



Determinando los efectos del cambio climático y del cambio en usos del suelo en la Macro Cuenca Magdalena Cauca utilizando el modelo de suelo-superficie e hidrológico MESH

Pedro Felipe Arboleda Obando

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2018

Determinando los efectos del cambio climático y del cambio en usos del suelo en la Macro Cuenca Magdalena Cauca utilizando el modelo de suelo-superficie e hidrológico MESH

Pedro Felipe Arboleda Obando

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título
de:

Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

PhD Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval

Línea de Investigación:

Hidrología e Hidrometeorología

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos - GIREH

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2018

Y por el otro lado, por donde está el recodo, el río se debía de haber llevado, quien sabe desde cuándo, el tamarindo que estaba en el solar de mi tía Jacinta, porque ahora ya no se veía ningún tamarindo. Era el único que había en el pueblo, y por eso nomás la gente se da cuenta de que la creciente esta que vemos es la más grande de todas las que ha bajado el río en muchos años. Juan Rulfo

Agradecimientos

Largo camino he recorrido para presentar este documento y largos debiesen ser por lo tanto estos agradecimientos. Pero el espacio es corto, así como la memoria. Empiezo pues agradeciendo a mis padres y a mi hermano, por su apoyo durante todo este trabajo de tesis. A mi padre Carlos, cuyos continuos comentarios y observaciones sin duda mejoraron la calidad de mi trabajo. A mi madre Cristina, pues sus enseñanzas me dieron disciplina y tenacidad para culminar esta etapa y ver aún más allá. A mi hermano Francisco, pues sus charlas dieron pie a dudas acerca de quiénes somos y por qué hacemos lo que hacemos. Sin su apoyo, sería imposible hablar de un trabajo de tesis. Asimismo, agradezco a mis abuelos y a todos esos familiares que tuvieron la paciencia de escucharme una noche, una tarde, una mañana.

Igualmente, me gustaría agradecer al profesor Erasmo Alfredo Rodríguez Sandoval, por la oportunidad dada, el apoyo brindado y, en general, por todo el trabajo que, de su parte, ha permitido culminar esta etapa. Solo tengo palabras de gratitud por haber confiado en mí y por haber permitido que se modelara una cuenca tan grande y compleja como la de los ríos Magdalena y Cauca, dentro del proyecto Earth2Observe. Y también a los demás profesores de la maestría, a cada uno de los que se tomó el tiempo de explicarme para ver la naturaleza con ojos maravillados.

Por supuesto que no puedo dejar por fuera de estas palabras al grupo de la Universidad de Saskatchewan y de Environment Canada. A Bruce Davison, a Andrew Ireson, a Daniel Princz, a Luis Alejandro Morales. Sin Uds. no hubiera sido posible presentar la implementación de un modelo tan complejo como MESH. Esos cuatro meses en el crudo invierno canadiense, allá en Saskatoon, fueron cruciales para llevar a feliz término este trabajo. Muchas gracias por acogerme y acompañarme.

A las instituciones que dieron apoyo a esta investigación, ya fuese a través de información o de financiamiento. Al IDEAM, a Cormagdalena, al IGAC. Asimismo, doy mi agradecimiento al gobierno canadiense, pues por intermedio de la beca ELAP me fue posible cumplir con la estadía de investigación en Saskatoon.

A mis compañeros del grupo GIREH, asimismo, doy infinitas gracias por su apoyo. Gracias por los alipuses, por las conversaciones mañaneras, por los tintos al caer la tarde, por los comentarios graciosos que dieron un respiro al estrés propio de una maestría. A Nicolás, a Carolina, a Inés, a Albeiro, a David, a Pedro Javier, a Camila, a Lorena, a Jose, a Sergio, a Edwin, y a tantos otros que no nombro, pero que tuvieron su lugar y su momento. A María Cristina, tus palabras y tus acciones, tus desvelos y tus comentarios, en fin, todo tu apoyo, me cortan la palabra. Mi agradecimiento hacia ti va más allá de estas pobres gotas de tinta.

Asimismo, me permito agradecer a mis compañeros de afuera, de hace tantos y tantos años, quienes preguntaron, quienes apoyaron, quienes dieron palabras de aliento cuando se necesitaban. A Alejandro, a Luis Carlos, a Carlos Arturo (que dio ejemplo además), a Guillermo, a Daniel, a Sandra, a Juan, a Diego, a Miguel, a Santiago, y tantos otros que no alcanzo a nombrar

Y a todos a quienes esta flaca memoria dejó por fuera. Gracias. Espero que disfruten este documento, sean expertos o legos. Que la curiosidad les pique un poco más fuerte.

Resumen

Los modelos de gran escala, especialmente los de tipo *Land Surface*, han comenzado a ser implementados en grandes cuencas en diferentes partes del mundo, con el fin de simular de manera regional su hidrología. Sin embargo, implementaciones de este tipo apenas empiezan a realizarse en la Macro Cuenca Magdalena Cauca, pese a su importancia en términos demográficos y económicos para el país. Dada esta necesidad, se decidió implementar un modelo de tipo Land Surface llamado MESH, que simula el balance energético e hídrico de manera semi-distribuida y que incluye un módulo de tránsito del caudal y un módulo de intercambio con un acuífero sub-superficial. Adicionalmente, se ha utilizado el modelo para simular escenarios de cambio climático (cuatro escenarios) y efectos de un escenario de cambio en el uso del suelo dentro de la Macro Cuenca, para analizar sus impactos de manera individual, y en conjunto.

La implementación inicial del modelo MESH en la cuenca del río Coello permitió proponer y ajustar una metodología de implementación del modelo para toda la Macro Cuenca y definir la configuración general para el modelo implementado a escala regional. La aplicación de MESH a nivel de mesoescala mostró buenos valores del coeficiente de Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) en las partes medias y bajas de la macrocuenca, pero se advirtieron dificultades en las zonas altas de la cuenca. Asimismo, se encontraron problemas de equifinalidad, dada la complejidad del modelo y la necesidad de calibrar una gran cantidad de parámetros. El conjunto de valores de parámetros escogido tuvo 42 puntos de control con valores de NSE por encima de 0, de un total de 88 puntos de control. En cuanto a la implementación de simulaciones bajo escenarios de cambio climático y de cambio en los usos del suelo, se observaron cambios importantes en los valores de evapotranspiración y humedades del suelo, con aumentos regionales y locales de gran importancia. En general, para la Macro Cuenca los escenarios analizados indican que la evapotranspiración aumenta hasta en un 3.38%, se aumenta la humedad del suelo hasta en un 8% y la escurriencia puede variar entre un -4.25% y un 4.92%, según el escenario analizado. Estos cambios presentan patrones y tendencias diferenciadas a nivel regional y local.

Palabras clave: Implementación de modelos hidrológicos de gran escala, modelo MESH, cambio climático, cambio del uso del suelo, macrocuenca Magdalena-Cauca.

Abstract

Large-scale hydrological models, especially Land Surface models, have been implemented worldwide in different macrobasins to simulate and assess hydrology at a regional scale. However, despite the importance of the Magdalena-Cauca Basin in demographics and economy, implementation of large-scale models has only started recently. To address this need, MESH, a Land Surface Hydrological model, capable of simulating the water and energy balances in a semi-distributed fashion, was implemented in the Magdalena Cauca Basin. In addition, this model was used to assess possible impacts of climate and land use changes, across the basin.

An initial implementation of the MESH model was made in the Coello river basin, a sub catchment of the macrobasin, to adjust the methodology and main settings in the implementation. The Magdalena Cauca basin model showed good results in the middle and low lands, but unsatisfactory results were encountered in the high lands. Equifinality problems were detected on the calibration process, due to the model complexity and the large number of parameters under calibration. The parameter values dataset chosen featured 42 control points out of 88, with NSE values above 0. When considering the model simulations under climate and land use change scenarios, evapotranspiration and soil humidity showed important changes, with large regional and local variability. In general, evapotranspiration featured an increase up to 3.38%, soil humidity increase up to 8%, and runoff varies between -4.25% and 4.92%, according to the considered scenario. These trends are not the same across the basin, where regional and local differences exist.

Keywords: Large-scale hydrological model implementation, MESH model, climate change, land use change, Magdalena-Cauca macrobasin.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Estado del arte.....	5
1.1 La modelación de gran escala en hidrología	6
1.2 Usos de modelos hidrológicos de gran escala	7
1.2.1 Análisis de efectos de cambio climático	7
1.2.2 Análisis en cuencas no instrumentadas	8
1.2.3 Uso como herramienta de gestión del recurso hídrico	9
1.3 Ventajas, desventajas y perspectivas en el desarrollo de los modelos <i>Land Surface</i>	9
1.4 Implementación de LSS y H-LSS en cuencas tropicales.....	12
1.5 Implementación de LSS y H-LSS en Colombia.....	14
2. El modelo MESH y herramientas asociadas de calibración automática	17
2.1 El modelo MESH	17
2.1.1 Representación de la heterogeneidad espacial: el GRU	18
2.1.2 CLASS	20
2.1.3 WATFLOOD.....	24
2.1.4 Implementación computacional	25
2.1.5 Implementación computacional Grado de acoplamiento de los subsistemas según variables de estado	26
2.2 Algoritmo de calibración automática multi-objetivo: DDS y su implementación en Ostrich.....	27
3. Caso de estudio.....	31
3.1 La Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	31
3.2 Primera implementación de MESH: La cuenca del río Coello	33
3.3 Información hidrometeorológica disponible en la MCMC	35
3.4 Mapas estáticos de la MCMC	39
3.5 Escenarios de cambio climático para la MCMC	42
3.6 Escenarios de cambio en el uso del suelo para la MCMC	47
4. Metodología general.....	55
4.1 Implementación de MESH en la cuenca del río Coello.....	55

4.1.1	Datos de entrada	55
4.1.2	Configuración general del modelo.....	57
4.1.3	Implementación computacional de los GRU	58
4.1.4	Calibración automática	59
4.2	Implementación de MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	61
4.2.1	Datos de entrada	61
4.2.2	Implementación computacional de los GRU	62
4.2.3	Configuración general del modelo.....	62
4.3	Calibración de un modelo H-LSS no parsimonioso de gran escala	64
4.4	Experimentos bajo escenarios de cambio climático y en el uso del suelo.....	65
5.	Resultados y discusión	69
5.1	Resultados de la implementación de MESH en la CRC.....	69
5.1.1	Primera aproximación: definición de una estrategia de modelación	69
5.1.2	Proceso de calibración: resultados y conclusiones de configuración para un modelo de cuenca tropical de gran escala	73
5.2	Calibración del modelo MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	78
5.3	Escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	88
5.3.1	Efectos sobre la evapotranspiración	88
5.3.2	Efectos sobre la humedad de la primera capa del suelo	92
5.3.3	Efectos sobre los caudales	95
5.3.4	Efectos sobre el balance hídrico	99
5.4	Acerca de la incertidumbre en los resultados	106
6.	Conclusiones y recomendaciones	115
6.1	Conclusiones.....	115
6.2	Recomendaciones.....	119
	ANEXOS.....	121
A.	Creación de bases de datos de mapas meteorológicos y validación para la Cuenca del río Coello y para la Macro Cuenca Magdalena Cauca	122
B.	Mapas estáticos originales de la Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	141
C.	Estaciones seleccionadas para las campañas de calibración en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.....	147
D.	Gráficas de dispersión de parámetros del modelo de cuatro GRU para la Cuenca del río Coello	150
E.	Valores de NSE para cada punto de control, por campaña de calibración.....	158
F.	Resultados de caudal por estación hidrométrica en la Macro Cuenca Magdalena Cauca, para campaña de calibración 6.....	163
G.	Curvas de duración de caudales por estación hidrométrica bajo escenarios de cambio climático y de uso del suelo	184
H.	Análisis de sensibilidad paramétrica sobre modelo del río Coello: aproximación con nueva metodología para GLUE utilizando DDS como algoritmo de búsqueda	219

Bibliografía225

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de los procesos representados por MESH en cada una de las celdas del dominio analizado. Elaborado a partir de (Verseghy 2012; Kouwen 2017).	18
Figura 2. Representación computacional de la heterogeneidad espacial de una superficie en MESH y flujos horizontales de agua simulados. Fuente: propia.....	20
Figura 3. Diagrama del algoritmo DDS. Elaboración propia basada en (Tolson and Shoemaker 2007).....	28
Figura 4. Ubicación de la Macro Cuenca Magdalena Cauca. En la parte superior se muestra la ubicación espacial. En la parte inferior se muestran los ríos Magdalena y Cauca como ríos principales de la red de drenaje (izq.) y las zonas hidrográficas según IDEAM (der.). Elaboración propia con información de (IDEAM 2013)	32
Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Coello dentro de la Macro Cuenca Magdalena Cauca (columna izq. y panel inferior der.) y ordenes de la red de drenaje según clasificación de Horton-Strahler (panel superior, der.)	34
Figura 6. Valores promedio de variables meteorológicas en la MCMC y sus respectivas unidades de medida, para el período 1981-2011. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe.	40
Figura 7. Mapas estáticos procesados para uso en MESH (a. Modelo Digital, b. Textura del suelo, c. Cobertura vegetal).....	41
Figura 8. Cambios mensuales en la precipitación, en porcentaje, bajo escenarios de cambio climático. Elaboración propia a partir de datos de IDEAM, 2015.	44
Figura 9. Cambios mensuales en temperatura, en grados Celsius, bajo escenarios de cambio climático. Elaboración propia a partir de datos de IDEAM, 2015.	45
Figura 10. Cambios en el porcentaje de cobertura de bosque según área, de acuerdo con los resultados del modelo QuickLuc. S/C significa sin cambio. Elaboración propia a partir de datos de salida del modelo Quickluc 2.0.....	48
Figura 11. Comparación de línea base de cobertura vegetal para la MCMC y escenario de cambio de cobertura, según grupos de clasificación propuestos para MESH, para fracción de área por celda. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe	51
Figura 12. Gráficas de dispersión entre Elevación y porcentajes areales de cobertura, para línea base de coberturas	52
Figura 13. Gráficas de dispersión entre Elevación y porcentajes areales de cobertura, para escenario de coberturas	53
Figura 14. Diagrama de la metodología seguida para implementar el modelo MESH en la Cuenca del río Coello (CRC).	62

Figura 15. Precipitación media anual sobre la Macro Cuenca Magdalena Cauca, a partir de datos observados interpolados por el método de Kriging con deriva externa.	67
Figura 16. Diagrama de la metodología seguida para implementar MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.	68
Figura 17. Experimentos en fase de calibración para la CRC	74
Figura 18. Experimentos en fase de validación para la CRC.....	76
Figura 19. <i>Boxplot</i> y <i>dottyplot</i> del valor de NSE por campaña de calibración/validación, utilizando los 88 puntos de control en la MCMC.....	79
Figura 20. Densidad de probabilidad y <i>dottyplot</i> de valores del NSE, por campaña de calibración, utilizando los 88 puntos de control en la MCMC.....	80
Figura 21. <i>Boxplot</i> y <i>dottyplot</i> del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC, con valores del NSE por encima de 0.	80
Figura 22. Densidad de probabilidad y <i>dottyplot</i> del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC, con valores del NSE por encima de 0.	81
Figura 23. <i>Boxplot</i> y <i>dottyplot</i> de NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC con valores del NSE por debajo de 0.	82
Figura 24. Densidad de probabilidad y <i>dottyplot</i> del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC con valores del NSE por debajo de 0.	83
Figura 25. Valores espaciales del NSE por campaña, en calibración (cal) y validación (val).	86
Figura 26. Hidrógrafas para estaciones de validación (datos observados y simulados) con valores del NSE y bias, considerando los valores paramétricos de la campaña de calibración 6.....	87
Figura 27. Evapotranspiración promedio anual para línea base (lu0cc0), escenarios de uso del suelo (partícula lu) y escenarios de cambio climático (partícula cc).....	89
Figura 28. Diferencia promedio de evapotranspiración entre línea base y escenarios de uso del suelo (lu) y de cambio climático (cc).....	92
Figura 29. Humedad de la primera capa del suelo para línea base, escenarios de uso del suelo (lu) y escenarios de cambio climático (cc).	94
Figura 30. Diferencia porcentual de la humedad de la primera capa de suelo entre la línea base y los escenarios de uso del suelo (lu) y de cambio climático (cc).	95
Figura 31. Curva de duración de caudales para datos observados y escenarios de cambio climático sin cambio en la cobertura vegetal, en los cuatro puntos de control escogidos para validación.....	97
Figura 32. Curva de duración de caudales para datos observados y escenarios de cambio climático con cambio en la cobertura vegetal, en los cuatro puntos de control escogidos para validación.....	98

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Archivos de entrada del modelo MESH. Fuente: propia a partir de (University of Saskatchewan 2017)	25
Tabla 2. Morfometría de la cuenca del río Coello. Elaboración propia a partir de (Méndez et al. 2015)	35
Tabla 3. Métodos de escalamiento temporal para pasar de datos diarios a datos cada 3 hr, para cada variable meteorológica analizada.....	57
Tabla 4. Clasificación de GRU según elevación y cobertura para la CRC.	58
Tabla 5. Número de parámetros incluidos en el proceso de calibración, para el caso de 4 GRU consideradas en la CRC.....	60
Tabla 6. Definición de GRU para la MCMC, a partir de clasificaciones de elevación y coberturas y selección de parámetros según característica del GRU.	63
Tabla 7. Parámetros incluidos en el proceso de calibración, para la Macro Cuenca Magdalena Cauca.	63
Tabla 8. Características de la calibración por campañas.....	66
Tabla 9. Códigos de escenarios de experimentos bajo escenarios de cambio climático y de cambio en la cobertura vegetal en la MCMC.	67
Tabla 10. Experimentos iniciales en la CRC, simulación diaria de caudales en la estación Payandé.	70
Tabla 11. Balance hídrico de largo plazo por escenario, para componentes generales y para el componente de escurrimiento, para los doce años de simulación de escenarios. .	101
Tabla 12. Diferencia entre los componentes del balance hídrico de largo plazo de los escenarios con respecto al escenario base lu0cc0.	102
Tabla 13. Subzonas hidrográficas con mayores porcentajes de cambio en la humedad de la primera capa del suelo, y escenario bajo el que se presenta ese cambio.....	104
Tabla 14. Subzonas hidrográficas con mayores porcentajes de cambio ETP, y escenario bajo el que se presenta ese cambio.	105

Introducción

La Macro Cuenca Magdalena Cauca (MCMC), con un área de alrededor de 257.000 km², es la cuenca regional más importante en Colombia debido a su significativo peso en términos demográficos y económicos. Cerca del 80% de la población del país vive dentro de los límites de esta cuenca, y cerca del 80% de la producción económica tiene lugar dentro su área (Cormagdalena e IDEAM 2001).

