)	245.2	63.0
2405-08	Quebradas Aguablanca y Pujaman	337.5	29.6
2405-09	Río Sucio	545.0	135.4
2405-10	Quebradas Caño Corazones y Payoa	823.8	124.8
2405-11	Río Sogamoso entre Hidrosogamoso y Cayumba	712.2	118.8
2405-12	Hidrosogamoso	501.7	84.3

La variación mensual multianual de la escorrentía se relaciona directamente con el régimen climatológico bimodal de la precipitación en esta región. Se presenta un régimen bimodal con sus picos en los meses de mayo y octubre. En toda la SZH del río Sogamoso los valores más bajos de escorrentía se presentan en los meses enero y febrero.

Respecto a la variabilidad interanual evaluada a través de los percentiles 100,90,50,10 y 0% y de los coeficientes de variación para cada mes se evidenció que en general para las cuencas de esta SZH, en los meses febrero, marzo, agosto y diciembre se tienen las mayores variabilidades. En la Figura 3.16 se presenta como ejemplo la variabilidad de la cuenca *Directos al Río Sogamoso entre Cuchilla de San Pablo y Marta*.

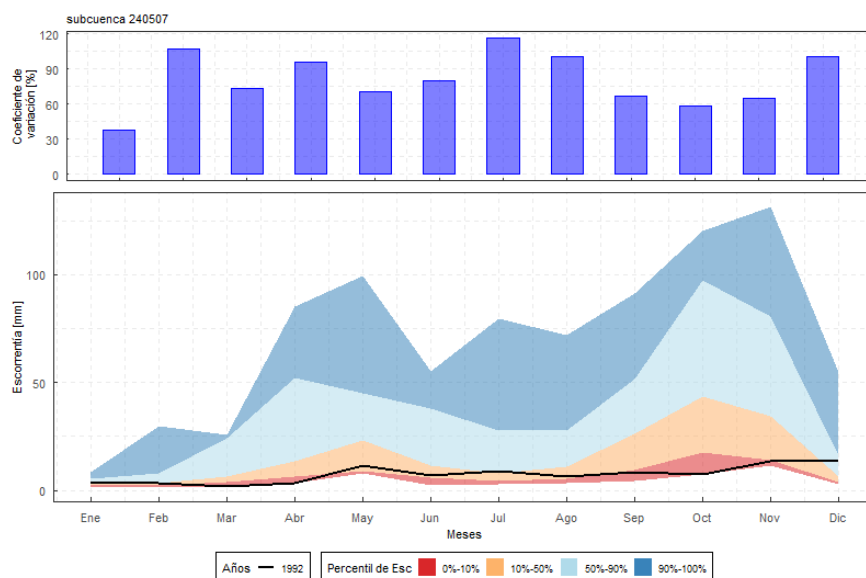


Figura 3.16 Variabilidad interanual de la escorrentía en la cuenca 2405-07

3.2. Índice de regulación hídrica e índice de aridez

Los índices hidroclimáticos analizados con base en los resultados de la modelación hídrica son el índice de regulación hídrica (IRH) y el índice de aridez (IA).

El IRH corresponde a la medición de la respuesta de la cuenca a los impulsos de lluvia a escala diaria y refleja la capacidad de la cuenca aferente de atenuar los picos de caudal. Por esta razón es importante caracterizar su valor para los tramos y subcuencas que se modelaron. Su cálculo se basa en la relación de dos áreas bajo la Curva de Duración de Caudales (CDC) (IDEAM, 2019).

El IA muestra la propensión de una zona a tener suficiencia o insuficiencia de disponibilidad de agua para el sostenimiento de los ecosistemas. Existen muchas formulaciones, pero en varios estudios del IDEAM se ha utilizado la relación entre la energía atmosférica no consumida en evaporación de agua y la energía disponible para esa evaporación (IDEAM, 2019). Esto se representa con la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

A continuación, se presentan los resultados para las subzonas hidrográficas analizadas.

3.2.1. Resultados en la subzona hidrográfica del río Lebrija

3.2.1.1 Índice de Regulación Hídrica (IRH)

En la Figura 3.17 se muestra la CDC, para uno de los canales simulados. Se puede ver que para el agua que fluye por dicho canal, la diferencia entre el percentil 70% y el 100% del tiempo no es significativa mientras que el flujo correspondiente al 20% del tiempo si tiene un aumento con respecto a sus predecesores. Los caudales con menor ocurrencia que este percentil crecen rápidamente.