La amplia presencia antrópica en la MCMC implica tensiones al interior de la cuenca para gestionar la demanda del recurso hídrico, debido al uso de agua para actividades agropecuarias, pero también para consumo humano y generación eléctrica (Cormagdalena e IDEAM 2001). Además, estas presiones tienden a aumentar en el tiempo, por el continuo crecimiento demográfico (Cormagdalena e IDEAM 2001).

La modelación hidrológica a escala regional (es decir, para toda el área de la MCMC) puede aportar información valiosa para gestionar adecuadamente el recurso hídrico, más aún en un contexto de crecientes presiones antrópicas. Sin embargo, este tipo de esfuerzos comenzaron hace pocos años en el país (ver Angarita et al. 2013; Rodríguez et al. 2017). Ante la situación planteada, la construcción de modelos regionales en la MCMC resulta importante para las comunidades humanas y los ecosistemas de la zona, pues busca analizar detalladamente los patrones y tendencias de las variables hidrológicas, entender las interacciones entre ellas, comprender el impacto de las actividades humanas y planear acciones de gestión que mitiguen sus consecuencias negativas.

Sin embargo -de acuerdo con la revisión bibliográfica realizada- no se ha evidenciado la implementación en la MCMC de modelos hidrológicos de parametrización de la superficie terrestre (Hydrology - *Land Surface Scheme*, H-LSS, por sus siglas en inglés). La principal característica de este modelo es la simulación acoplada del balance energético e hídrico a nivel de la superficie de la tierra.

Implementar un modelo de tipo H-LSS aporta una estructura físicamente basada en la comprensión de factores determinantes del ciclo hidrológico. Este tipo de modelos permite comparar valores de variables hidrológicas simuladas con bases de datos provenientes de sensores remotos. Y su uso en el marco de un ensamble hidrológico¹, junto a modelos conceptuales, aporta diversidad en el análisis de fenómenos hidrológicos, debido a la

¹ Un ensamble hidrológico puede definirse como varios modelos hidrológicos simulando el mismo evento hidrológico y la misma zona, con simulaciones diferentes. (Schellekens et al. 2017)

disminución de la incertidumbre ligada a las simplificaciones que realiza cada modelo individual (Schellekens et al. 2017).

Asimismo, los modelos H-LSS pueden ser utilizados en el análisis de cambio climático y cambios en el uso del suelo de manera regional, tarea de suma importancia en temas de gestión del recurso hídrico, en el contexto de cuencas regionales con amplia presencia de comunidades humanas y cambios pronunciados en sus características físicas e hidrológicas, como el caso de la MCMC.

Como un apoyo adicional a los recientes esfuerzos de modelación regional efectuados en la MCMC (Rodríguez et al. 2017), se decidió implementar un modelo de tipo H-LSS sobre toda la MCMC. Esta implementación se dio en el marco del desarrollo del proyecto Earth2Observe, proyecto de carácter internacional que, para el caso de Colombia, y bajo el liderazgo de la Universidad Nacional de Colombia, buscó validar y utilizar información meteorológica de reanálisis² para la MCMC. Esta validación incluyó implementación de modelos regionales y locales, para comparar resultados de simulación utilizando información local e información complementaria del reanálisis.

El modelo escogido fue el modelo MESH (Modélisation Environnementale communautaire - Surface Hydrology)(Pietroniro et al. 2006), modelo H-LSS de origen canadiense, de tipo semidistribuido³. Entre las ventajas de la implementación de MESH están: un código libre y en continuo desarrollo, amplia documentación acerca de su funcionamiento e implementación, acoplamiento de un módulo de tránsito a uno de simulación del balance energético (lo que lo hace idóneo para simulaciones de gran escala cuya calibración utiliza información de caudales), y una estructura que incluye la simulación de los principales fenómenos y procesos que se incluyen normalmente en los H-LSS.

Para tal fin, se realizó inicialmente la implementación del modelo MESH en la cuenca del río Coello, subcuenca ubicada en la parte alta de la MCMC. Esta primera implementación permitió analizar y definir la metodología y la configuración del modelo de escala regional. Posteriormente, se implementó y calibró el modelo para toda la MCMC, ajustando la metodología para solucionar los problemas de costo computacional, que no habían sido tenidos en cuenta originalmente, asociados al gran tamaño de la MCMC.

Con el modelo implementado, calibrado y validado, se simularon escenarios de cambio climático, cambio de uso del suelo y cobertura vegetal, y escenarios conjuntos, para analizar sus posibles efectos en la evapotranspiración, la humedad de la primera capa del suelo, la escorrentía, y sobre el balance hídrico de largo plazo como análisis integrador.

² Un reanálisis meteorológico consiste en la utilización de un modelo de predicción numérica del clima (Numerical Weather Prediction, NWP, por sus siglas en inglés) con la asimilación de una gran cantidad de información observada sobre un largo periodo de tiempo (Dee et al. 2011).

³ Por semidistribuido se entiende un modelo que representa la superficie en forma de rejilla o celda, pero que las agrupa en categoría según un “marcador”, pudiendo ser este un índice, el tipo de suelo, la principal cobertura vegetal dentro de la celda, etc. (Maclean et al. 2010).

Este documento presenta en el capítulo 1 el estado del arte de la modelación de gran escala, centrándose en la aplicación de modelos de tipo *Land Surface*, las ventajas y desventajas que presenta su aplicación, los problemas adicionales que existen para utilizar estos modelos en cuencas tropicales y la implementación de modelos de gran escala o de tipo *Land Surface* en Colombia.

En el capítulo 2 se presenta la estructura del modelo MESH, las ecuaciones utilizadas en el cálculo de los flujos verticales y horizontales, así como el algoritmo de calibración automática especialmente diseñado para modelos complejos y con gran cantidad de parámetros como MESH, conocido como DDS.

En el capítulo 3 se describe la información del caso de estudio, tanto de tipo meteorológico como hidrológico, así como la información de tipo físico, contenida en mapas estáticos. Asimismo, se muestra la información utilizada para generar los escenarios de cambio climático y la metodología utilizada para obtener el escenario de cambio en la cobertura vegetal.

En el capítulo 4 se muestra la metodología general seguida a lo largo del estudio, tanto para la implementación inicial del modelo MESH en la cuenca del río Coello, como para la MCMC, así como las herramientas utilizadas en el análisis de cambio climático y de cambio en la cobertura vegetal, o uso del suelo.

En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos, tanto para la cuenca del río Coello, como para la MCMC, y se hace el análisis de los resultados obtenidos y de las decisiones de modelación implementadas para definir el conjunto de parámetros a calibrar. Asimismo, se entran a analizar detalladamente los resultados bajo escenarios de cambio climático y cambio en la cobertura vegetal.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo realizado y se formulan algunas recomendaciones de mejoramiento e investigación a futuro que permitirán mejorar los resultados aquí obtenidos.

Como último inciso dentro de esta introducción y para propósitos de dar claridad acerca de los alcances y propósitos de la investigación aquí descrita, se formulan a continuación los objetivos general y específico de la misma.

OBJETIVO GENERAL

Analizar efectos de cambio climático y cambios en el uso del suelo en la macrocuenca Magdalena-Cauca, a través de la rigurosa implementación del modelo hidrológico de macroescala MESH.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Evaluar el comportamiento del modelo MESH en un terreno tropical complejo, usando observaciones in-situ, observaciones derivadas de sensores remotos y datos de reanálisis del recurso hídrico, producidos en el marco del proyecto Earth2Observe.
2. Establecer los posibles efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos disponibles en la macrocuenca, a través de la implementación del modelo MESH, considerando los escenarios de la tercera comunicación nacional de cambio climático.
3. Determinar los posibles efectos del cambio en el uso del suelo, asociados a cambios en la frontera agrícola, urbanización y deforestación, en los recursos hídricos de la macrocuenca.
4. Crear sinergias con el trabajo principal del proyecto Earth2Observe, para incorporar el modelo MESH en el ensamble de modelos hidrológicos desarrollado.

1.Estado del arte

La modelación numérica, entendida como la representación matemática de un fenómeno (Kite and Pietroniro 1996; Beven 2012), constituye una herramienta para simular de manera simplificada un fenómeno real (Silberstein 2006). En el caso de la modelación en hidrología, sus entradas y salidas son variables hidrometeorológicas medibles (Chow et al. 1994) y de manera general, tiene tres objetivos principales: organizar estructuralmente el conocimiento obtenido de un sistema real, examinar la validez de la información recopilada y explorar escenarios (¿Qué pasaría sí?) (Silberstein 2006).

El desarrollo de la modelación matemática en el campo de la hidrología comenzó a finales de los años 60 (Kite and Pietroniro 1996) y ha adquirido importancia debido a las limitaciones de medición del sistema hidrológico y a la necesidad de extrapolar los datos medidos en el espacio y en el tiempo (Beven 2012).

Las clasificaciones de los modelos hidrológicos son diversas, en parte debido a la gran cantidad de aproximaciones posibles:

- Desde un punto de vista del tratamiento espacial, se encuentran por un lado los modelos agregados (la entidad fundamental, la cuenca, es tratada es su conjunto mediante una sola unidad de análisis) y por el otro los modelos distribuidos (consideran la cuenca subdivida en muchas entidades, calculando variables de estado en cada entidad, y considerando los flujos entre esas entidades (Chow et al. 1994; Beven 2012). Los modelos que conservan algunas de las características entre estos dos extremos se conocen como modelos semidistribuidos (Silberstein 2006). Los modelos agregados presentan ventajas en su implementación computacional, por ser normalmente modelos parsimoniosos, es decir, con pocos parámetros para calibrar, pero pueden dejar de lado fenómenos importantes y son recomendados en casos en donde solo sea de interés simular el caudal, (Beven 2012), mientras que los modelos distribuidos tienen un considerable costo computacional y presentan grandes incertidumbres en los valores de sus parámetros (Pietroniro et al. 2006).
- Los modelos pueden incluir o no aleatoriedad en los datos, condiciones de frontera, y valores paramétricos (Chow et al. 1994) es decir, si son modelos determinísticos (permiten una salida al utilizar los mismos datos de entrada y el mismo conjunto de parámetros) o estocásticos (permiten alguna aleatoriedad en el valor de salida,

debido a incertidumbre en los datos de entrada, condiciones de frontera, o parámetros del modelo) (Beven 2012). Un modelo determinístico presenta desventajas por las limitaciones matemáticas de los modelos matemáticos, lo que puede generar errores en las respuestas del modelo, mientras que un modelo estocástico puede solucionar algunos de estos errores, pero necesita una gran cantidad de información, la cual no tiene base física (Moene and Dam 2014).

- La estructura utilizada para parametrizar el modelo también permite realizar una clasificación: Aquellos basados en las series de tiempo representando flujos por funciones de transferencia se conocen como modelos empíricos; los modelos conceptuales representan los fenómenos hidrológicos utilizando analogías de tanques (Silberstein 2006); finalmente, los modelos físicamente basados (o basados en procesos, según (Beven 2012)), son capaces (al menos en teoría) de utilizar parámetros medibles y adjudicables *a priori* (Silberstein 2006). En este caso, los modelos empíricos y conceptuales son parsimoniosos y de fácil implementación, pero carecen de una base física que dé pie a su utilización sin una calibración extensa previa, mientras que los modelos físicos son complejos y tienen una gran cantidad de parámetros, pero su base física permite utilizarlos adjudicando valores paramétricos basados en información secundaria, sin detrimento de la realización de un proceso de calibración, pues se ha reportado que, con una calibración rigurosa, un modelo físicamente basado mejora su efectividad en la obtención de resultados que se asemejen a las observaciones (Silberstein 2006; Davison et al. 2016).

1.1 La modelación de gran escala en hidrología

Siguiendo con el tema de las categorías de clasificación de los diversos modelos hidrológicos, estos podrían agruparse entre modelos para la escala local (cuencas urbanas o pequeñas cuencas rurales) y modelos de grandes áreas (modelos de gran escala, es decir, modelos que funcionan a nivel regional, como en la Macro Cuenca Magdalena Cauca, o a nivel global). En este campo, los esfuerzos realizados comenzaron en la década de los 80 (Overgaard et al. 2006), con el fin de establecer modelos que simulasen el ciclo hidrológico terrestre; estos esfuerzos se han realizado de manera paralela, lo que ha motivado la construcción de diversas filosofías de modelación (Gudmundsson et al. 2012a).

En general, estos modelos de tipo regional y global pueden dividirse en dos grandes grupos (Gudmundsson et al. 2012b; Sood and Smakhtin 2015): los modelos de parametrización de la superficie terrestre (*Land Surface Schemes*, LSS) y los modelos de hidrología global (*Global Hydrology Models*, GHM).

Los modelos de parametrización de la superficie terrestre (LSS) tienen como principal objetivo servir de frontera inferior a los modelos de circulación global (*Global Circulation Models*, GCM), centrándose en el balance de masa y energía (Overgaard et al. 2006). Su desarrollo parte de un simple “modelo de tanque” centrado en el balance energético

(primera generación), pasando por el método de fuerza restaurativa y tratamiento explícito de la vegetación y la conducción del calor dentro del suelo (segunda generación), hasta llegar a simular el control biológico de la evapotranspiración (tercera generación) (Gascoin 2009; Zhao and Li 2015) ligado al intercambio de CO₂ (Overgaard et al. 2006). En la referencia (Sato et al. 2015) se muestra el estado actual y posibles mejoras a este tipo de esquemas.

Los modelos de hidrología global (GHM) se concentran solamente en la ecuación de balance de masa, calibrándose a nivel de ecorregiones, regiones climáticas y macro cuencas de grandes ríos (Sood and Smakhtin 2015). Su estructura se concentra en los fenómenos de escorrentía, de suma importancia para conocer la disponibilidad del recurso hídrico, representando de manera detallada los procesos hidrológicos continentales y llegando a tener en cuenta el uso de agua por parte del ser humano, así como la existencia de embalses, etc. (Döll et al. 2016).

Si bien esta clasificación se utiliza de manera general entre GHM y LSS, también es cierto que muchos modelos toman características prestadas de uno u otro grupo, por lo que en ocasiones puede llegar a ser difícil separarlos (Sood and Smakhtin 2015; Kauffeldt et al. 2016; Zhang et al. 2016; Döll et al. 2016). En general, todos los modelos dividen la superficie terrestre en celdas (son distribuidos o al menos semi-distribuidos), simulan solamente el proceso hidrológico superficial y pueden utilizar parámetros estimados *a priori*, de acuerdo con las condiciones de tipo de suelo y vegetación (Pietroniro et al. 2006; Kauffeldt et al. 2016; Zhang et al. 2016).

Finalmente, y como se verá más adelante, en un intento por mejorar la simulación del ciclo hidrológico, se han acoplado diferentes esquemas de parametrización de LSS a modelos hidrológicos (principalmente para simular el tránsito de la escorrentía). La utilización de estos modelos acoplados ha dado lugar a la utilización del término *Hydrology-Land Surface Schemes* (H-LSS) para referirse a modelos que acoplan parametrizaciones tipo LSS a módulos hidrológicos de tránsito, para simular el ciclo hidrológico (Pietroniro et al. 2006).

1.2 Usos de modelos hidrológicos de gran escala

Existen diversos usos para estos tipos de modelos. Las características propias de sus estructuras computacionales (características distribuidas o semidistribuidas), los esfuerzos por alejarse de modelos conceptuales y por utilizar ecuaciones físicas (esfuerzo que da sus frutos en mayor o menor medida) y la posibilidad de acoplarlos a modelos de circulación global (GCM), han permitido su implementación con diversos propósitos, tanto en investigación como otros.

1.2.1 Análisis de efectos de cambio climático

Entre los varios usos dados a los modelos hidrológicos de gran escala, tal vez uno de los más ampliamente conocidos es el de simular los efectos del cambio climático. Las aproximaciones son muchas, por ejemplo Giuntoli et al. 2015 mostraron un ensamble de

cinco modelos de circulación global (GCM) para correr un ensamble de seis modelos hidrológicos bajo escenarios de cambio climático (RCP 8.5, el escenario de cambio más severo bajo el quinto reporte del IPCC). Por su parte, Ardoin-Bardin et al. 2009 realizaron un experimento a nivel regional utilizando un modelo lluvia-escorrentía (GR2M) que fue calibrado utilizando salidas de un GCM y datos observados, y luego fue corrido bajo escenarios de cambio climático (escenarios A1, A2, B1, B2 y A1b, de reportes del IPCC anteriores al quinto), en cuatro grandes cuencas de África Occidental.