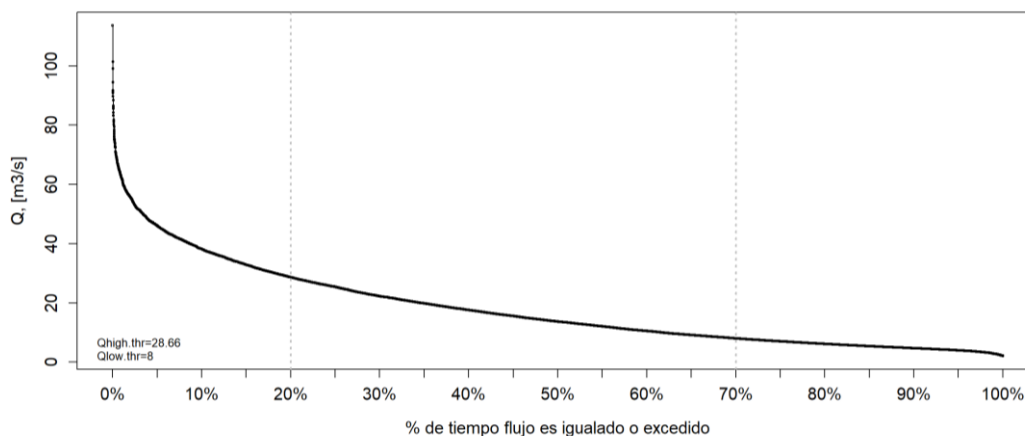


Figura 3.17 CDC diaria de los caudales simulados en la desembocadura del río Cachirí en el río Lebrija

Con los datos calculados para formar la CDC se calculó y clasificó el IRH, que puede verse para algunos canales de importancia en la Tabla 3.7 y en la Figura 3.18 para toda la SZH. Se puede ver que la mayoría de las corrientes tienen una regulación moderada y que varias corrientes que bajan de la cordillera tienen una regulación baja, posiblemente debido a que son cuencas con altas pendientes y con pocas zonas para retener flujos de caudal. Unos cauces de la llanura en la zona occidental se clasifican como regulación alta, que puede ser concordante con las zonas de almacenamiento producidas por la baja pendiente. Se debe resaltar nuevamente que varios de los canales que se encuentran al norte o aguas debajo de las estaciones San Rafael y El Hoyo no cuentan con calibración del tránsito del caudal. Por ejemplo, la zona de ciénagas que se encuentra al norte de la SZH puede generar una mayor retención y regulación de los caudales, aumentando

el IRH; sin embargo, esto no es posible constatarlo con la información producida por la modelación hidrológica de la zona.

Tabla 3.7 Índice de Regulación Hídrica en algunas corrientes importantes dentro de la SZH del río Lebrija

Canal en la modelación	Corriente asociada	IRH	IRH Clasificación
Rch 1	Río Lebrija Desembocadura Magdalena	0.75	MODERADA
Rch 93	Río de Oro Desembocadura en río Lebrija	0.76	ALTA
Rch 45	Río Cáchira del Espíritu Santo Desembocadura en río Lebrija	0.71	MODERADA
Rch 121	Quebrada La Gomez Desembocadura en la ciénaga de Paredes	0.77	ALTA
Rch 51	Río Cachirí Desembocadura en el río Lebrija	0.71	MODERADA
Rch 52	Quebrada la Santa Desembocadura en ciénaga La Tigra	0.70	MODERADA

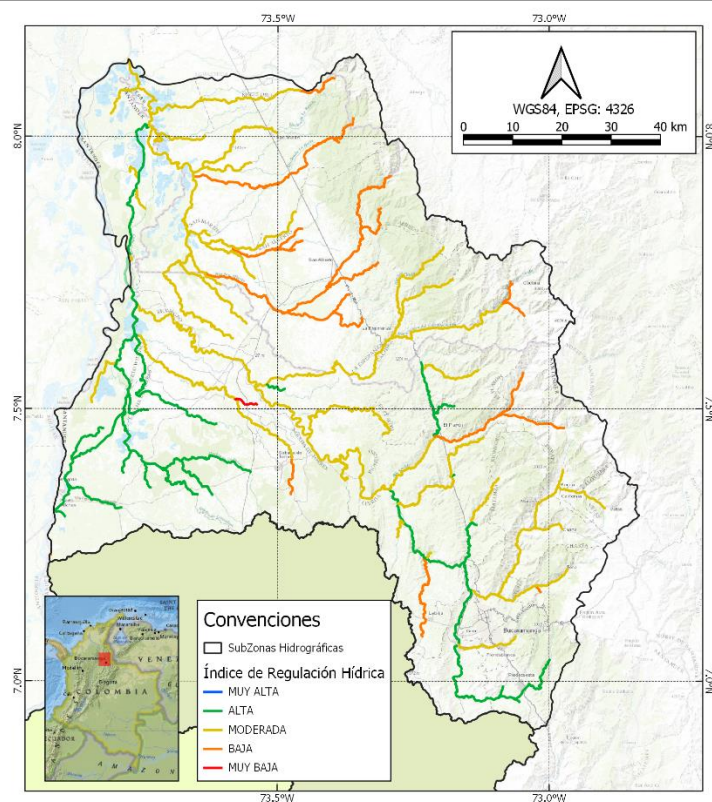


Figura 3.18 Índice de Regulación Hídrica en los canales simulados en la SZH del río Lebrija

Se debe resaltar que la estimación de la regulación ha sido posible únicamente debido a que la modelación hidrológica se realizó a escala diaria y a que tiene en cuenta procesos de tránsito del caudal (calibrados en la mayoría de las subcuencas planteadas en la modelación).