Por su parte, Mendoza et al. 2016 analizaron el efecto de la escala de las salidas de modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) sobre los cambios proyectados por cuatro modelos hidrológicos (entre los que se cuentan VIC y Noah-LSM, modelos de tipo LSM, usados en modelación de gran escala). Si bien estos modelos fueron utilizados en cuencas relativamente pequeñas (tres cuencas en la región de Colorado, EE.UU, todas con áreas menores de 2000 km²), los resultados metodológicos pueden ser utilizados para modelación a gran escala. Las conclusiones del ejercicio mostraron que la escala del forzamiento meteorológico del RCM afecta importantemente tanto la cantidad de precipitación sobre la cuenca, como las salidas de caudal que dan los modelos hidrológicos. Incluso, para este caso, se observaron diferencias importantes en cambios en evapotranspiración debidas a la escala de la información meteorológica, que superan los errores debidos a la escogencia de uno u otro modelo.

1.2.2 Análisis en cuencas no instrumentadas

Otro de los usos que se les da a los modelos de gran escala es la regionalización de parámetros, con el fin de analizar el comportamiento hidrológico en cuencas no instrumentadas (o en cuencas que no han sido utilizadas en el proceso de calibración) a través de diferentes tipos de “discretización” espacial (Haghnegahdar et al. 2015).

En el caso de Pechlivanidis y Arheimer 2015, se realizó un ejercicio de calibración de modelos de gran escala, utilizando recomendaciones del PUB (Predicción en cuencas no instrumentadas, por sus siglas en inglés) en el subcontinente indio, utilizando el modelo HYPE (de tipo GHM), utilizando una discretización basada en HRU (Hydrological Response Units). Este ejercicio mostró las ventajas de trabajar bajo las observaciones recogidas por el PUB, así como la necesidad de contar con mayor información en partes en donde el modelo utilizado no era suficientemente detallado.

Por su parte, Gottschalk et al. 2001 aplicaron el modelo Ecomag a un área boreal localizada en Noruega (hemisferio occidental, latitud entre 50 y 70°). Los autores del ejercicio fueron capaces de calibrar y validar el modelo en algunas cuencas, procediendo luego a regionalizar los parámetros a partir de algunas de las características de las cuencas no instrumentadas. Los resultados mostraron que el modelo ya calibrado era capaz de simular acertadamente los procesos hidrológicos y demostraron la importancia de contar con grandes conjuntos de datos que permitan validar el modelo, especialmente en términos de caudales, humedades del suelo y niveles del agua subterránea.

En cuanto a Safeeq et al. 2014, se realizó un experimento utilizando el modelo VIC (*Variable Infiltration Capacity*, Capacidad Variable de Infiltración) para simular 217 cuencas en la zona del Pacífico Noroeste de EE.UU. En este caso, se calibró el modelo a nivel mensual, sin uso de módulo de escorrentía en cuencas pequeñas. Los resultados mostraron que el modelo lograba capturar el comportamiento general de las cuencas, pero mostraba problemas en cuanto a flujos bajos y aportes por agua subterránea, convirtiéndose en una base importante para desarrollar mejores estrategias de calibración en esta zona, basadas en características del paisaje y en su relación con el aporte de agua subterránea, con miras a efectuar la simulación de cuencas no instrumentadas y analizar los efectos de cambio climático.

1.2.3 Uso como herramienta de gestión del recurso hídrico

Otro interesante uso de los modelos hidrológicos de gran escala es como herramientas de apoyo a la gestión. Por sus características, estas herramientas pueden jugar un papel muy importante en la gestión integral del recurso hídrico en grandes cuencas, como en el caso de la Macro Cuenca Magdalena Cauca (MCMC).

Acoplamiento entre un modelo hidrológico de gran escala y un modelo de calidad del agua se reportan en Panagopoulos et al. 2015, donde se implementó el modelo SWAT en el Alto Mississippi (492.000 km²) y en la cuenca de los ríos Ohio y Tennessee (202.000 km²), y se realizó un análisis, a nivel mensual, de la producción de sedimentos y de la presencia de nitrógeno y fósforo en el agua.

En el caso de uso de estos modelos para toma de decisiones, se reporta en Yu et al. 2015 el uso de MIKE HYDRO en la cuenca del río Tarim, noroeste de China. El modelo fue calibrado y validado obteniendo buenos resultados y posteriormente se utilizó el modelo bajo diferentes escenarios de uso de suelo para determinar posibles déficits de agua, permitiendo plantear estrategias para mitigar y reducir el déficit de agua ya existente.

Finalmente, para el caso de uso de estos modelos como herramienta para predicción hidrológica, Pietroniro et al. 2006 reportan la implementación del modelo MESH (modelo que ha sido usado en esta tesis, y que por sus características se considera un H-LSS) en los grandes lagos laurentinos, realizando calibración solamente de los parámetros hidrológicos (módulo de tránsito, proveniente del modelo Watflood). Un posterior ejercicio, reportado en Haghnegahdar et al. 2014, calibró varios parámetros, tanto del esquema *Land Surface*, como del módulo de tránsito, mostrando la necesidad de efectuar una calibración y validación rigurosa, antes de usar un modelo hidrológico en predicción.

1.3 Ventajas, desventajas y perspectivas en el desarrollo de los modelos *Land Surface*

Como se ha visto, la importancia de los modelos LSS y de los H-LSS radica en sus potencialidades: posibilidades de simular los complejos flujos energéticos e hídricos a nivel espacial y temporal, utilizando parámetros “físicos” que son definibles *a-priori*, y que

pueden incluirse bajo escenarios de cambio climático y cambios en el uso del suelo (Sato et al. 2015). También presentan enormes ventajas debido a la discretización espacial distribuida o semi-distribuida (Clark et al. 2015c; Haghnegahdar et al. 2015) y a la posibilidad de utilizar otras variables hidrológicas para calibración (Ridler et al. 2012; Larsen et al. 2016), además del caudal, o incluso, la asimilación de información satelital y simulada para mejorar el pronóstico (Xu et al. 2015).

Sin embargo, estos modelos presentan desventajas y limitaciones. La primera gran limitación está ligada a su estructura: en general, existiendo una gran cantidad de modelos de tipo LSS y H-LSS, cada uno con su propia filosofía al momento de construir las parametrizaciones matemáticas de los diversos procesos. Si bien este “crisol” de modelos puede llegar a ser interesante al momento de analizar la incertidumbre estructural, también es cierto que no ha habido un marco conceptual de comparación de estas estructuras (por ejemplo, sobre las ecuaciones utilizadas y la implementación numérica escogida) (Clark et al. 2015a, c).

Otra gran limitante en el proceso de simulación está ligada al “esfuerzo computacional” (*computational budget* en inglés) necesario para correr los modelos, lo que pesa al momento de decidir acerca de la discretización espacial, y el grado de complejidad del modelo. La literatura habla de los conceptos de “eficiencia computacional del modelo”, “complejidad del modelo” y “fidelidad del modelo”, para referirse respectivamente a (Clark et al. 2015a; Davison et al. 2016):

- Eficiencia computacional (*computational efficiency*): tiempo necesario para correr un modelo
- Complejidad del modelo (*model complexity*): detalle con que el modelo representa los estados y flujos, incluyendo la discretización que hace del paisaje y su heterogeneidad.
- Fidelidad del modelo (*model fidelity*): grado de rendimiento, o fidelidad del modelo para simular los procesos observados.

Estos conceptos están íntimamente ligados a las posibilidades que tiene un modelo para ser calibrado, o para ser utilizado en análisis de sensibilidad (lo que permitiría afinar el proceso de calibración). Si un modelo es altamente complejo (es decir, presenta una detallada discretización del paisaje), será menos eficiente computacionalmente (una simulación requerirá más tiempo de cómputo), sin llegar a ser fiel a los procesos observados (Davison et al. 2016). Sin embargo, no existe un algoritmo que permita definir qué tan complejo debe ser un modelo para que sus simulaciones se ajusten a las observaciones (Haghnegahdar et al. 2015).

La otra gran debilidad de los modelos LSS es que no incluyen todos los fenómenos hidrológicos identificados a nivel regional o global, cuyo análisis debe ser tenido en cuenta. Se tienen ejemplos con el tránsito (lo que provocó el nacimiento de los modelos H-LSS), y en general con los flujos horizontales de agua (Davison et al. 2016), así como la interacción del agua superficial con el agua subterránea (Clark et al. 2015a). Como ya se dijo

anteriormente, un ejemplo de este continuo mejoramiento de los modelos al ir acoplando nuevos módulos, que simulen otros fenómenos, no tenidos en cuenta en las versiones originales de los LSS, es MESH, que resultó de acoplar un modelo LSS con uno hidrológico (Pietroniro et al. 2006; Haghnegahdar et al. 2014). Sin embargo, si bien los modelos LSS ya incluyen una gran cantidad de procesos y otros empiezan a ser incluidos, aún existen muchos fenómenos por fuera de la simulación, y no existe certeza acerca de una mejora en la simulación gracias a la inclusión de módulos computacionales que los representen (Haghnegahdar et al. 2015; Davison et al. 2016).

Se pueden enumerar al menos dos razones para que exista incertidumbre en la implementación de nuevos módulos computacionales en estos LSS:

- La primera es que añadir nuevos módulos a unos modelos de por sí complejos, aumenta el costo computacional y los tiempos de cálculo requeridos, sin la certeza de que este costo computacional adicional se vea reflejado en mejores resultados, y sin que necesariamente sea posible validar la fidelidad del módulo de simulación contra información observada (Clark et al. 2015a), dificultando en contrapartida el cálculo de las incertidumbres en las salidas del modelo y la escogencia de valores paramétricos de acuerdo con la eficiencia en la simulación de valores frente a datos observados (Davison et al. 2016).
- La segunda es que la implementación de un módulo puede mejorar la representación de un fenómeno en una zona particular, pero puede que tenga poco impacto en otro. Esto es especialmente cierto con la implementación de módulos de simulación de acuíferos profundos, cuyas mejoras en los resultados dependen fundamentalmente de la existencia de un acuífero en la zona. Por ejemplo, la inclusión de un módulo de simulación de respuesta de un acuífero superficial en la cuenca del río Somme, en Francia, mostró mejores resultados. Sin embargo, la existencia de un acuífero superficial era bien conocida en la zona, y sus características se ajustaban a las hipótesis del módulo implementado. Sin embargo, en otras zonas, con presencia de acuíferos regionales profundos, el modelo podría no representar adecuadamente la interacción existente (Gascoin 2009).

Adicionalmente, debido a que estos modelos son requeridos para funcionar a escalas regionales, continentales, o globales, los parámetros utilizados deben poder ser utilizados globalmente (Clark et al. 2015a), pero este requerimiento puede tener serias limitaciones para un uso general (Clark et al. 2015c). Si bien un marco de comparación básico de todos los modelos puede ayudar a obtener valores de los parámetros para zonas tropicales, que puedan ser usados de manera global (Clark et al. 2015c), el uso de herramientas de calibración bajo las características impuestas por los H-LSS (gran cantidad de parámetros a calibrar, uso de varios puntos de control en la calibración, posibilidad de utilizar diversas variables para comparación) puede presentar grandes ventajas a nivel regional (Davison et al. 2016) (Clark et al. 2015c).

1.4 Implementación de LSS y H-LSS en cuencas tropicales

Las interacciones entre el suelo y la atmósfera son muy dinámicas en zonas tropicales, pues los bosques tropicales tienen un gran impacto en la temperatura de la superficie terrestre, a través del flujo de calor latente (procesos fisiológicos de evapotranspiración), a diferencia de las latitudes medias y boreales, en donde los procesos radiativos tienen mayor importancia a través del albedo (Akkermans et al. 2012).

El principal efecto de los bosques tropicales en la interacción suelo-vegetación-atmósfera, corresponde a una disminución del albedo, lo que provoca un calentamiento de la superficie, pues menos radiación es reflejada de vuelta a la atmósfera (Port et al. 2012) y un aumento de la evapotranspiración, lo que provoca un enfriamiento de la superficie por flujo de calor latente (Snyder et al. 2004). Sin embargo, en general, los flujos de calor latente son muy superiores a la energía no reflejada, lo que provoca un enfriamiento (Snyder et al. 2004; Port et al. 2012).

Sin embargo, estos biomas son altamente sensibles al cambio climático, como bien es remarcado por Port et al., 2012, cuyo ejercicio de simulación, utilizando LSS, trató de mostrar los efectos del cambio climático en la vegetación, sin considerar otros motivos (como cambio en el uso del suelo para agricultura, o expansión urbana), y cuyos resultados hablan de un posible declive del área forestal en la Amazonía, pasando del 70% de área cubierta por bosques a 63%. Además, existen enormes presiones de tipo social y económico sobre los bosques tropicales (Olchev et al. 2008), debido a un gran crecimiento poblacional y las necesidades de alimentación y de uso de otros bienes, que esto conlleva

Estos cambios son difíciles de analizar utilizando modelos conceptuales lluvia-escurrentía, principalmente por su dependencia en los datos observados para llevar a cabo adecuadamente el proceso de calibración-validación, así como por su naturaleza agregada (Zulkafli et al. 2013). Debido a esto, se han desarrollado esfuerzos para realizar la implementación de modelos de tipo LSS en zonas tropicales, con el fin de contar con una estructura distribuida o semi-distribuida y físicamente basada, que permita el análisis de los procesos hidrológicos y de interacción suelo-atmósfera que se presentan en la actualidad (Caballero et al. 2007; Akkermans et al. 2012), o bajo escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo (Olchev et al. 2008; Alvarenga et al. 2016; Woldesenbet et al. 2017).

Sin embargo, los modelos LSS tienen limitaciones y desventajas al ser implementados en zonas tropicales. Por ejemplo, la mayoría de ellos utiliza parámetros calibrados en áreas templadas, cuyos valores se asumen iguales en contextos tropicales; en muchas otras ocasiones no cuentan con módulos de tránsito, restringiendo un proceso de suma importancia en la modelación hidrológica; además, se ha encontrado que la falta de un módulo de agua subterránea (especialmente en zonas con acuíferos cerca de la superficie), también puede afectar su rendimiento (Zulkafli et al. 2013).

Pese a todos estos problemas y limitaciones, el uso de LSS se hace cada vez más común en zonas tropicales. Por ejemplo, uno de los primeros ejemplos de implementación que mostró la búsqueda bibliográfica realizada como parte de este trabajo corresponde a Caballero, Chevallier, Gallaire, & Pillco, 2004. En este ejercicio, se calibró el LSS ISBA y posteriormente fue acoplado un módulo de tránsito parecido al utilizado en TOPMODEL para una cuenca de alta montaña tropical localizada en Bolivia. En Caballero et al., 2007, también se hizo un ejercicio parecido para otra cuenca tropical de alta montaña en Bolivia, pero teniendo en cuenta aspectos hidráulicos en el tránsito, por presencia de embalses.

Otro ejemplo de aplicación de LSS en América tropical corresponde a Zulkafli et al., 2013, quienes implementaron el modelo JULES en una cuenca húmeda tropical localizada en el Amazonas peruano; la implementación mostró buenos resultados, pero el modelo degradó su rendimiento en cuencas altas (probablemente por deficiencias del modelo para calcular el flujo subterráneo y cerrar el balance hídrico).

En Brasil, por su parte, se aplicó el modelo DHSVM para analizar afectaciones por efecto de escenarios de cambio en el uso del suelo en la cuenca del río Lavrinha, estado de Minas Gerais (Alvarenga et al. 2016). El modelo fue calibrado y validado, y los resultados mostraron afectaciones en todas las variables hidrológicas (evapotranspiración, humedad del suelo, profundidad del nivel freático, etc.) por efecto de la deforestación.

También en Brasil, se implementó el modelo LSS ED2 con un nuevo módulo de enrutamiento de tipo hidrológico (configurando un modelo H-LSS) en la cuenca del río Tapajós (sureste del Amazonas brasileiro) logrando una adecuada representación de los procesos en la zona, con valores de NSE (*Nash Sutcliff Efficiency*, parámetro de eficiencia del modelo) de 0.76 (Pereira et al. 2017).

Por su parte, en África también se han comenzado a aplicar este tipo de herramientas con diversos propósitos: En Li, Coe, & Ramankutty, 2005, se calibró un modelo LSS (IBIS) y se acopló a un módulo de tránsito (HYDRA), en dos grandes cuencas africanas. Akkermans et al., 2012 reportan la calibración de dos modelos tipo LSS para su comparación, prestando especial atención en los valores de los parámetros para zonas tropicales, pero dejando de lado el uso del módulo de tránsito. En otro ejercicio destinado al uso de modelación para gestión del recurso hídrico (Woldesenbet et al. 2017), se utilizó el modelo SWAT con el fin de analizar los impactos ocasionados por cambios en el uso del suelo sobre la hidrología de la cuenca del Nilo Azul, en Etiopía. Asimismo, Gascoin, 2009; Orgeval, Polcher, & Rosnay, 2008, mostraron resultados de aplicación de LSS en el marco de un proyecto de intercomparación de modelos en el África Occidental, con el fin de comprender mejor las relaciones entre los diferentes procesos hidrológicos, y de estos con los flujos atmosféricos.

De manera indirecta, también se han modelado las zonas tropicales utilizando modelos de tipo LSS, a través de ejercicios de simulación global. En un primer ejercicio (Balsamo et al. 2011), se mostraron los resultados de acoplar el modelo HTESSEL a un módulo de tránsito, logrando una mejora significativa en la simulación. Asimismo, en el marco del

proyecto WaterMIP (Haddeland et al. 2011), se mostraron los resultados de la simulación de diferentes modelos, tanto LSS como GHM, para analizar variables de escurrimiento y evapotranspiración (sin uso de módulos de tránsito) y conocer la incertidumbre asociada con la parametrización de los modelos. Otros ejercicios corresponden a los de Zhao et al. 2017, quienes analizaron la importancia de escoger entre diversos módulos de tránsito en modelos globales (tanto LSS como GHM) para analizar la eficiencia de las simulaciones frente a observaciones de caudal, y Schellekens et al., 2017, quienes mostraron los resultados de la construcción de un ensamble de modelos hidrológicos, usando tanto LSS como GHM, para todo el globo.