3.2.1.2 Índice de aridez (IA)

A través de los resultados de la modelación realizados con el aplicativo SWAT, se pudo estimar a nivel de subcuenca el índice de aridez para la SZH del río Lebrija. Las series de evapotranspiración potencial y real estimadas en las subcuencas fueron el insumo para calcular el IA, que previamente se llevaron a las unidades de análisis de nivel subsiguiente para hacer el cálculo en esos polígonos. En la Figura 3.19 se puede ver que la SZH tiene la mayor parte clasificada en “moderados de agua”, y existen algunas zonas con índices “moderados a deficitarios de agua”. En la parte alta, correspondiente al área del río de oro, se encuentra también el río Vetás, el Surata y el páramo de Santurbán; allí se registra un índice en la categoría de “moderados de agua”. En el ENA 2018 se estimaba que la zona sur se clasificaba como excedentes de agua, probablemente a que la precipitación en esa zona esta un poco sobreestimada por el producto satelital usado.

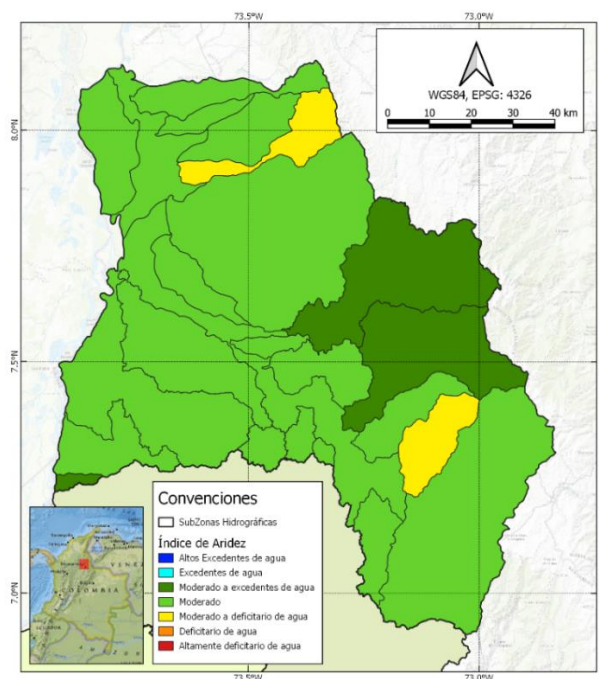
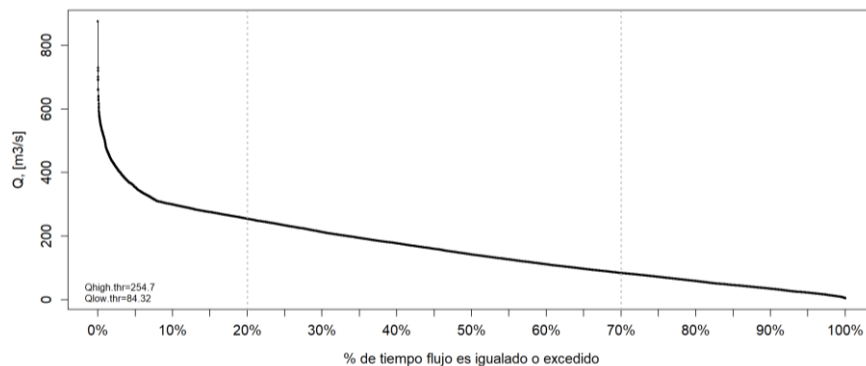


Figura 3.19 Índice de aridez en las unidades de nivel subsiguiente en la SZH del río Lebrija

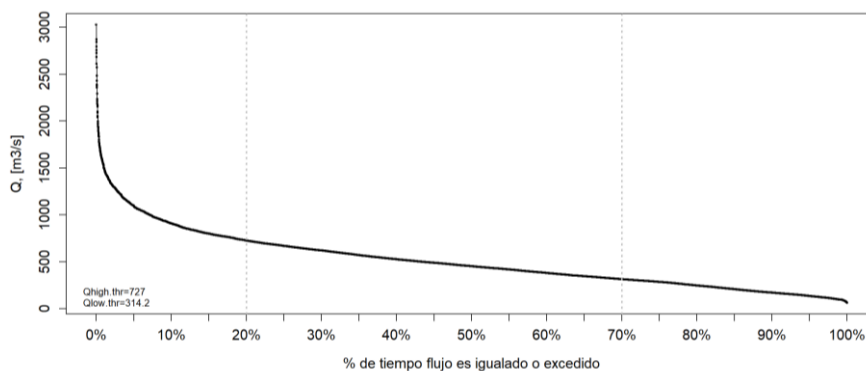
3.2.2. Resultados en la subzona hidrográfica de los ríos Opón y Sogamoso

3.2.2.1 Índice de Regulación Hídrica (IRH)

En la Figura 3.20 se presenta la Curva de duración de caudales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón en las cuales se puede apreciar las diferencias en las pendientes y en la forma en que se genera el escurrimiento en cada una de las SZHs.



a) Tramo del río Opón en su desembocadura



b) Tramo del río Sogamoso en su desembocadura

Figura 3.20 Curvas de duración de caudal en tramos de ríos Opón y Sogamoso

Se generó la CDC para cada uno de los tramos modelados en las dos SZHs, con los valores obtenidos se calculó el IRH y se categorizó según los rangos presentados en la Tabla 3.8. Los valores de IRH obtenidos y la categoría asignada de algunos de los principales ríos de la SZH del río Sogamoso son presentados en la Tabla 3.9.

Tabla 3.8 Clasificación IRH de los ENA

Categoría ENA	Rango
Muy Alta	> 0.85
Alta	0.75 – 0.85
Moderada	0.65 - 0.75
Baja	0.50 - 0.65
Muy Baja	< 0.50

Tabla 3.9 IRH en cauces principales de las SZH de los ríos Sogamoso y Opón

Cauce	Corriente	IRH	Clasificación
SZH río Sogamoso			
1	Río Sogamoso hasta estación PTE SOGAMOSO	0.76	ALTA
2	Quebrada Cayumba	0.58	BAJA
4	Río Sogamoso en desembocadura al Magdalena	0.76	ALTA
9	Caño Corazones	0.60	BAJA
12	Río Sucio	0.55	BAJA
16	Quebrada La Putana	0.58	BAJA
21	Quebrada La Vizcaína	0.64	BAJA
22	Quebrada Zarzal	0.61	BAJA
24	Quebrada Pujaman y Aguablanca	0.58	BAJA
35	Río Sogamoso hasta estación EL TABLAZO	0.77	ALTA
36	Río Chucurí	0.63	BAJA
39	Quebrada el Ramo	0.60	BAJA
44	Quebrada Zapatoca	0.46	MUY BAJA
SZH río Opón			
1	Río Opón desembocadura al río Magdalena	0.68	MODERADA
6	Río La Colorada, desembocadura al río Opón	0.66	MODERADA
9	Río Oponcito	0.65	MODERADA
11	Río La Colorada hasta la estación Ayacucho	0.66	MODERADA
23	Río Opón hasta estación punete Ferrocarril	0.68	MODERADA
27	Quebrada Aguas Negras	0.62	BAJA
37	Río Verde	0.63	BAJA
40	Quebrada Aragua	0.68	MODERADA
44	Río Blanco	0.67	MODERADA

46	Quebrada Negra de Armas	0.67	MODERADA
49	Río Quiratá	0.67	MODERADA

La categoría ALTA obtenida para la cuenca del río Sogamoso hasta la desembocadura en el río Magdalena y la categoría MODERADA obtenida para el río Opón en su desembocadura, son coincidentes con la clasificación obtenida para estas SZHs en el más reciente Estudio Nacional del Agua. También coinciden con lo reportado en los Planes de Ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas elaborados por la CAS para ambas SZHs. En la Figura 3.21 se presenta la distribución espacial del IRH en las dos SZH modeladas. Como es de esperarse las cuencas de montaña o cabecera son las que presentan los IRH más bajos, a medida que se acumula el flujo se obtiene valores de IRH más altos.