1.5 Implementación de LSS y H-LSS en Colombia

A nivel nacional, si bien no existen muchos ejemplos de implementación de este tipo de modelos, se ha comenzado a trabajar en los últimos años en el tema. Por ejemplo, el autor conoce un trabajo desarrollado como tesis de grado en la Universidad Nacional sede Bogotá, cuyo fin fue implementar el esquema ISBA en la cuenca del río La Vieja, localizada dentro de la Macro Cuenca Magdalena Cauca (Sánchez 2014). La validación de esta implementación mostró la necesidad de utilizar un módulo de tránsito con el fin de mejorar la representación de los caudales, pero obtuvo buenos resultados al analizar evapotranspiraciones. Este trabajo es importante, principalmente por la utilización de bases de datos interpoladas a partir de observaciones o de ecuaciones empíricas, validación de una metodología de trabajo para el área andina colombiana y las conclusiones obtenidas que muestran la necesidad de utilizar un módulo de tránsito, lo que de antemano validaba la posibilidad de utilizar el modelo MESH.

También, desde la fundación *The Nature Conservancy* (TNC) (Angarita et al. 2013) implementaron el modelo hidrológico WEAP sobre toda la Macro Cuenca Magdalena Cauca. Si bien este modelo no es de tipo H-LSS (WEAP corresponde más a un modelo conceptual semidistribuido), su implementación es interesante pues se trató del primer caso donde se consideró toda la MCMC, y se utilizó la ecuación de Penman Monteith para el cálculo de la evapotranspiración potencial (lo cual corresponde a un balance energético simple)⁴. El objetivo fue el de desarrollar una herramienta de ayuda en la toma de decisiones para expandir la capacidad de generación hidroeléctrica en el país; el ejercicio consistió en correr el modelo bajo cinco escenarios de expansión, para investigar la alteración de los regímenes hidrológicos.

⁴ El modelo WEAP en este caso, utiliza la ecuación FAO-Penman Monteith, por lo que utiliza series de tiempo de temperatura para el cálculo de evapotranspiración potencial (Angarita, Delgado, Escobar-Arias, & Walschburger, 2013). Sin embargo, en su concepción, la ecuación de Penman Monteith parte del balance de energía para superficies húmedas y la demanda atmosférica (Ecuación de Penman) y la inclusión del concepto de la “gran hoja” (modificación que realizaron Monteith y Rijtema de manera independiente) (Moene & Dam, 2014).

Otro ejemplo es el del proyecto Earth2Observe, dentro de cuyo marco de referencia se ha desarrollado este trabajo de tesis. El caso de estudio para Colombia ha venido trabajando para contar con un ensamble de modelos hidrológicos regionales y globales. En una primera etapa de trabajo se validó la información meteorológica e hidrológica de los modelos globales, y se reunió información marco para los procesos de modelación a nivel regional, mientras que en una segunda etapa se procedió a implementar tres modelos regionales (VIC, Openstreams HBV-WFLOW y un modelo basado en el balance hídrico dinámico de Budyko (DWB)) (Rodríguez et al. 2016; Rodriguez et al. 2017).

Otros ejemplos se han dado en la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, donde se implementó un modelo de tipo conceptual para el análisis de los patrones espaciales y temporales de la humedad del suelo (Mogollón 2017).

Con estos antecedentes, es posible argumentar la importancia de aplicar un modelo de tipo H-LSS a nivel regional, para la Macro Cuenca Magdalena Cauca, dado que:

- La utilización de un modelo H-LSS necesita de una gran cantidad de datos, pero ya existen antecedentes de implementación satisfactoria de este tipo de modelos utilizando variables meteorológicas observadas o calculadas con ecuaciones empíricas.
- Un modelo H-LSS implementado puede aportar información adicional acerca de variables hidrológicas diferentes al caudal, utilizando parámetros físicamente basados, los cuales pueden alimentarse de conjuntos de datos remotos y otros tipos de información secundaria..
- Los modelos H-LSS tienen la estructura y las características más indicadas para ser utilizados bajo escenarios de cambio climático o de cambios en el uso del suelo, por su relativa independencia de los datos observados. Si bien un proceso de calibración es necesario e importante, los parámetros calibrados quedan atados a tipos de coberturas, tipos de suelo y otras características del paisaje, que pueden ser regionalizadas.
- Como primera implementación de un modelo H-LSS, una parametrización de segunda generación se hace ideal para realizar un tratamiento explícito de la vegetación, sin entrar a analizar fenómenos relacionados con el ciclo del carbono.

De todos los modelos tipo H-LSS de segunda generación, se escogió el modelo MESH debido a su comunidad de apoyo en procesos de implementación, su continuo proceso de mejora e implementación de nuevos módulos, su parametrización e implementación computacional adecuadamente documentada y el decidido apoyo por parte de miembros de su equipo de desarrollo para intercambiar opiniones y experiencias, aspecto fundamental para el éxito de su implementación

2. El modelo MESH y herramientas asociadas de calibración automática

2.1 El modelo MESH

MESH es un modelo computacional para la simulación del ciclo hidrológico. Se define como un modelo Hidrológico – parametrización de la superficie terrestre (*Hydrology-Land Surface Scheme*, H-LSS, ver pág. 9) desarrollado por Environment Canada en asocio con varias Universidades en Canadá (Pietroniro et al. 2006).

En la Figura 1 se muestra un diagrama con los principales procesos que simula MESH. Estos incluyen simulación de los flujos de energía entre la atmósfera y la superficie terrestre. En términos energéticos, el modelo realiza un balance de la energía disponible, y divide esta energía entre el flujo de calor latente (cambio de estado de un material, en este caso el agua), es decir, evaporación y evapotranspiración y los flujos de calor sensible (cambio de temperatura de un material) en el suelo y la cobertura vegetal. En términos hídricos, el modelo realiza la partición del agua existente entre evapotranspiración y la evaporación (calculada a partir del balance energético), entre los componentes de almacenamiento, los cuales son intercepción, almacenamiento en depresiones del terreno y almacenamiento de agua en el suelo y los componentes de flujo vertical y horizontal del agua, a saber flujo superficial, interflujo o flujo sub superficial, flujo base, y tránsito a través de los canales de drenaje.

El objetivo inicial de MESH fue el de ser utilizado tanto en investigación, como en operación (por ejemplo, en sistemas de pronóstico). Para tal fin, acopló el modelo CLASS (Versegny 2012) en su parametrización LSS, con el módulo de tránsito del modelo WATFLOOD (Kouwen 2017). La primera versión de este modelo fue llamada WATCLASS (Soulis et al. 2000), y su evolución vio cambiar su nombre a MESH.

MESH ha sido aplicado en diversas cuencas en Canadá. Por ejemplo, existe un modelo operativo en la zona de los grandes lagos y el modelo está siendo aplicado también en la cuenca del río Mackenzie y en la cuenca del río Saskatchewan. Sin embargo, el autor no conoce un caso de aplicación del modelo en cuencas tropicales (University of Saskatchewan 2017).

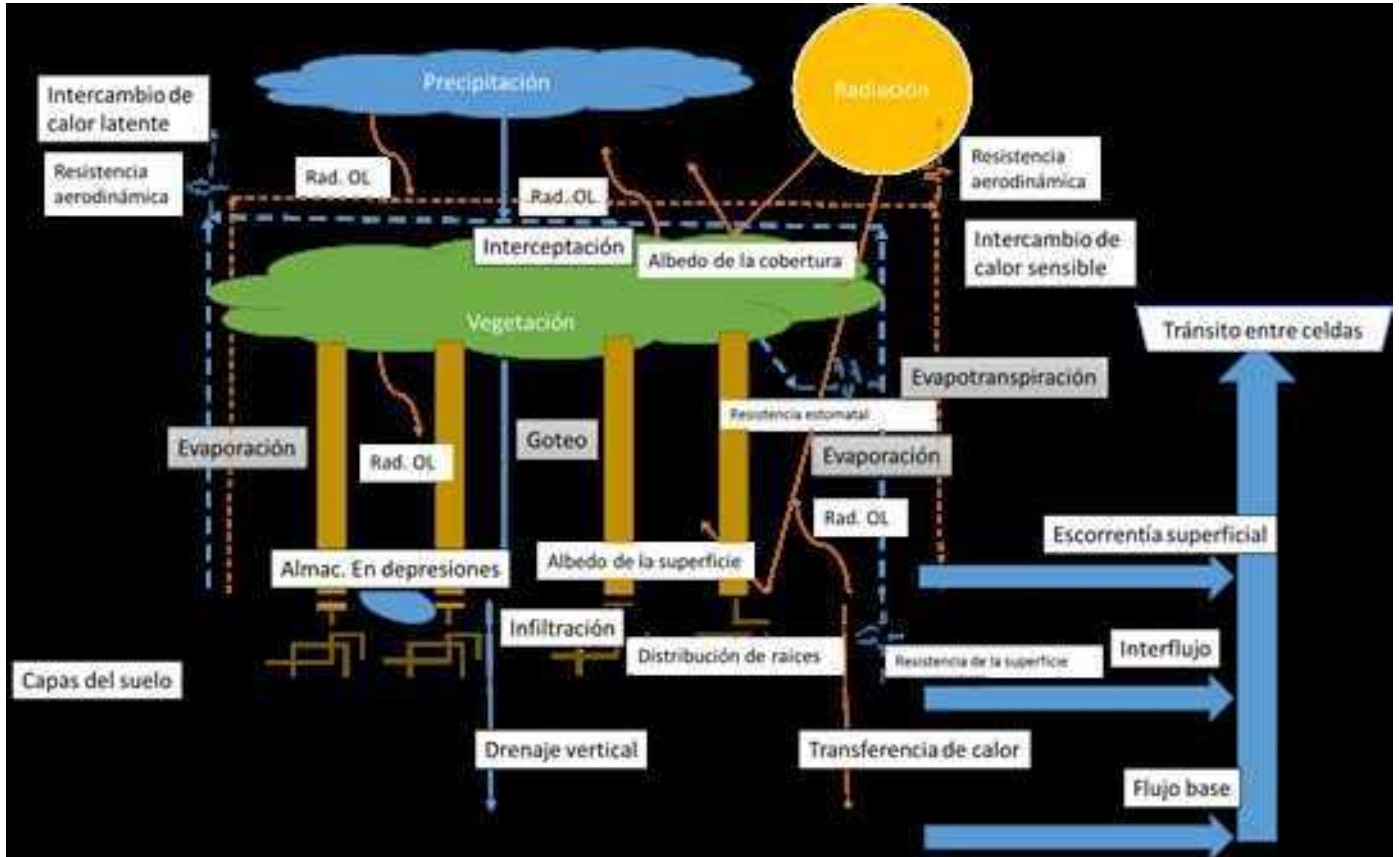


Figura 1. Diagrama de los procesos representados por MESH en cada una de las celdas del dominio analizado. Elaborado a partir de (Verseghy 2012; Kouwen 2017).

2.1.1 Representación de la heterogeneidad espacial: el GRU

La representación de la heterogeneidad espacial, como se vio en el capítulo 1, es una de las características principales al momento de realizar la implementación computacional de un modelo en una cuenca, y su posterior simulación.

MESH utiliza la aproximación del GRU (*Group Response Unit*, Unidad de Respuesta Grupal) para representar la heterogeneidad de la superficie, en términos de coberturas y tipos de suelo, sin sacrificar en demasía en eficiencia computacional (Pietroniro et al. 2006; Maclean 2009; Haghnegahdar et al. 2015; Kouwen 2017)⁵.

⁵ • Existen diversos tipos de aproximaciones para describir de manera semidistribuida la heterogeneidad espacial. Por ejemplo, el HRU es un elemento areal dentro de una cuenca, donde las propiedades hidrológicas pueden considerarse homogéneas; Por su parte, el GRU corresponde a una agrupación de las áreas con atributos similares, sean estos de tipo de cobertura, suelos, o algún otro. Mientras que la primera aproximación es sobre todo apropiada para cuencas medianas o con aproximación de rejillas, mientras que la aproximación de GRU es más apropiada para cuencas regionales o continentales, pues, por su naturaleza semidistribuida, incorpora la física

En la Figura 2 se muestra la filosofía de aplicación de esta aproximación. Se parte de la siguiente pregunta: ¿Cómo representar la heterogeneidad espacial de una cuenca, sin sacrificar demasiado la eficiencia computacional del modelo? Puesto que el objetivo de la simulación es representar matemáticamente los procesos naturales dentro de una unidad de análisis, la cuenca, y esta es a su vez dividida en entidades más pequeñas, representadas por celdas, es posible agrupar estas celdas a partir de ciertas características.

Los grupos de celdas deberán entonces responder de forma equivalente en términos hidrológicos a los impulsos atmosféricos. Una aproximación incluso más fina es la de subdividir las celdas en unidades más pequeñas, cada una de las cuales responden de manera homogénea en términos hidrológicos. Esta forma de representación se conoce como mosaico y puede plantearse que la subdivisión en celdas corresponde a un tipo especial de mosaico, en el que cada subgrupo ocupa toda la celda.

Sin embargo, surge la duda acerca de cómo clasificar estos grupos. Las respuestas pueden ser muy diversas. Se pueden asociar grupos a la existencia de cierto tipo de cobertura vegetal en la zona, por ejemplo. También es posible asociar los grupos a la textura del suelo. Otras aproximaciones pueden incluir información morfométrica de los canales de drenaje. O pueden plantearse los grupos en términos de elevaciones promedio y pendientes del terreno.

No existe una sola aproximación válida para agrupar estos grupos de respuesta, por lo que la estrategia escogida corresponde a una decisión del modelador. Sin embargo, escogida la forma de agrupación, cada unidad de respuesta homogénea compartirá valores de los parámetros y responderá con el mismo valor a unas entradas meteorológicas iguales.

En la Figura 2 se muestra cómo una celda, que representa una parte de la cuenca analizada, es a su vez subdividida en unidades de mosaico. El mosaico incluye cuatro grupos homogéneos, los cuales corresponden, en el lenguaje de la modelación con MESH, a cuatro GRU. Luego de realizar esta separación, para MESH ya no es importante la ubicación real de cada GRU, sino el porcentaje del área que ocupa.

Puesto que el modelo ya ha capturado la heterogeneidad espacial a través de los GRU, es posible simular los procesos verticales en cada sub-celda (es decir, aplicar el modelo CLASS) para calcular los flujos hídricos y llevarlos al centro de la celda. Este paso se realiza para calcular los flujos y los cambios en el almacenamiento dentro de cada celda, y para preparar los datos para el módulo de tránsito.

hasta la unidad de modelación (en este caso la celda) de manera simplificada (pues a nivel de celda, se despreocupa por su distribución), sin perder de vista la necesaria eficiencia computacional en este tipo de modelaciones. Sin embargo, esta definición y su utilización no es rígida, por lo que es posible utilizar HRU para casos regionales, y GRU para cuencas medianas. El punto, en este caso, es la idea de discretizar el espacio en elementos homogéneos (Pietroniro et al. 2001).

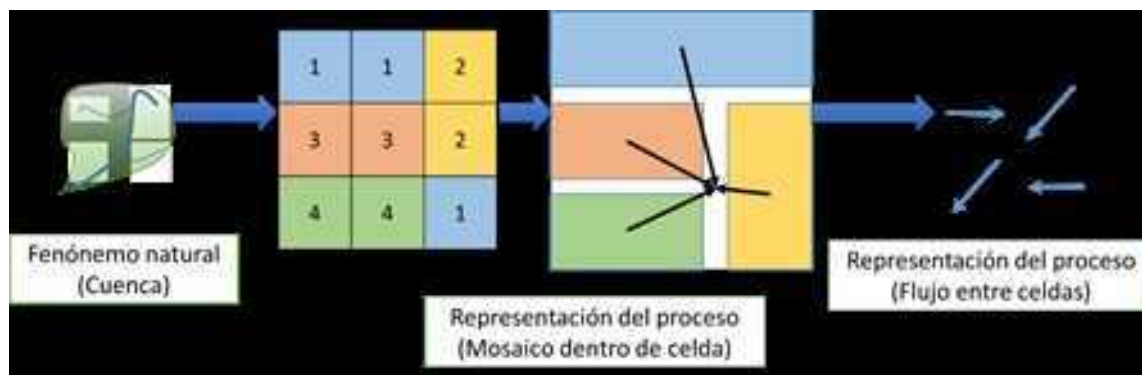


Figura 2. Representación computacional de la heterogeneidad espacial de una superficie en MESH y flujos horizontales de agua simulados. Fuente: propia.

Finalmente, utilizando un diagrama de direcciones del flujo, MESH simula los procesos de tránsito entre celdas (aplicación del módulo de tránsito de WATFLOOD) (Haghnegahdar et al. 2017).

De esta manera, MESH mantiene un marco referencial para simular los procesos de manera eficiente a nivel computacional, al mismo tiempo que toma en cuenta la heterogeneidad espacial de manera semi-distribuida. Además, MESH permite una fácil interacción con otras herramientas tipo SIG, también desarrolladas por Environment Canada, lo que facilita la construcción de la información de entrada que requiere el modelo (Canadian Hydraulics Centre et al. 2010; University of Saskatchewan 2017).

2.1.2 CLASS

CLASS (*Canadian Land Surface Scheme*) es la parametrización de la superficie terrestre desarrollada por *Environment Canada* para acoplar a los modelos regionales de circulación (*Regional Circulation Models*, llamado CCM en Canadá, *Canadian Climate Model*, modelo de clima) que maneja la institución (Verseghy 2000).

CLASS se encarga de efectuar el balance energético y el balance hídrico, calculando la partición de la precipitación entre los diversos componentes (intercepción, flujo superficial, flujo subsuperficial, flujo base, evapotranspiración) y definiendo los flujos hídricos en el sentido vertical, así como los flujos energéticos (Soulis et al. 2000).

CLASS asume una distribución de 3 capas, de profundidad variable según necesidades del modelador. En este caso, las profundidades de las capas de suelo se distribuyeron de la siguiente manera:

- Capa superficial de 0.10 m
- Capa intermedia de 0.25 m
- Capa profunda de 1.75 m

En las últimas versiones de CLASS, la profundidad de las capas del suelo puede configurarse de otras maneras, asumiendo capas más profundas, o una mayor cantidad de capas. Incluso, en la actualidad se está implementando la posibilidad de configurar las capas de suelo por celda o por GRU, con el fin de posibilitar un tratamiento diferenciado de las profundidades del suelo, en concordancia con las características locales. Este tratamiento diferenciado no varía el uso de las ecuaciones básicas de balance energético que se discutirán más adelante.

La versión 3.6 de CLASS es la que actualmente utiliza la versión 1.4 de MESH. A continuación se presenta un breve recuento de las principales ecuaciones utilizadas en MESH, así como sus suposiciones (Verseghy 2012). Su paso de tiempo es de 30 minutos, debido a las necesidades matemáticas en su parametrización.

- **Balance energético:**

CLASS realiza el balance energético sobre cuatro tipos de superficies: cobertura sobre nieve, nieve sobre suelo desnudo, cobertura sobre suelo desnudo y suelo desnudo. Por considerarlo de interés primordial para el trópico, se trata aquí solamente el balance energético de coberturas y suelo desnudo sin nieve.

El cálculo de la evapotranspiración potencial, es decir, la cantidad de evapotranspiración que ocurriría bajo condiciones atmosféricas ambiente si el suelo estuviese completamente saturado y la cobertura vegetal estuviese completamente húmeda (no existe resistencia a la evapotranspiración) se calcula por medio de la ecuación (1):

$$E_p = \rho_a C_{DH} v_a (q_{a,sat} - q_a) \quad (1)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, C_{DH} es el coeficiente de arrastre para calor, v_a es la velocidad de fricción (relacionada con la velocidad del viento por encima de la cobertura vegetal), $q_{a,sat}$ es la humedad específica saturada, y q_a es la humedad específica.

Por su parte, el balance energético de la superficie bajo cobertura vegetal se hace a través de la ecuación (2):

$$Kg + Lg - Q_{h,g} - Q_{e,g} - G(0) = 0 \quad (2)$$

Donde Kg (Radiación de onda corta) se calcula con la formula $Kg = K \downarrow * \tau_c * (1 - \alpha_g)$, siendo $K \downarrow$ la radiación de onda corta incidente, τ_c es la transmisividad de la cobertura y α_g el albedo de la superficie, Lg (radiación de onda larga) se calcula con la fórmula $Lg = \chi * L \downarrow + [1 - \chi] * L \downarrow_c - \sigma * T(0)^2$, donde χ es el factor de visibilidad del suelo, $L \downarrow$ es la radiación de onda larga incidente en el suelo, $L \downarrow_c$ es la radiación de onda larga incidente desde la cobertura, σ es la constante de Boltzmann y $T(0)$ es la temperatura conjunta de la superficie del suelo y el agua estancada. En cuanto a $Q_{h,g}$ y $Q_{e,g}$, estas variables se calculan con las ecuaciones (3) y (4):

$$Q_{h,g} = \frac{\rho_a C_p [T(0)_{pot} - T_{a,c}]}{r_{a,g}} \quad (3)$$

$$Q_{e,g} = E(0) * L_v = \frac{\rho_a [q(0) - q_{a,c}]}{r_{a,g}} * L_v \quad (4)$$

Donde $r_{a,g}$ es la resistencia de la superficie, mientras que $G(0)$ se calcula con la siguiente ecuación: $G(0) = -\lambda_T * T'(0)$. Donde λ_T corresponde a la conductividad térmica del suelo, y $T'(0)$ es la temperatura del agua en la primera capa del suelo.

Por su parte, el balance energético para la cobertura se hace ajustando la ecuación (5):

$$Kc + Lc - Q_{h,c} + Q_{h,g+} - Q_{e,g} - \Delta Q_{s,c} = 0 \quad (5)$$

Donde Kg (Radiación de onda corta) se calcula con la fórmula $Kc = K \downarrow * (1 - \alpha_c) - Kc$, siendo α_c el albedo de la cobertura, Lg se calcula con la ecuación $Lg = (1 - \chi) * (L \downarrow + L \uparrow_g - 2L \downarrow_c)$ donde la dirección de la flecha indica su dirección, y el subíndice indica si proviene del suelo (g) o de la cobertura (c), $Q_{h,g+}$ indica el flujo de calor sensible proveniente de la superficie y puede asumirse igual a 0 o igual a $Q_{h,g}$, dependiendo de la aproximación escogida en las opciones de CLASS, y $\Delta Q_{s,c}$ es el cambio en el almacenamiento de energía de la cobertura.

Finalmente, el cálculo de $Q_{h,c}$ y $Q_{e,g}$ tiene en cuenta la resistencia de la hoja (para el primero) y la resistencia de la hoja y la resistencia del estoma (para el segundo); además, un factor de corrección por temperatura y por presencia de agua sobre las hojas se aplica a los dos términos.

En caso de no existir cobertura vegetal en la zona, el balance energético utiliza la ecuación (2) sin tener en cuenta ningún parámetro diferente al del suelo desnudo. Para balancear las ecuaciones, CLASS incluye dos algoritmos de resolución de la ecuación de energía: el método de bisección y el método de Newton-Raphson.

- **Balance hídrico:**

La versión de CLASS que fue incluida dentro de MESH contiene mejoras en la parametrización del movimiento del agua dentro del suelo. Este módulo mejorado fue llamado WATRDRN, y está basado en un primer módulo conocido como WAT_DRN (Mekonnen et al. 2012).

El algoritmo es físicamente basado y permite simular la escorrentía superficial, sub-superficial (interflujo) y el flujo base (asociado con aquel flujo que alcanza el piso de la última capa de suelo).

Flujo superficial

Para el caso del flujo superficial se utiliza la ecuación (6) (Mekonnen et al. 2012):

$$q_o = \left(\frac{2 * DD}{n} \right) d_e^{5/3} * \Lambda^{1/2} \quad (6)$$

Donde q_o es el flujo superficial, DD es la densidad de drenaje, n es el coeficiente de rugosidad de Manning, d_e es la profundidad efectiva (profundidad sobre el agua efectivamente estancada) y Λ es la pendiente interna de la sub-celda (o GRU en el código).

Flujo sub-superficial

En cuanto al flujo sub-superficial, el algoritmo comienza calculando un tiempo crítico t_c , considerado como el momento a partir del cual se tienen condiciones no saturadas y se calcula con la ecuación (7) (Mekonnen et al. 2012):

$$t_c = \frac{1 + \Lambda}{\Lambda} * \frac{L \theta_s}{c * K_l} \quad (7)$$

Donde Λ es la pendiente interna del elemento, K_l es la conductividad hidráulica saturada bulk, según el modelo de Brooks y Corey (basado en la profundidad de la capa del suelo, K_s o la conductividad hidráulica saturada en la superficie y un factor de decaimiento), c es el parámetro de conectividad de Clapp y Hornberger (calculado según valores de textura del suelo), θ_s es el contenido de agua en saturación y L es la longitud típica de la pendiente, calculada con la relación $L = \frac{1}{2DD}$ donde DD es la densidad de drenaje.

Con este tiempo crítico y basándose en la ecuación de Richards, es posible calcular la saturación bulk por medio de (8):

$$\bar{S} = \int_0^1 \min \left[1, \left[v * \frac{t_c}{t} \right]^{\frac{c}{c-1}} \right] dv \quad (8)$$

Esta ecuación permite conocer el valor de la saturación bulk para cualquier momento. Dado el valor de la saturación bulk, al inicio del periodo de tiempo $\bar{S}_0$, se obtendrá el valor de t_0 dentro de la curva teórica de decrecimiento de la saturación bulk; asimismo, con el valor de $t_1 = t_0 + \Delta t$ se obtendrá el momento en la curva teórica al final del periodo de tiempo de la simulación (Δt), así como la saturación bulk $\bar{S}_1$, permitiendo realizar el cálculo del flujo con la ecuación (9):

$$q_i = (\bar{S}_0 - \bar{S}_1) \theta_s * H \quad (9)$$

Ajustes finales son realizados sobre estos valores para tener en cuenta la disponibilidad de agua, así como valores físicamente posibles (según la capacidad bulk del elemento); esto quiere decir que MESH tiene en cuenta el balance hídrico y las pérdidas por el interflujo, para ajustar estos valores de flujo.

Absorción de las raíces de la planta

Para la absorción de agua por parte de las raíces de la planta, dentro de las capas de suelo, se sigue la ecuación (10) (Clark et al. 2015a) :

$$S_{et,j} = f_{root,j} * \frac{\beta_{v,j}}{\bar{\beta}_v} * \frac{Q_{trans}^{veg}}{L_v * \rho_w * \Delta z_j} \quad (10)$$

Donde $f_{root,j}$ es la fracción de raíces en la j-ésima capa de suelo, $\beta_{v,j}$ es el factor de estrés del suelo en su j-ésima capa, $\bar{\beta}_v$ es el factor de estrés total, Q_{trans}^{veg} es el flujo de calor latente por transpiración y $L_v, \rho_w, \Delta z_j$ son el calor latente de vaporización, la densidad del agua y la profundidad de la j-ésima capa del suelo, respectivamente.

Interacción con acuíferos

Inicialmente, MESH no incluía ningún módulo de interacción con acuíferos, asumiendo que el flujo base (aquella cantidad de agua que llegaba al fondo de la última capa de suelo) llegaba directamente a los canales para su tránsito. Sin embargo, recientemente fue incluido un algoritmo de flujo base, que da cuenta, de manera conceptual, de estas interacciones. Se utiliza para tal fin la ecuación (11) y (12) (Luo et al. 2012):

$$W_{rch,i} = \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{1}{\delta_{gw}}\right)\right) \right] W_{seep} + \exp\left(-\left(\frac{1}{\delta_{gw}}\right)\right) W_{rch,i-1} \quad (11)$$

$$Q_{bs,i} = [1 - \exp(-\alpha_{gw} * \Delta t)] W_{rch,i} + \exp(-\alpha_{gw} * \Delta t) Q_{bs,i-1} \quad (12)$$

Donde $W_{rch,i}$ y $Q_{bs,i}$ son la recarga del acuífero y el flujo base desde el acuífero, respectivamente, siendo i el paso de tiempo actual e $i-1$ el paso de tiempo inmediatamente anterior, W_{seep} es la cantidad de agua que pasa del fondo de la última capa de suelo al acuífero, δ_{gw} es el retardo por las formaciones geológicas sobre el acuífero, α_{gw} es la constante de recesión del acuífero y Δt es el paso de tiempo.

2.1.3 WATFLOOD

WATFLOOD es un modelo hidrológico diseñado originalmente para alerta de inundaciones. Ha pasado por varias versiones y ha venido contando con continuas mejoras. MESH ha incluido dos versiones del módulo de tránsito: el primero es conocido como WF_ROUTE, el cual ha sido incluido desde las primeras versiones de MESH, mientras que el nuevo módulo se conoce como RTE y ha comenzado a ser incluido en las últimas actualizaciones de MESH (actualmente se trabaja en ponerlo completamente en funcionamiento, sin embargo, el módulo de tránsito en ríos ya está funcionando). WF_ROUTE utiliza las ecuaciones (13) y (14) para realizar el tránsito (Kouwen 1988, 2017):

$$\Delta t * \frac{I_1 + I_2}{2} - \Delta t * \frac{O_1 + O_2}{2} = S_1 + S_2 \quad (13)$$

$$0 = \left(\frac{1}{R2}\right) (A * X)^{4/3} * S_0 \quad (14)$$

Donde I_1, I_2 corresponden a las entradas de flujo al canal, O_1, O_2 corresponden a las salidas, S_1, S_2 corresponden al cambio en almacenamiento, $R2$ corresponde al parámetro de rugosidad del canal (el cual es optimizado), $A * X$ corresponde a la sección transversal del canal (relacionado con el almacenamiento y la longitud del canal), S_0 es la pendiente del canal, Δt es el paso de tiempo y los subíndices 1 y 2 corresponden al momento inicial y final del paso del tiempo.

En el momento en que el flujo exceda la capacidad del canal, ocurre un cambio en las relaciones de flujo, utilizándose entonces la llanura de inundación, por lo que en estos casos, se utiliza la ecuación (15):

$$0 = \left(\frac{1}{R2}\right) (A * X)^{4/3} * S_0 + \left(\frac{1}{2 * R2}\right) (A * Y)^{4/3} * S_0 \quad (15)$$

Donde $A * Y$ es el área total menos el área de la banca llena del canal.

RTE por su parte, contiene un algoritmo que es más fiel a la realidad, en términos físicos (si bien sigue más o menos los mismos principios de WF_ROUTE, es decir, ecuación de continuidad y uso de la ecuación de Manning). Sin embargo, para el caso del coeficiente de Manning, su valor optimizado no incluye factores por forma y rugosidad, permitiendo la calibración de los coeficientes de Manning del canal y de su llanura de inundación de manera independiente.

2.1.4 Implementación computacional

MESH ha sido escrito en lenguaje FORTRAN y puede ser corrido tanto en ambiente Unix, como en ambiente Windows (University of Saskatchewan 2017). Los archivos de entrada que necesita el modelo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Archivos de entrada del modelo MESH. Fuente: propia a partir de (University of Saskatchewan 2017)

Archivo de entrada	Características
Datos meteorológicos de entrada	Corresponden a los archivos de entradas meteorológicas, que son siete: Precipitación, Temperatura, Radiación de onda larga, Radiación de onda corta, Humedad específica, Presión atmosférica, Velocidad del viento
Niveles del suelo	Corresponden a los niveles de las capas del suelo. Por defecto, se asumen tres capas de suelo, pero pueden variarse de acuerdo con lo requerido

Parámetros de CLASS	Corresponden a los parámetros de entrada del modelo CLASS, que incluyen parámetros de la vegetación, del suelo y de los GRU
Opciones de la corrida	Corresponden a las banderas que muestran las opciones de corrida, así como las fechas de corrida y activación de algunos módulos especiales
Mapas de drenaje	Corresponden a toda la información de la red de drenaje, características de esta red, así como la presencia de GRU por rejilla
Parámetros hidrológicos	Corresponden a los parámetros de WATFLOOD, así como a parámetros de otros módulos, como el módulo de flujo base
Caudales observados	Corresponden a los caudales observados y a los puntos de localización de sus correspondientes estaciones hidrológicas
Entradas de embalse	Corresponden a los caudales observados (o en su defecto, a los parámetros de la curva de salida del embalse) y su localización

Adicional a los archivos de entrada y al archivo ejecutable, con el fin de permitir corridas de calentamiento, y posibilitar la interacción con programas independientes de calibración, se utilizan normalmente archivos tipo Shell (.sh en ambiente Unix, o .bash en ambiente Windows), los cuales se corren desde consola y permiten organizar, desde un script, todas las etapas de corrida (calentamiento, corridas de calibración, etc.).

Una de las características más interesantes de MESH en cuanto a su construcción computacional y su implementación, es la posibilidad de utilizar una estructura modular, donde es posible cambiar entre varios módulos de cálculo del balance energético, por ejemplo, o la de desactivación de ciertos módulos como método de diagnóstico de idoneidad de la simulación. Se nombran a continuación ciertas posibilidades:

- Posibilidad de utilizar módulos de CLASS o de SVS (una rutina de cálculo del balance energético)
- Posibilidad de utilizar RTE (nuevo módulo de tránsito de WATFLOOD) o WF_ROUTE
- Posibilidad de desactivar el módulo de infiltración superficial, interflujo, o flujo base
- Posibilidad de escoger entre dos módulos de flujo base.

Estas opciones se controlan desde el archivo de opciones de corrida. No se requieren de datos adicionales en cuanto a variables meteorológicas, pero se pueden requerir cambios en otros archivos para ingresar los valores paramétricos. La información sobre las opciones y la forma de realizar los cambios se encuentra en la documentación del modelo (University of Saskatchewan 2017).

2.1.5 Implementación computacional Grado de acoplamiento de los subsistemas según variables de estado

Las variables de estado provienen del análisis de sistemas de control automático de la ingeniería eléctrica, y se usan para describir un sistema en términos de sus entradas, salidas, y constantes, parámetros, y variables de estado o del sistema (Tung 1985).