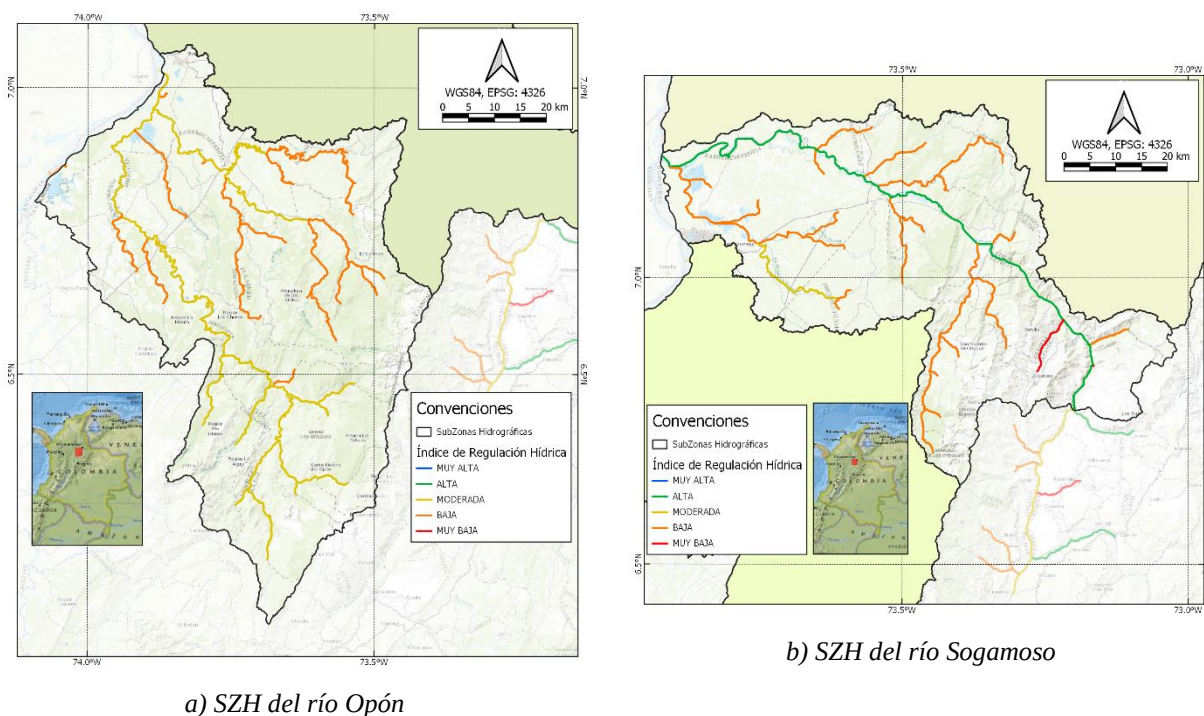


Figura 3.21 Comportamiento espacial del IRH en las SZHs de Interés

3.2.2.2 Índice de Aridez (IA)

En la Figura 3.22 se presentan los índices de aridez obtenidos para cada una de las SZHs. En la SZH del río Opón las cuencas de nivel subsiguiente asociadas al río La Colorada presentan IA de

“moderados a excedentes de agua”, al igual que las cuencas en proximidades o asociadas al río Opón al sur y occidente de la SZH. Por su parte, la SZH del río Sogamoso, presenta IA que la categorizan mayoritariamente como una región con disponibilidad moderada de agua, con una zona clasificada como “moderado a excedentes de agua”.

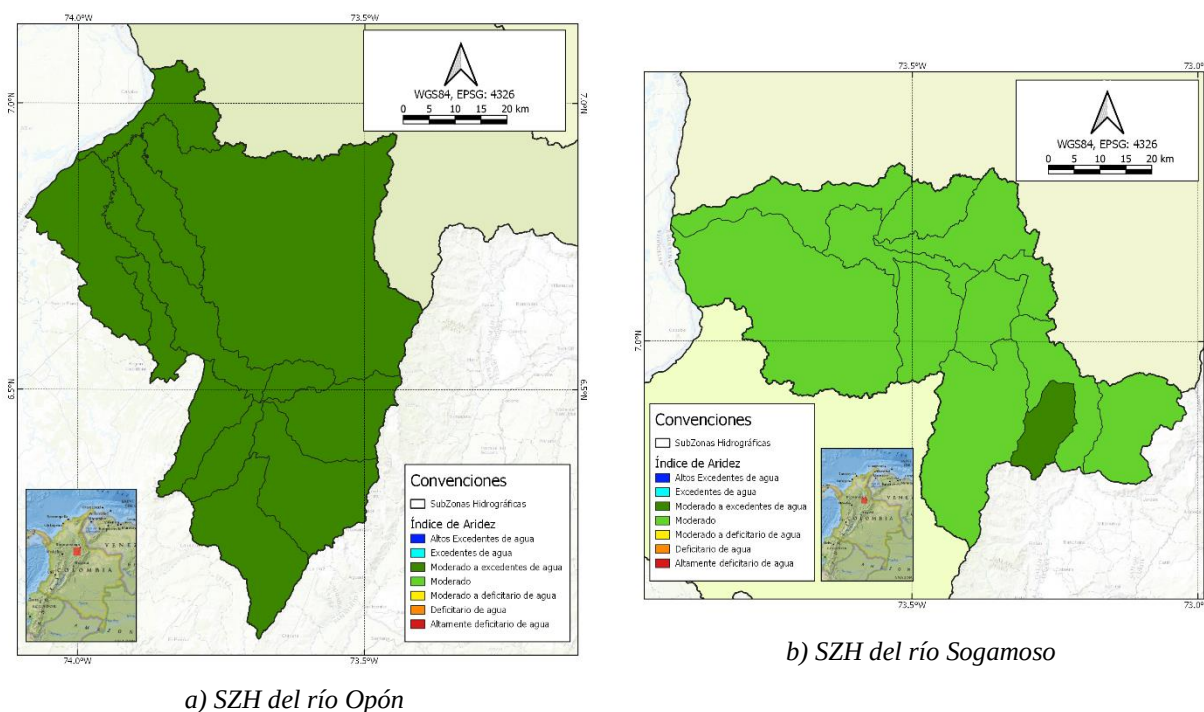


Figura 3.22 Índice de Aridez en las cuencas de nivel subsiguiente de las SZH de interés

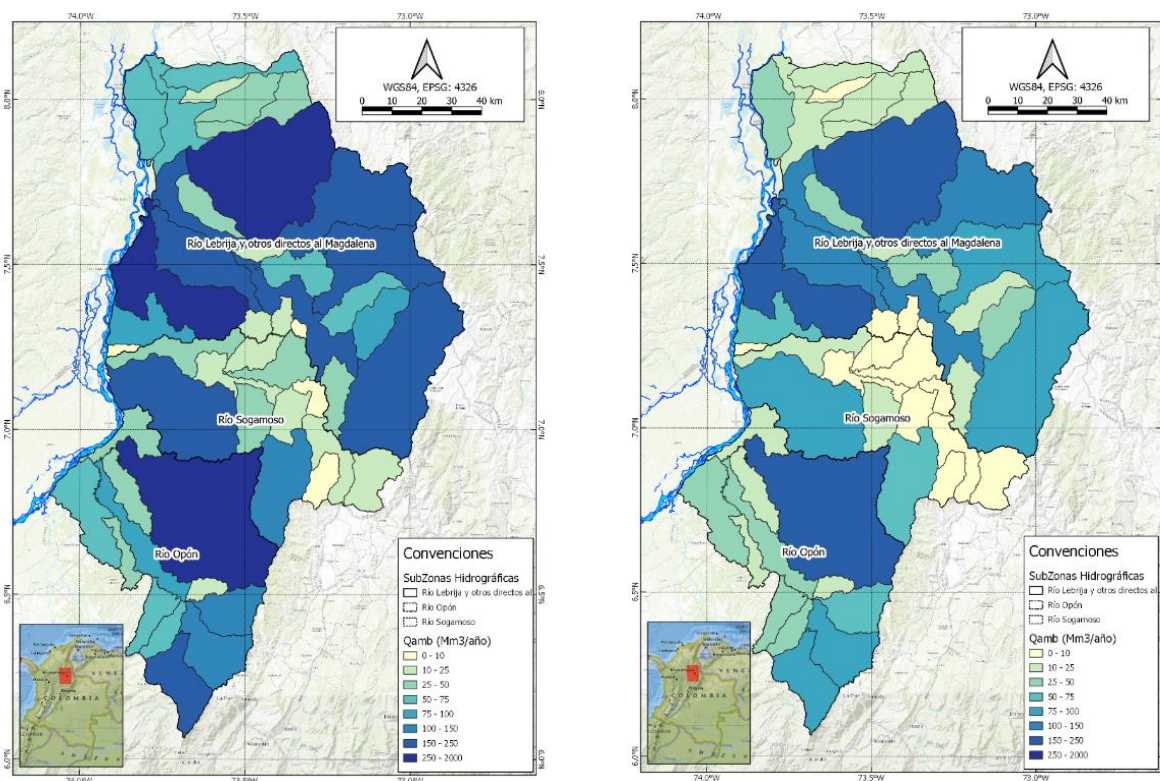
3.3. Caudal ambiental

El caudal ambiental corresponde a una métrica que describe la cantidad, la duración, la frecuencia, el momento y calidad de los caudales necesarios para sustentar los ecosistemas de agua dulce y los medios de vida y el bienestar social que dependen de estos ecosistemas.

Para definir el componente hidrológico del caudal ambiental en las unidades de análisis, se utiliza la metodología adoptada en el Estudio Nacional del Agua aplicada a los resultados de la modelación hidrológica. Según este método, se consideran las curvas de duración de caudales, se estima el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) como el volumen por debajo del caudal medio,

dividido por el volumen por debajo de la curva de duración. Cuando el IRH es superior a 0.7 el caudal ambiental a adoptar es el Q85, si el IRH está por debajo de 0.7 el caudal a adoptar es Q75. Para la estimación del caudal ambiental en año seco, se asume que el caudal ambiental corresponde al porcentaje estimado en condiciones promedios de la oferta hídrica total superficial.