En el caso de la modelación hidrológica, existen algunos ejemplos en modelos conceptuales, y en modelos de tránsito de crecientes (Tung 1985). Para este caso, con el fin de analizar el grado de acoplamiento de los modelos, es posible realizar un análisis del grado de acoplamiento en términos de las variables de estado:

- El primer Modelo, CLASS, tiene como entradas las variables meteorológicas, una serie de parámetros de vegetación, suelo, y parámetros asociados al GRU, las constantes serían valores como la elevación, tamaño de rejilla, y otros valores estáticos, y como salidas los valores de evapotranspiración, escorrentía, y recarga; las variables de estado del sistema, serían las temperaturas del sistema (de las capas del suelo, de la cobertura vegetal) y el almacenamiento (de las capas del suelo, de la superficie, y de la cobertura).
- Para el submodulo de flujo base, la entrada al modelo es el volumen de agua en la parte baja de la columna de suelo, los parámetros son el retardo y la constante de recesión, y la salida es el flujo base, expresado como escorrentía; la variable de estado sería la recarga del acuífero (que está relacionada con el almacenamiento del mismo).
- En cuanto al modelo WF_ROUTE, las entradas son la cantidad de agua que entra a los canales desde la columna del suelo (CLASS) y el acuífero (submodulo de flujo base), y la condición inicial de almacenamiento en los canales, los parámetros son el parámetro de rugosidad del canal, las constantes son los valores de forma del canal, la pendiente del canal, y la red de drenaje, y las salidas el valor de caudal a la salida de la sección de canal; la variable de estado sería entonces el almacenamiento del canal.

Se observa entonces, que no existe un acoplamiento entre los subsistemas a través de sus variables de estado, si no de sus variables de salida, y que es el modelo CLASS el único que alimenta los otros dos subsistemas, pero solo es alimentado por las variables meteorológicas de entrada (Pietroniro et al. 2001); El submodulo de flujo base recibe la cantidad de agua que toca el fondo de la columna de suelo, y pasa información sobre la cantidad de agua que llega a la red drenaje proveniente del acuífero; finalmente, el submodulo de tránsito recibe la cantidad de agua que llega a la red drenaje proveniente de la columna del suelo (CLASS) y del acuífero (submodulo de flujo base) y lo transita a través de la red. Por esta razón, la sincronía entre la respuesta de cada uno de los submódulos y el resultado final de caudal (que es la salida final del sistema que se analiza en calibración) tienen ciertos tiempos de retraso, que dependen tanto de los valores paramétricos como de las variables de estado de cada subsistema.

2.2 Algoritmo de calibración automática multi-objetivo: DDS y su implementación en Ostrich

Ostrich (Matott 2008) es definido como una herramienta de calibración independiente, que incluye diversos algoritmos para permitir la utilización de diversos métodos en un solo marco de optimización. La gran ventaja de Ostrich es que no necesita desarrollar nuevas

porciones de código, sino simplemente escribir algunas instrucciones que el programa necesite, generar una plantilla de los archivos de entrada, en donde se encuentren los parámetros a calibrar, e indicar la ubicación de “el” o “los” archivos en donde se guardan las funciones objetivo y de la posición de estos últimos dentro del archivo en cuestión (Matott 2008).

Dentro de los algoritmos de calibración automática en Ostrich se encuentra DDS (*Dinamically Dimensioned Search*) (Tolson and Shoemaker 2007), que corresponde a un tipo de algoritmo de búsqueda global y heurística, específicamente diseñado para problemas con restringido presupuesto computacional (es decir, posibilidad de realizar pocas corridas del modelo). DDS está diseñado para llegar a la zona en donde están las mejores soluciones, en el mejor de los casos, o en el peor, a la zona de una buena solución local.

DDS solamente utiliza un parámetro durante el proceso de calibración (r , parámetro de tamaño de perturbación), por lo que es sumamente parsimonioso y rápido de implementar. Un diagrama mostrando el paso a paso del algoritmo DDS se presenta en la Figura 3.

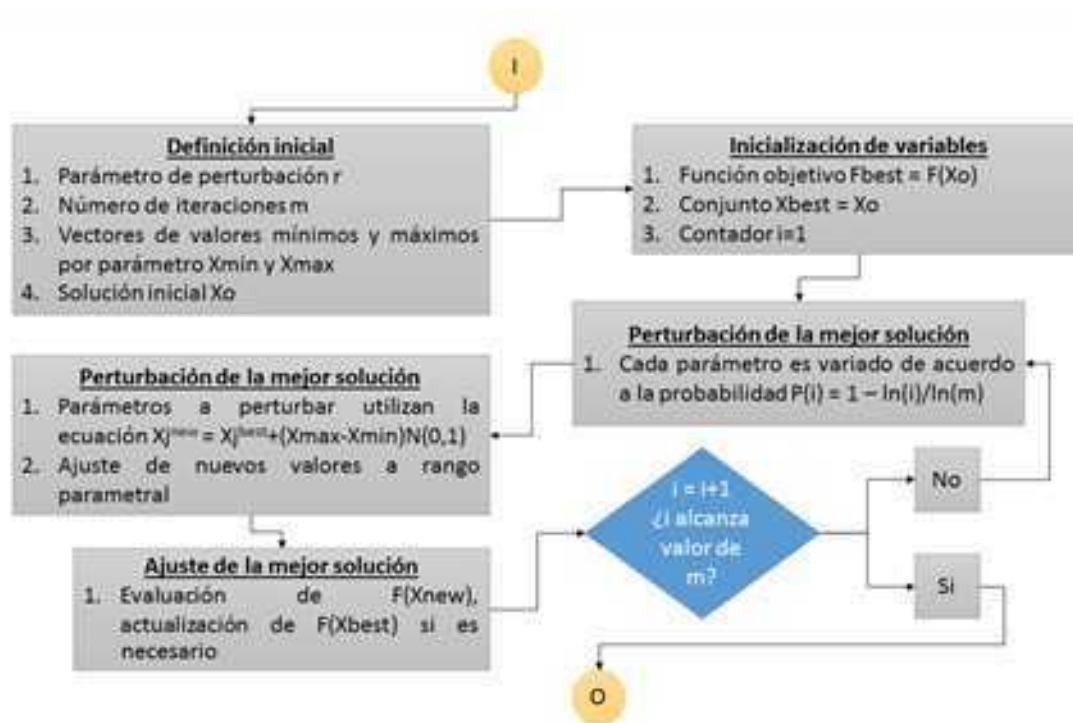


Figura 3. Diagrama del algoritmo DDS. Elaboración propia basada en (Tolson and Shoemaker 2007)

La versión multi-objetivo de DDS se conoce como PA-DDS (Pareto Archived-DDS) (Asadzadeh and Tolson 2013). El algoritmo utiliza DDS como mecanismo de búsqueda de posibles candidatos a partir de la perturbación de una respuesta no-dominada, mientras que la selección de la respuesta a perturbar se escoge por diversos métodos utilizando

todas las respuestas no-dominantes ya encontradas (no-dominadas o no-dominantes quiere decir que mejoran una función objetivo, sin desmejorar las otras).

Los dos algoritmos se encuentran incluidos en el marco del programa Ostrich y necesitan de los mismos requerimientos. Acoplar Ostrich a un modelo como MESH se hace normalmente por intermedio de los archivos tipo Shell.

3. Caso de estudio

En el presente capítulo se presenta la información general del caso de estudio objeto de este trabajo: La Macro Cuenca Magdalena Cauca (MCMC). Adicionalmente, se muestra la información general de la cuenca del río Coello (CRC), por tratarse de la primera cuenca que fue implementada en MESH, en el marco de este proyecto. También se presentan valores de índices morfométricos de la CRC, no así de la MCMC, pues su tamaño dificulta las comparaciones.

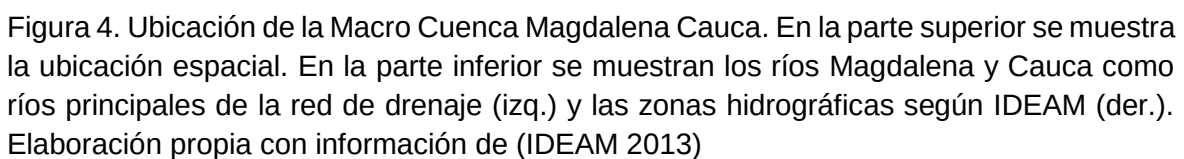
Se expone igualmente el origen de la información necesaria para la implementación de MESH tanto en la CRC, como en la MCMC: información hidrometeorológica y datos de elevación, textura del suelo y coberturas vegetales, su análisis y el tratamiento que se hace de esta información para ajustarla a las necesidades del modelo computacional.

La última parte de este capítulo da cuenta de la elaboración de los escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo, las herramientas asociadas para su conformación, así como los resultados intermedios de los mismos.

3.1 La Macro Cuenca Magdalena Cauca

La Macro Cuenca Magdalena Cauca (MCMC) es la cuenca más importante de Colombia, en términos demográficos y socio-económicos. Su área aproximada es de alrededor de 257,000 km² y representa un complejo terreno, a nivel topográfico y climatológico, debido a la presencia de la cordillera de los Andes y a la interacción con los Océanos Pacífico y Atlántico, lo que da lugar a condiciones ambientales difíciles de analizar a nivel hidro-climatológico (Cormagdalena e IDEAM 2001). La cuenca se muestra, junto con sus subzonas hidrográficas, en la Figura 4.

Cerca del 80% de la población del país se concentra en esta extensa zona, en donde además se produce el 95% de la energía termoeléctrica y el 75% de la energía hidroeléctrica nacional. En términos nacionales, la MCMC concentra el 80% de la producción económica de la nación (según cálculos del PIB, de acuerdo con Cormagdalena e IDEAM 2001).



La climatología de la MCMC está afectada a nivel intra-anual por la zona de confluencia inter-tropical (ZCIT) y los patrones que genera sobre los vientos alisios (Poveda 2004). También se presentan efectos sobre el área a causa de los Chorros del Chocó y de San Andrés y a los cambios periódicos que las afectan, así como relaciones entre la humedad proveniente del área Amazónica por evapotranspiración y su interacción general con la orografía andina (Poveda et al. 2006). En cuanto al ENSO (*El Niño – Southern Oscillation*), este es la mayor causa de variabilidad inter-anual, cambiando tanto el momento de afectación, como las características de su efecto, según el área considerada dentro de la MCMC (Poveda et al. 2006).

Por su parte, la hidrología presenta también una alta variabilidad, debido a la diversidad de climas, tipos de suelo y coberturas vegetales presentes, así como a la compleja situación orográfica. En general, la MCMC presenta dos grandes zonas de drenaje: el río Magdalena, amplio en su valle fluvial y con cerca de 1500 km de longitud y el río Cauca, con un valle más encañonado y con cerca de 1000 km de extensión. Estos dos grandes ríos se encuentran en la zona de la Mojana, formando una compleja red de ciénagas y pantanos (Cormagdalena e IDEAM 2001).

Adicional a la variabilidad hidroclimatológica, toda el área ha venido acumulando grandes cambios en su cobertura vegetal (Restrepo et al. 2015) lo que está provocando tendencias crecientes en la carga de sedimentos que está transportando la red de drenaje de la MCMC (Restrepo and Escobar 2016) y está impactando varias zonas costeras (Restrepo et al. 2006, 2016).

A pesar de la importancia de esta cuenca, los intentos por construir un modelo hidrológico de macro-escala, como apoyo a la gestión del recurso hídrico, han comenzado hace relativamente poco, iniciando por la modelación de algunas de sus sub-cuencas (Ramirez et al. 2015), simulando el ciclo de toda la cuenca a nivel mensual (Angarita et al. 2013, 2017), o conformando un ensamble de modelos hidrológicos a nivel mensual y diario (Rodríguez et al. 2016; Rodríguez et al. 2017).

El uso de una herramienta de modelación para toda la cuenca permite investigar los efectos del cambio climático y de los cambios en el uso del suelo, y se acomoda a estudios de impactos debidos a variabilidad climática, a los que está expuesta la zona. Por ejemplo, entre los años 2009 y 2010 se presentó un evento de “El Niño”, el cual fue seguido en 2010-2011 por un evento de “La Niña” (Martinez et al. 2011), con afectaciones a más de cuatro millones de personas y pérdidas de miles de millones de dólares (Hoyos et al. 2013).

3.2 Primera implementación de MESH: La cuenca del río Coello

La CRC es una subcuenca de la MCMC, localizada en su zona alta. Esta subcuenca tiene un área de aproximadamente 1800 km² y debido a la presencia de la Cordillera Central, presenta formas del paisaje y patrones de precipitación complejos, complicando por

ejemplo los procesos de interpolación de la misma. En general en la CRC se presentan actividades agrícolas, principalmente de arroz y café, que cubren el 15% del área de la cuenca (Cruz-Roa et al. 2017), además de zonas de pastos (42%) bosques (41%) y zonas urbanas (2%) (IDEAM et al. 2008). Su ubicación espacial se muestra en la Figura 5.

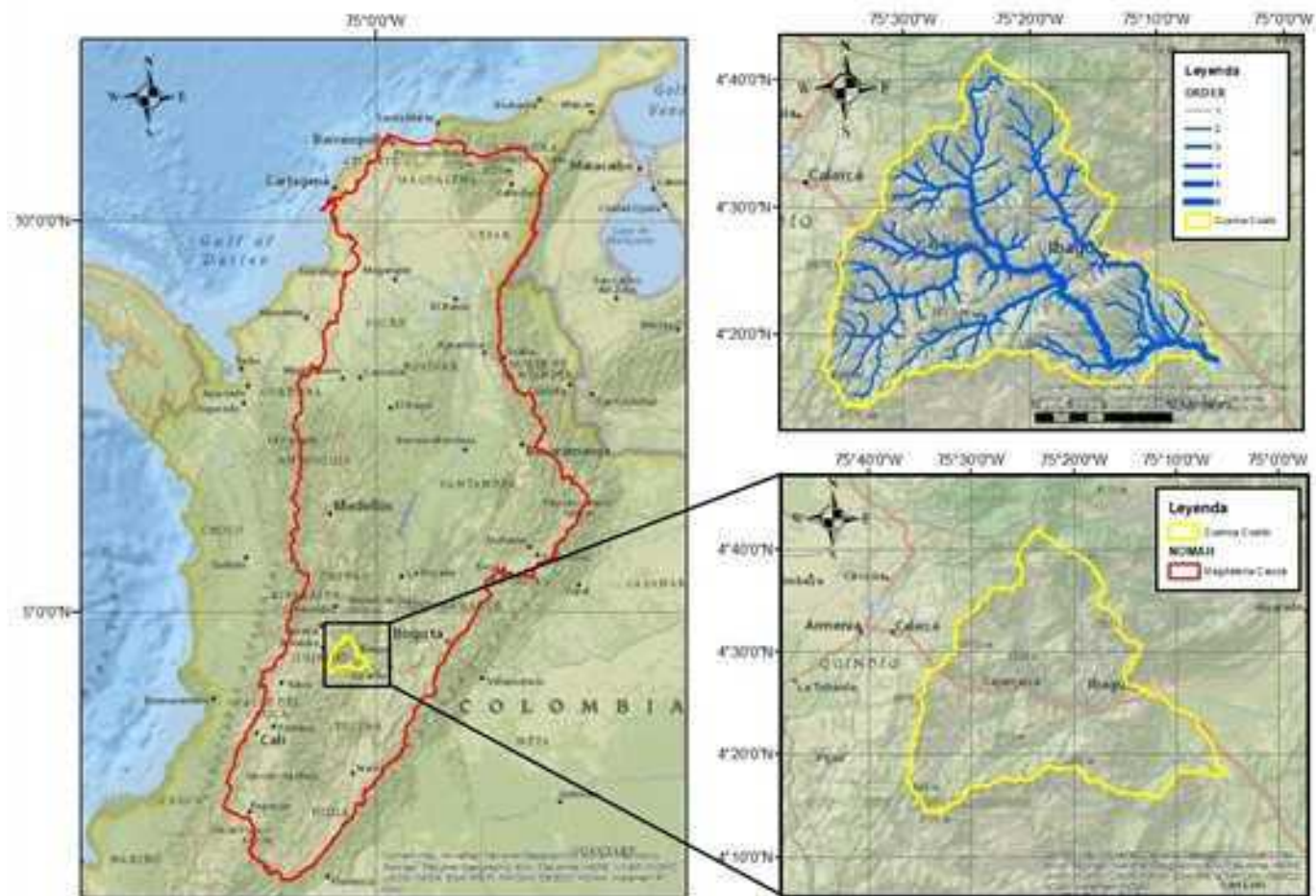


Figura 5. Ubicación de la cuenca del río Coello dentro de la Macro Cuenca Magdalena Cauca (columna izq. y panel inferior der.) y ordenes de la red de drenaje según clasificación de Horton-Strahler (panel superior, der.)

La morformetría de la CRC se presenta en la Tabla 2. La cuenca cumple la ley de las potencias de Horton, con una relación de bifurcación R_b de 3.45, propia de cuencas montañosas (Horton 1945), y relación de longitud R_l de 2.07 (cerca de valores reportados en la literatura (Horton 1945)). Por su parte, la pendiente promedio del cauce principal está por encima del 10%, mostrando que el área presenta características propias de cuencas tropicales de montaña.

En cuanto a los aspectos de forma, la cuenca presenta un tamaño medio, propio de una subcuenca importante, mientras que su factor de forma es bajo, lo que indica una forma alargada, menos propensa a crecientes (Méndez et al. 2015), y su factor de compacidad

indica que la forma de la cuenca está alejada de la circularidad, siendo más cercana a una de tipo oblonga, lo que indicaría picos de caudal de tipo someros y de larga duración, (Sánchez 2014; Méndez et al. 2015) (ver Tabla 2).

La densidad de drenaje presenta un valor bajo, que corresponde a una cuenca con litología resistente a la erosión (Horton 1945). Su coeficiente de torrencialidad presenta valores bajos, lo que indicaría una baja susceptibilidad a la erosión lineal, y tiempos de concentración o de respuesta de la cuenca largos (Méndez et al. 2015) (ver Tabla 2).