Como puede verse en la Figura 3.22a, el caudal ambiental determinado varía dependiendo del tamaño de la unidad de análisis, en año normal. Esto se debe a que depende del caudal equivalente que a su vez depende del área analizada. Sin embargo, se evidencia que la zona del río Opón los valores son un poco mayores para áreas similares. Los valores exactos para cada unidad pueden verse en la Tabla 3.10. De manera similar se hallaron los valores estimados para el caudal ambiental de año seco, que pueden verse en la Figura 3.22b. Se observa que en algunas zonas hay una reducción sustancial del volumen necesario para conservar las funciones de los ecosistemas.



a) para año normal

b) para año seco

Figura 3.22 Caudal ambiental por metodología IDEAM-ENAs para año normal y año seco

Tabla 3.10. Caudal ambiental para las unidades de análisis

Und. Análisis	Qamb (Mm³/año)	Qamb (m³/s)	Qamb año seco (Mm³/año)	Qamb año seco (m³/s)
240501	33.850	1.07	16.910	0.54
240502	172.705	5.48	91.538	2.90
240503	35.463	1.12	17.671	0.56
240504	114.142	3.62	64.540	2.05
240505	8.269	0.26	1.983	0.06
240506	20.219	0.64	8.336	0.26
240507	14.412	0.46	4.643	0.15
240508	8.618	0.27	2.876	0.09
240509	30.151	0.96	9.719	0.31
240510	20.219	0.64	8.464	0.27
240511	21.221	0.67	9.554	0.30
240512	22.911	0.73	9.897	0.31
231901	215.164	6.82	111.131	3.52
231902	21.290	0.68	9.562	0.30
231903	6.135	0.19	2.329	0.07
231904	69.758	2.21	28.269	0.90
231905	234.459	7.43	106.917	3.39
231906	21.331	0.68	10.715	0.34
231907	43.733	1.39	25.019	0.79
231908	177.322	5.62	106.130	3.37
231909	295.708	9.38	187.444	5.94
231910	13.176	0.42	3.921	0.12
231911	97.338	3.09	62.555	1.98
231912	6.870	0.22	3.970	0.13
231913	353.051	11.20	176.439	5.59
231914	44.986	1.43	18.452	0.59
231915	42.017	1.33	14.860	0.47
231916	16.669	0.53	6.292	0.20
231917	52.874	1.68	21.051	0.67
231918	52.633	1.67	25.673	0.81
231919	54.234	1.72	24.591	0.78
231920	81.105	2.57	33.240	1.05
231921	58.175	1.84	19.747	0.63
231922	31.570	1.00	14.441	0.46
231923	213.527	6.77	95.533	3.03

231924	190.825	6.05	81.526	2.59
231401	29.477	0.93	17.425	0.55
231402	73.272	2.32	40.607	1.29
231403	25.271	0.80	13.643	0.43
231404	76.862	2.44	44.392	1.41
231405	69.376	2.20	43.163	1.37
231406	52.427	1.66	32.656	1.04
231407	150.977	4.79	95.872	3.04
231408	148.644	4.71	89.054	2.82
231409	104.111	3.30	60.126	1.91
231410	413.318	13.11	236.026	7.48
231411	41.368	1.31	22.810	0.72
231412	17.182	0.54	10.120	0.32

Con respecto a la metodología del IDEAM-Estudios Nacionales del agua, se debe aclarar que esa estimación en **unidades de análisis de nivel subsiguiente** *no puede tomarse para tramos específicos de cuerpos de agua dentro de la región*, y que corresponde a la estimación de un volumen anual que requieren los ecosistemas dentro del polígono analizado.

4. Bibliografía

- Abbaspour, K. (2019). *SWAT-CUP, SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. Zürich, Suiza: 2w2e institute.
- Abbaspour, K. C., Johnson, C. A., & van Genuchten, M. T. (2004). Estimating Uncertain Flow and Transport Parameters Using a Sequential Uncertainty Fitting Procedure. *Vadose Zone Journal*, 1340-1352.
- Arias, P., Garreaud, R., Poveda, G., Espinoza, J. C., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., . . . van Oveelen, P. (2021). Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Frontiers in earth science*, 505467.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *SWAT input/output documentation*. Austin: Texas Water Resources Institute.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., . . . Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., . . . Jha, M. (2012). Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 1491-1508.
- Arora, V. (2002). The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of hydrology*, 164-177.
- Baatz, R., Hendricks, H., Eusckirchen, E, ... (2021) Reanalysis in Earth System Science: Toward Terrestrial Ecosystem Reanalysis. *Reviews of Geophysics*, 1-39, 59(3)
- Baez-Villanueva, O., Zambrano-Bigiarini, M., Beck, H., McNamara, I., Ribbe, L., Nauditt, A., . . . Thinh, N. X. (2020). RF-MEP: A novel Random Forest method for merging gridded precipitation products and ground-based measurements. *Remote Sensing of Environment*, 111606.
- Beck, H., Van Dijk, A., de Roo, A., Dutra, E., Fink, G., Orth, R., & Schellenkens, J. (2017). Global evaluation of runoff from 10 state-of-the-art hydrological models. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 2881–2903.
- Beven, K. (2012). *Rainfall runoff modelling: the primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- DANE. (2014). Censo Nacional Agropecuario. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- DANE, (2018). Censo Nacional de Población y Vivienda- CNPV, Departamento Administrativo Nacional de Estadística. http://microdatos.dane.gov.co/index.php/catalog/643/get_microdata