Tabla 2. Morfometría de la cuenca del río Coello. Elaboración propia a partir de (Méndez et al. 2015)

Aspectos lineales			
Orden	Frecuencia	Long. Promedio (km)	
1	481	1.27	
2	222	1.21	
3	19	6.66	
4	7	12.73	
5	2	11.02	
6	1	48.14	
Rb	3.45	Pendiente cauce	12.56%
RI	2.07		
Aspectos de forma y de pendiente			
Área km²	1532	Ff	0.50
Perímetro km	207	Fc	1.49
Longitud km	55	Pendiente cuenca	38.06%
DD	0.73	Ct	0.31

Rb: Relación de bifurcación; RI: Relación de longitud; Ff: factor de forma; Fc: Coeficiente de compacidad; DD: Densidad del drenaje; Ct: Coeficiente de torrencialidad.

3.3 Información hidrometeorológica disponible en la MCMC

Para realizar el balance hídrico y energético MESH utiliza siete variables meteorológicas, como datos de entrada. Esta información se presenta en formato rasterizado y proviene de tres fuentes principales: Datos observados provenientes del IDEAM, datos basados en variables observadas (también provenientes del IDEAM) pero calculados a partir de ecuaciones empíricas y datos de reanálisis. Estos datos fueron interpolados a una escala de 0.1° (alrededor de 10 km) con el fin de mantener los lineamientos generales de modelación del proyecto Earth2Observe Colombia (algunas variables fueron interpoladas en el marco de este proyecto), y para simular la hidrología de la MCMC a nivel de mesoescala.

Las razones para restringir la escala a 0.1° incluyen un balance entre la fidelidad del modelo, la disponibilidad y la escala de la información, y el costo computacional al correr un modelo de meso escala (Silberstein 2006). Por ejemplo, para el caso de la MCMC, se requirieron 2052 celdas de 0.1° por 0.1° para cubrir toda la cuenca. Sobre cada una de esas celdas, se procederán a resolver las ecuaciones del modelo LSS, y posteriormente se procederá a simular el tránsito de crecientes entre las celdas. Sin embargo, dada la escala, los parámetros utilizados corresponderán a parámetros efectivos para cada celda, no a parámetros reales (Clark et al. 2015a). Una mayor resolución del modelo podría mejorar la asignación de valores paramétricos a partir de información secundaria, pero entonces el costo computacional de correr una sola vez el modelo sería mayor. Sin embargo, no siempre se da una mejora en los valores simulados como consecuencia de una mayor resolución de la información de entrada al modelo (Döll et al. 2008; Clark et al. 2015a).

Adicionalmente, para el proceso de calibración y validación del modelo, se utilizaron datos de caudal, puesto que estos datos corresponden a una respuesta integradora de lo que sucede dentro de la cuenca (Davison et al. 2016); con el fin de seguir los lineamientos de simulación del proyecto Earth2Observe, caso Colombia, fueron seleccionados 88 puntos de control dentro de la MCMC. Estos datos fueron rellenados en el marco del proyecto, utilizando métodos simples de correlación con estaciones cercanas, u otras técnicas. Otros 8 puntos de control adicionales fueron retirados del proceso de calibración y de su análisis, debido a dificultades en su modelación, principalmente ligados a problemas de medición en la zona de la Mojana, pero se conservaron los resultados de simulación, los cuales se muestran en los anexos.

Los datos de precipitación, temperatura mínima y temperatura máxima, fueron interpolados a partir de observaciones diarias, en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia y fueron tomados como base con el fin de compararlos con otras implementaciones de modelación para la cuenca dentro del mismo proyecto. La temperatura media siguió el mismo procedimiento de interpolación que el propuesto dentro del proyecto (Rodríguez et al. 2017).

Los datos de presión atmosférica y velocidad del viento provienen del reanálisis del proyecto Earth2Observe (Weedon et al. 2014). Esto debido a la baja cantidad de estaciones en la cuenca con datos para estas dos variables y a la gran cantidad de datos faltantes en las pocas series disponibles de estas variables.

Ante la carencia de información puntual observada, los datos de radiación de onda larga y de onda corta provienen de ecuaciones empíricas y datos observados (temperatura media y brillo solar, respectivamente).

Estos datos pasaron por un proceso previo de depuración, con el fin de contar con información de calidad y los mapas elaborados fueron comparados puntualmente con datos observados (para el caso de variables calculadas a partir de observaciones), o con productos del reanálisis meteorológico, con el fin de comprender y validar la información (ver pág. 134). Valores promedio de las variables meteorológicas pueden apreciarse en la

Figura 6. A continuación se hace un recuento del origen de los datos meteorológicos; más información puede hallarse en la pág. 122:

1. **Precipitación:** A través de un amplio proceso de comparación de metodologías de interpolación de precipitación, para el caso de estudio en Colombia del proyecto Earth2Observe, utilizando validación cruzada, se encontró que el uso de la altura, como deriva externa, en la aplicación del método de Kriging, brinda los mejores resultados al momento de construir los mapas diarios de precipitación (Rodríguez et al., 2017; Rodríguez et al. 2016).

Estos datos de precipitación pasaron por un proceso previo de depuración. Con el fin de contar con la mayor cantidad posible de datos, se utilizó información de todas las estaciones existentes (alrededor de 2256 estaciones) haciendo la salvedad de que los datos faltantes no fueron rellenados previamente, por lo que para un día dado, se utilizaban solamente las estaciones con datos disponibles para ese día.

2. **Temperatura:** También en el marco del caso de estudio Colombia del proyecto Earth2Observe, se realizó un extenso proceso de comparación de metodologías de interpolación de datos de temperatura máxima y mínima, utilizando validación cruzada. Los resultados mostraron que el uso del método de Co-Kriging, utilizando la elevación como información secundaria era satisfactoria, por lo que se escogió este método para elaborar los mapas de temperatura máxima y mínima diaria (Rodríguez et al., 2017; Rodríguez et al. 2016).

La temperatura media, estimada como el promedio de temperatura máxima y mínima, mostró resultados mixtos, al ser comparada puntualmente con mediciones en tierra, por lo que para esta variable se decidió realizar una interpolación utilizando el mismo método de interpolación de Co-Kriging.

Al igual que para la precipitación, se utilizaron todas las estaciones sin datos faltantes por día, para poder contar con la mayor cantidad de información. En total, se utilizaron 467, 481 y 392 estaciones para datos de temperatura máxima, mínima y media, respectivamente.

3. **Radiación de onda larga:** Debido a la imposibilidad de contar con datos medidos de radiación de onda larga, a las dificultades para encontrar una ecuación empírica que permita calcularla y posteriormente evaluarla, se decidió utilizar la ecuación de Swinbank (16) (Bilbao and de Miguel 2007), la cual dio buenos resultados en la implementación del modelo ISBA en la cuenca del río la Vieja (Sánchez 2014).

$$Rol = (0.92 * 10^{-5} * (Tm + 273.15))^2 * 5.67 * 10^{-8} * (Tm + 273.15)^4 \quad (16)$$

Donde *Rol* es la Radiación de Onda Larga y *Tm* es la temperatura media en °C.

Puesto que esta ecuación solamente utiliza datos de temperatura media, se decidió utilizar los valores de los mapas rasterizados directamente para el cálculo de la radiación de onda larga.

4. **Radiación de onda corta:** Debido a la baja cantidad de estaciones con datos de radiación en la cuenca (alrededor de 53) y a una gran cantidad de datos faltantes, se prefirió utilizar datos de brillo solar para calcular los valores de radiación puntuales y proceder a la realización de la interpolación por el método IDW (Inverse Distance Weighting). Se utilizó el modelo Angström, que relaciona la radiación de onda corta con el brillo solar, cuyos parámetros fueron calibrados para zonas cafeteras de los Andes colombianos y del Caribe (Allen G. et al. 1998; Jaramillo-Robledo et al. 2006; Guzmán et al. 2013; Sánchez 2014).

Una posterior comparación de datos observados contra datos calculados a partir de brillo solar mostró que existía una sobreestimación por parte del modelo de Angstrom, pero que este error era lineal, por lo que una ecuación de corrección del error fue utilizada.

Con esta información puntual se procedió a elaborar los mapas para esta variable, utilizando el mismo procedimiento general, utilizado para precipitación y temperaturas.

5. **Humedad específica:** Para la construcción de los mapas de humedad específica se decidió realizar varias etapas. Primero, se interpoló la humedad relativa utilizando 388 estaciones localizadas dentro de la MCMC. Posteriormente, utilizando los mapas ya interpolados de temperatura media y humedad relativa y los mapas de presión atmosférica provenientes del reanálisis, se procedió a realizar el cálculo de la humedad específica de forma rasterizada para toda la cuenca.

Las ecuaciones utilizadas se muestran en (17) y (18) (University of Saskatchewan 2017):

$$q_a = 0.622 * \frac{e_a}{P_a - 0.378 * e_a} \quad (17)$$

$$e_a = r_h * 10^{\frac{0.7859 + 0.03477 * Tm}{1 + 0.00412 * Tm} + 2} \quad (18)$$

Donde q_a es la humedad relativa en kg/kg, P_a es la presión atmosférica en Pa, r_h es la humedad relativa en porcentaje, Tm es la temperatura media en °C.

6. **Velocidad del viento:** Debido a la baja cantidad de estaciones en tierra para esta variable y a la gran cantidad de datos faltantes, se decidió utilizar datos provenientes del reanálisis ERA-Interim, de acuerdo con resultados del proyecto Earth2Observe (Weedon et al. 2014).
7. **Presión atmosférica:** Al igual que para el caso de la velocidad del viento, para obtener información de presión atmosférica se utilizaron datos del reanálisis ERA-

Interim, en el marco del proyecto Earth2Observe (Weedon et al. 2014). Esto debido a la baja cantidad de estaciones en tierra y a la gran cantidad de datos faltantes.

Un proceso equivalente de comparación con datos de reanálisis también fue realizado para la CRC (ver pag.131).

3.4 Mapas estáticos de la MCMC

Para la implementación de MESH se requieren mapas de tipo *raster* con información adicional acerca de la localización y características del paisaje. En el marco del proyecto Earth2Observe, caso de estudio Colombia, esta información fue cuidadosamente reunida en varios archivos.

Los archivos rasterizados utilizados en el marco de este trabajo de tesis también fueron re-escalados a 0.1° (alrededor de 10 km) para mantener consistencia con los datos meteorológicos (ver pág. 35). Los archivos utilizados fueron los siguientes:

- Modelo digital del terreno: re-escalado a partir del mapa digital del terreno de 90 m (Jarvis et al. 2008). Este último también se utilizó para calcular la pendiente del terreno, también reescalado a tamaño de rejilla de 0.1° en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia (Rodríguez et al., 2017; Rodríguez et al. 2016)
- Mapas de porcentaje de coberturas vegetales por celda: Para la conformación de este mapa, se partió del mapa de coberturas elaborado con la metodología Corine Land Cover (IDEAM et al. 2008), el cual fue reescalado a 0.1° para cada tipo de cobertura, calculando en cada celda de 0.1° el porcentaje de área ocupada por la cobertura en cuestión. Posteriormente, estas áreas fueron reclasificadas y depuradas para conformar los mapas de cobertura de MESH.
- Mapa de textura del suelo: Para la conformación de este mapa, se partió del mapa de suelos del IGAC (IGAC 2003), el cual fue la base para conformar un mapa de textura (de acuerdo con la reclasificación del mapa original). Posteriormente, se llevó a escala de 0.1° utilizando la textura del suelo con mayor área dentro de cada rejilla.
- Mapa de direcciones del flujo: elaborado a partir del Modelo de Elevación del Terreno, en conjunto con información adicional como el mapa de drenaje de la MCMC, mapa de localización de ciénagas, mapa de localización de embalses y mapa de zonificación hidrográfica del IDEAM (IDEAM 2013; IGAC 2014a, b, c)

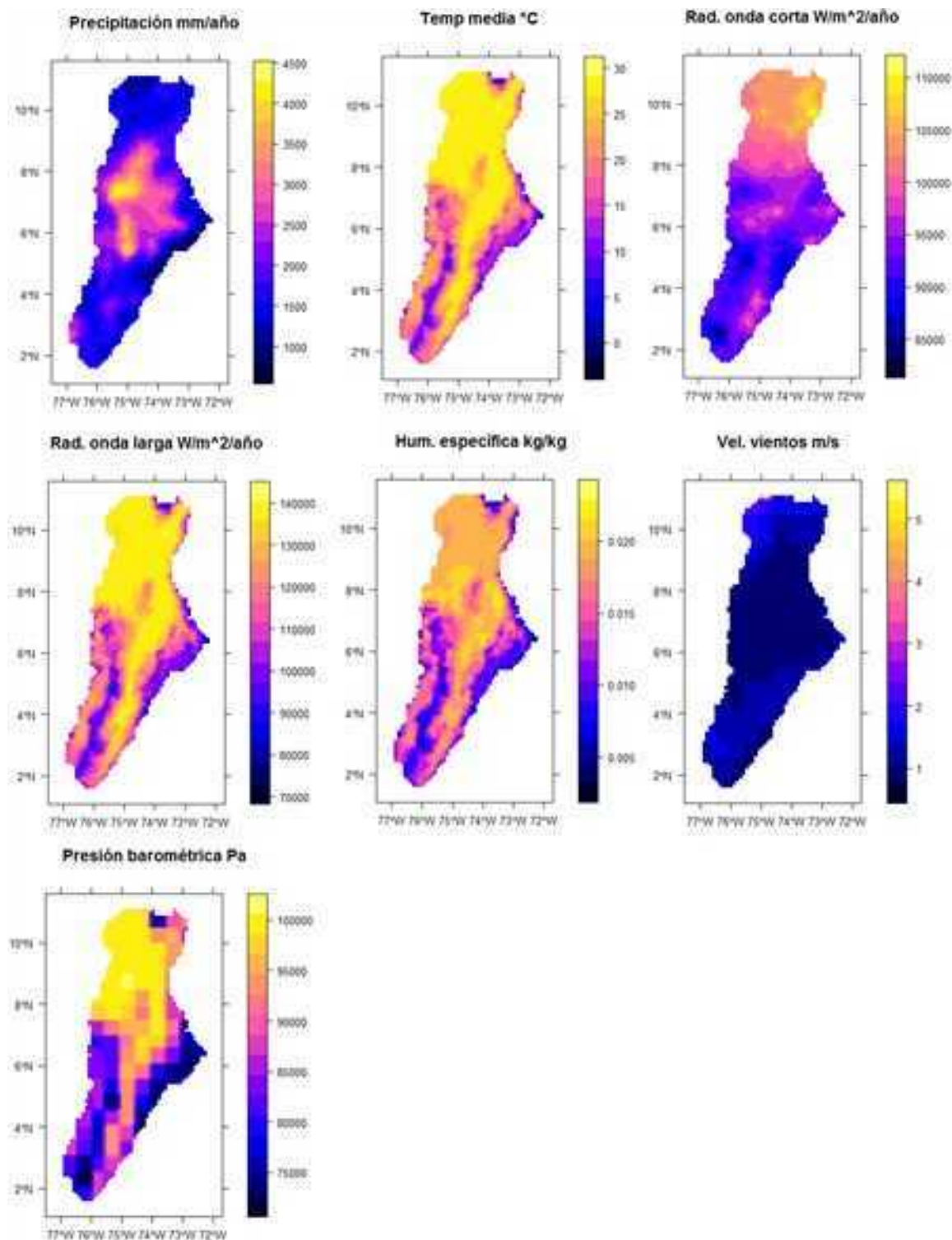


Figura 6. Valores promedio de variables meteorológicas en la MCMC y sus respectivas unidades de medida, para el período 1981-2011. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe.

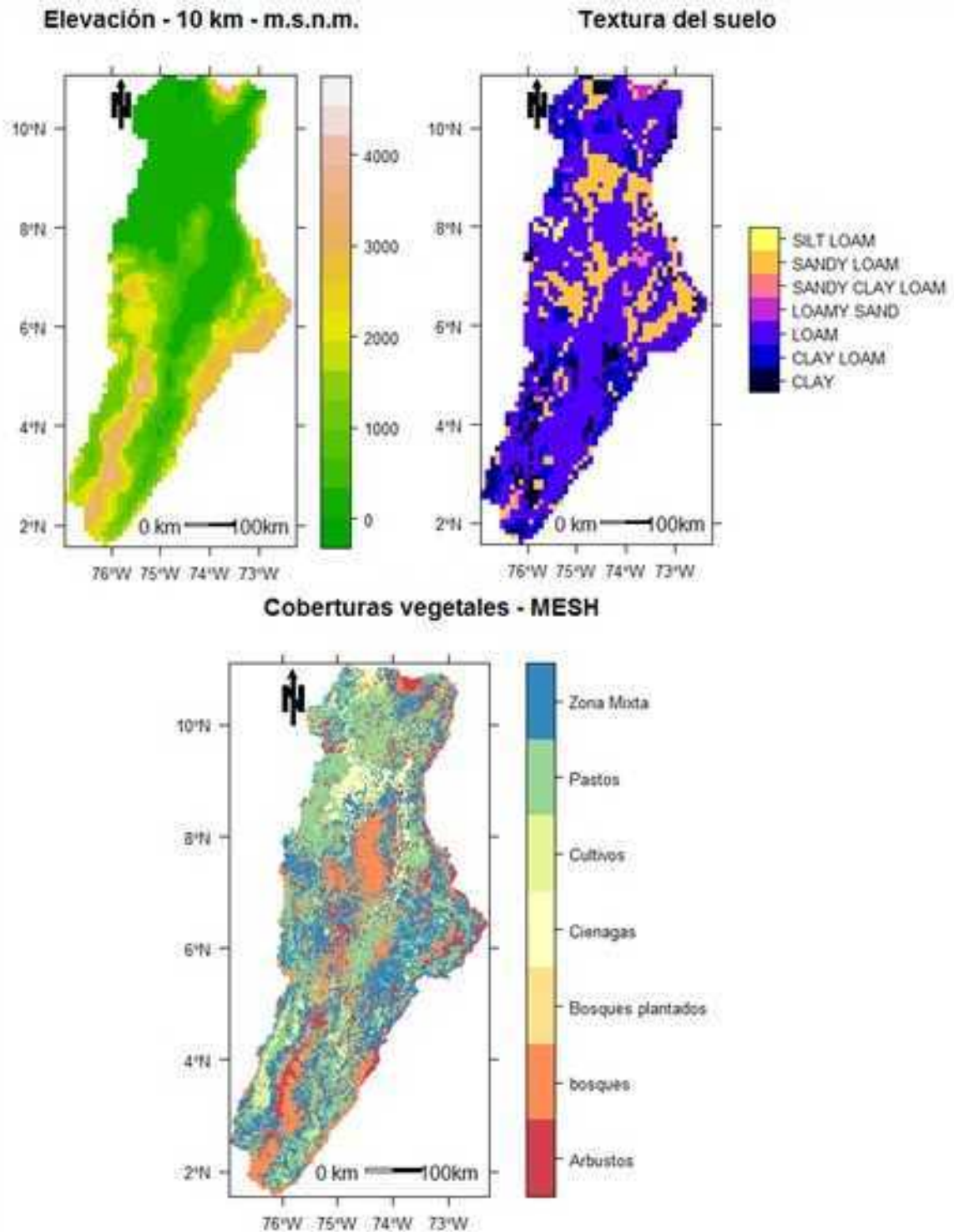


Figura 7. Mapas estáticos procesados para uso en MESH (a. Modelo Digital, b. Textura del suelo, c. Cobertura vegetal).