- DANE. (2020). Encuesta de Sacrificio de Ganado ESAG. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-sacrificio-de-ganado/encuesta-de-sacrificio-de-ganado-esag-historicos>
- DANE. (2021). DANE - Estadísticas por tema Construcción. Bogotá. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion>
- Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). Soil and water assessment tool (SWAT) model: current developments and applications. *Transactions of the ASABE*, 53(5), 1423-1431.
- Duque Gardeazabal, N. (2021). *INFORME DEL ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA OFERTA HÍDRICA PARA ZONA DEL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Duque Gardeazabal, N. (2022). *INFORME FINAL SOBRE LA REFINACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS EN EL VMM*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Duque-Gardeazabal, N., & Fuentes, C. (2019). Using R to easily and efficiently predict the uncertainty in simulations of environmental models. *hydrolatinoamerican young researchers journal*, 17-20.
- Federación Nacional de Cafeteros, & Cenicafe. (2015). Beneficio del café en Colombia - Prácticas y estrategias para el ahorro, uso eficiente del agua y el control de la contaminación hídrica en el proceso de beneficio húmedo del café.
- Flügel, W. (1995). Delineating hydrological response units by geographical information system analyses for regional hydrological modelling using PRMS/MMS in the drainage basin of the River Bröl, Germany. *Hydrological Processes*, 423-436.
- Funk, C., Verdin, A., Michaelsen, J., Peterson, P., Pedreros, D., & Husak, G. (2015). A global satellite-assisted precipitation climatology. *Earth System Science Data*, 275-287.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 80-91.
- GWP. (2000). *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos*. Obtenido de <http://www.la-wetnet.org/lasmiradasdelagua/descargas/GIRH.pdf>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 96-99.
- IDEAM. (2008). *Mapa de cobertura de la tierra Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia*. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudio Ambientales (IDEAM).
- IDEAM (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C. 362 páginas. ISBN: 978-958-8067-32-2©. Diciembre de 2010, Colombia

IDEAM (2011a). Hoja metodológica del indicador Índice de Calidad del Agua (Versión 1.00).

Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del Agua

Superficial. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM (2011b). Hoja metodológica del indicador Índice de Alteración Potencial de la Calidad del Agua (Versión 1.00). Sistema de Indicadores Ambientales de Colombia - Indicadores de Calidad del Agua Superficial. Bogotá D.C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua - ERA*. Bogotá D.C.: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua-ERA*. Bogotá.

IDEAM. (2013). *Zonificación hidrográfica de Colombia*. Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá.

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: IDEAM.

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua ENA 2018*. Bogotá.

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *IEEE International Conference on Neural Network*, (págs. 1942-1948).

Kolokytha, E., Oishi, S., & Teegavarapu, R. S. (2017). *Sustainable Water Resources Planning and Management Under Climate Change*. Singapore: Springer Nature. doi:10.1007/978-981-10-2051-3

MAVDT. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, D.C.

Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R., & Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 885-900.

Moriasi, D., Gitau, M., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 1763-1785.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. College Station, Texas: Texas A&M University System.

OMM – Organización Meteorológica Mundial. (2011). *Guía de Prácticas Hidrológicas Vol I y II*. N°168 (6 ed.). Ginebra. 654 páginas. ISBN 978-92-63-30168-0. 2011, Suiza.

OMM. (2012). *Glosario Hidrológico Internacional*. ISBN 978-92-63-03385-8.

- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.
- Refsgaard, J. C., van der Sluijs, J. P., Højberg, A. L., & Vanrolleghem, P. A. (2007). Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance. *Environmental Modelling and Software*, 1543-1556.
- Rogelis, M. C., & Werner, M. G. (2013). Spatial Interpolation for Real-Time Rainfall Field Estimation in Areas with Complex Topography. *Journal of Hydrometeorology*, 85-104.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., . . . Stokes, D. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1015-1058.
- Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal*, 1569-1578.
- Téllez Guío, P. (2020). *PROPUESTA DE CONTROLES DE CALIDAD PARA LAS VARIABLES PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA DEL AÍRE MEDIADAS EN ESTACIONES METEOROLÓGICAS CONVENCIONALES Y AUTOMÁTICAS*. Bogotá D.C.: Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- UNESCO. (2006). *2o Informe sobre El Desarrollo de los Recursos Hidricos del Mundo: "El Agua una responsabilidad compartida"*. Obtenido de www.unesdoc.unesco.org/images0014/001144409s.pdf.