Las limitaciones de la escala espacial imponen un problema, que como se ha dicho anteriormente, está ligado a la disponibilidad de información, al costo computacional de correr el modelo en tiempo, y a la necesidad de representar de una manera más o menos fiel la heterogeneidad espacial. Sin embargo, los métodos aquí utilizados para escalar la información de los mapas estáticos, y poder utilizarlos en el modelo MESH, se hacen para tener información de valores paramétricos efectivos, es decir, a nivel de celda, y conllevan un proceso de calibración-validación posterior que ajusta los valores de simulación a las observaciones existentes. Los efectos en las salidas del modelo frente a la escala escogida, parecen ser dependientes del modelo y de la cuenca bajo estudio, y por lo tanto puede requerir de un análisis individual y riguroso para ser cuantificado (Döll et al. 2008).

Toda esta información fue utilizada para conformar el archivo de drenaje que utiliza MESH (ver pág. 25 sobre archivo de drenaje), o como valores iniciales en la calibración de valores de porcentaje de arena y arcilla en el archivo de parámetros de CLASS (ver pág. 20 sobre archivo de parámetros de CLASS).

Otros datos necesarios para conformar el archivo de drenaje (como densidad de contorno, o área de la sección del canal) se obtienen a partir de la información del modelo digital del terreno, en concordancia con recomendaciones de implementación del modelo WATFLOOD por intermedio del Sistema de Información Geográfica Green Kenue (Canadian Hydraulics Centre et al. 2010; Kouwen 2017).

Para ver un recuento detallado de la información original utilizada en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia, así como del trabajo desarrollado para elaborar el marco general de modelación del proyecto, ver pág. 141. Asimismo, la Figura 7 muestra los mapas procesados y utilizados en el proceso de modelación con MESH.

Para la CRC se utilizaron los mismos mapas estáticos, recortados a los límites de la subcuenca.

3.5 Escenarios de cambio climático para la MCMC

Colombia hace parte de la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que intenta entender los factores que aceleran el cambio del clima y llegar a consensos sobre acciones que aborden causas y mitiguen sus consecuencias, utilizando como marco los estudios realizados por el IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), especialmente su quinto reporte (IPCC 2013).

En el marco de esta convención, el IDEAM publicó la Tercera Comunicación sobre Cambio Climático (IDEAM 2015), donde se muestran los últimos avances en la comprensión de los efectos del Cambio Climático sobre el territorio nacional. Entre algunas mejoras con respecto a la Segunda Comunicación, se pueden mencionar 1) la actualización a los escenarios de cambio climático del quinto reporte, 2) la utilización de varios Modelos de Circulación Global (*Global Circulation Model*, GCM), provenientes del quinto reporte del

mismo para conformar un ensamble meteorológico y 3) un tratamiento diferenciado de cada modelo según su capacidad para simular el clima actual.

A partir de estos resultados, fue posible obtener del IDEAM datos puntuales de cambios en precipitación y temperatura para los periodos futuros 2011-2040, 2040-2070, y 2070-2100. En total se contaron con 749 estaciones de precipitación y 315 de temperatura. Estos resultados puntuales fueron interpolados utilizando un método simple (IDW), con el fin de calcular un factor de cambio para precipitación y temperatura, en cada punto de la MCMC.

Los escenarios de cambio climático para la precipitación se muestran en la Figura 8, mientras que los escenarios de cambio climático para la temperatura se muestran en la Figura 9. Para una mayor profundización acerca de estos resultados y sus implicaciones para el país, se recomienda leer a (IDEAM 2015). Cabe resaltar que el número del escenario radiativo RCP (que va del 2.6 al 8.5) refleja la severidad del escenario, siendo el 2.6 el más leve y el 8.5 el más severo.

El método de Factor de Cambio (*Change Factor*, CF) (Prudhomme et al. 2002; Diaz-Nieto and Wilby 2005; Ntegeka et al. 2014) es uno de los métodos más simples y efectivos, utilizados en la conformación de escenarios de Cambio Climático, dentro de estudios de análisis de impactos.

El método presenta ventajas en su implementación, principalmente debido a la facilidad de cálculo y al uso de los cambios promedio en el clima que muestran las salidas de los GCM, lo que redundo en una menor incertidumbre (Ntegeka et al. 2014).

Sin embargo, presenta desventajas y limitaciones, principalmente debido a la afectación de uno solo de los parámetros estadísticos (solo se afecta el promedio) y a la incertidumbre asociada con la persistencia de la estructura climática (días sin lluvia para el caso de la precipitación, temporadas con bajas temperaturas para el caso de la temperatura, por ejemplo) (Diaz-Nieto and Wilby 2005). También presenta problemas de escala temporal, pues el factor de cambio es de tipo mensual o anual, y su uso está restringido a intervalos de tiempo reales, los cuales son afectados para generar los escenarios.

Existen otros métodos de generación de escenarios de cambio climático. El reescalamiento estadístico por ejemplo, es un método que relaciona una variable de la climatología regional a escala diaria proveniente de un modelo de circulación global (por ejemplo, presión atmosférica al nivel de mar, o incluso índices de islas de calor), con el valor de precipitación y temperatura a escala local, medido en una estación meteorológica (Diaz-Nieto and Wilby 2005).

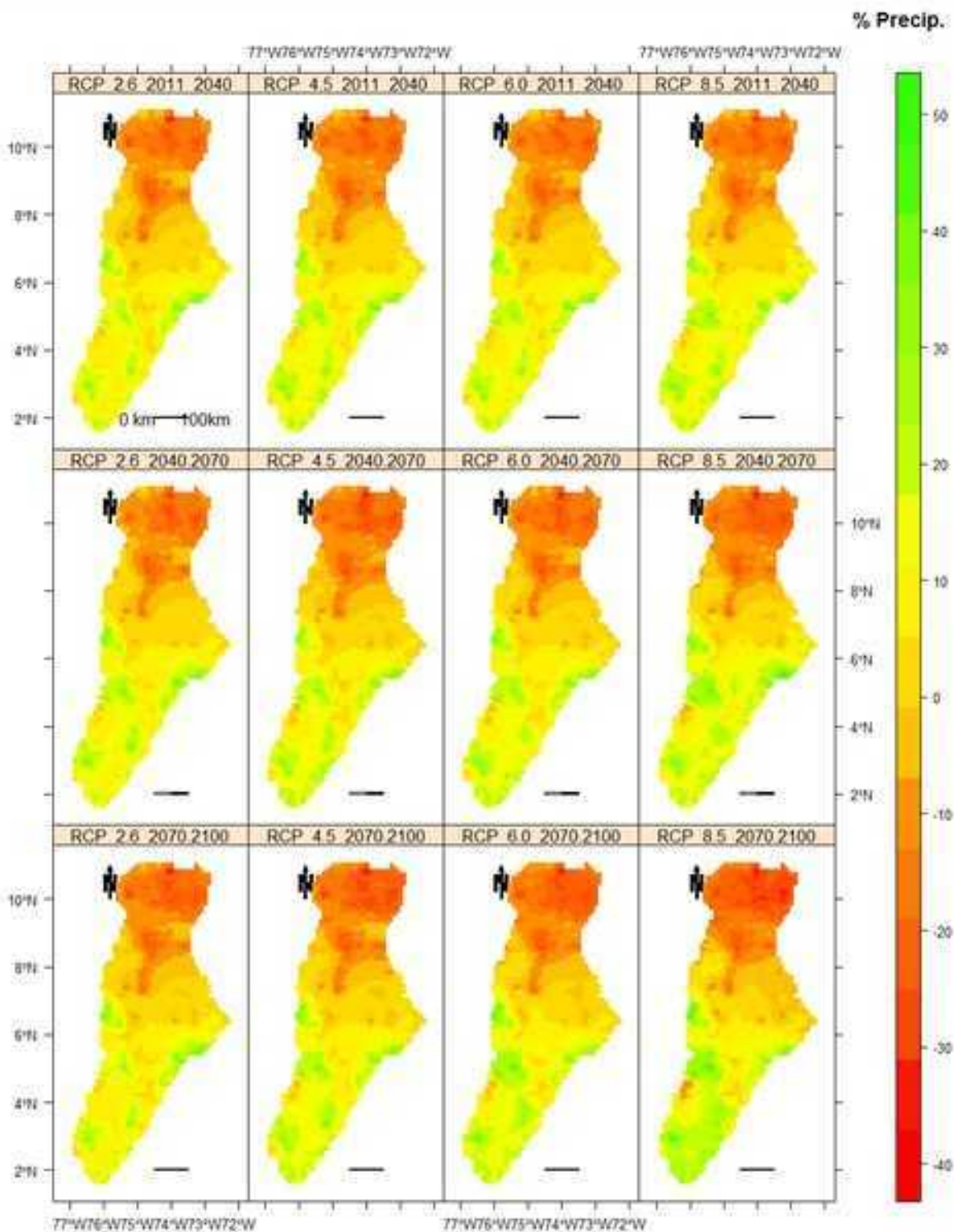


Figura 8. Cambios mensuales en la precipitación, en porcentaje, bajo escenarios de cambio climático. Elaboración propia a partir de datos de IDEAM, 2015.

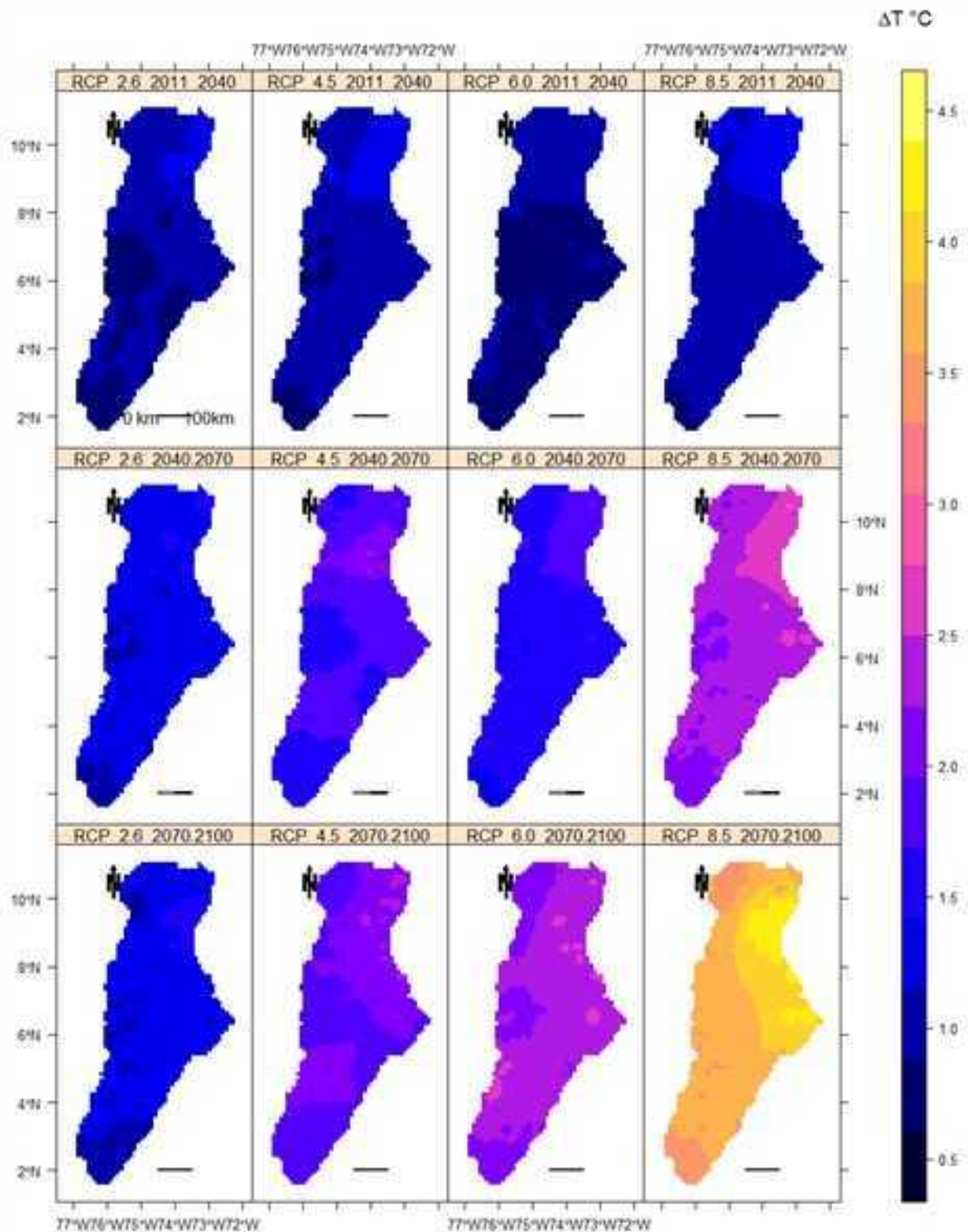


Figura 9. Cambios mensuales en temperatura, en grados Celsius, bajo escenarios de cambio climático. Elaboración propia a partir de datos de IDEAM, 2015.

Este método tiene la ventaja de permitir la exploración de eventos secuenciales de los valores de precipitación y temperatura, lo que se puede traducir en una estructura climática modificada. Sin embargo, depende de la calidad de las mediciones en tierra y de las salidas de los modelos de circulación global, y asume que la relación entre las variables es constante en el tiempo (Díaz-Nieto and Wilby 2005).

Un tercer método es el de reescalamiento dinámico. Este consiste en correr un modelo de circulación regional utilizando los resultados del modelo de circulación global como condición de frontera. Es uno de los métodos más sofisticados existentes (Prudhomme et al. 2002), sin embargo, su costo computacional es alto, y no necesariamente arroja buenos resultados, si las condiciones de frontera no son cercanas a los valores reales (Prudhomme et al. 2002).

De los tres métodos mencionados, el más utilizado en hidrología corresponde al del Factor de Cambio (Prudhomme et al. 2002), entre otras razones por su simplicidad. En este trabajo, dada la posibilidad de utilizar los factores de cambio calculados en la Tercera Comunicación sobre Cambio Climático (IDEAM 2015), y su esfuerzo por utilizar un ensamble meteorológico para disminuir la incertidumbre asociada a la estructura de cada modelo (Ntegeka et al. 2014), se decidió utilizar este método para generar los escenarios de Cambio Climático propuestos para la MCMC.

Sin embargo, es necesario aclarar que, entre sus desventajas, el factor de cambio no permite realizar un análisis detallado de eventos extremos, pues simular estos eventos requiere de información a nivel intradiario, incluso intrahorario, para poder conocer la respuesta del sistema hidrológico ante cambios en la variabilidad e intensidad de la tormenta (Prudhomme et al. 2002).

A partir de estos factores de cambio por estación, se procedió a interpolar los valores utilizando un método simple (*Inverse Weighted Distance*, IDW), y el mapa interpolado se utilizó para afectar los mapas de precipitación y temperatura entre los años 1996 y 2007 (12 años en total), asumiendo el factor de cambio asociado al periodo 2011-2040 para los primeros tres años, 2040-2070 para los segundos tres, y 2070-2100 para los últimos tres.

Las razones para escoger un periodo de tiempo de 12 años están ligadas a las dificultades computacionales para generar los escenarios, y posteriormente para correr el modelo bajo esos forzamientos. Generar un escenario para toda la MCMC, y posteriormente escalarlo temporalmente según las necesidades de MESH toma alrededor de cinco días, mientras que correr 12 años de simulación, con un año de calentamiento, para toda la MCMC, toma alrededor de 8 horas. La necesidad de correr 10 escenarios limitaba este proceso.

Adicionalmente, se corrigieron indirectamente los valores de humedad específica y radiación de onda larga, al recalcularlos utilizando los nuevos datos de temperatura. Los valores de velocidad del viento, presión atmosférica y radiación de onda corta, permanecieron inalterados, asumiendo que a futuro no experimentarán cambios, o estos

serán relativamente pequeños. Si bien no se encontró evidencia de limitaciones por corrección de variables meteorológicas, mientras otras se dejan constantes, se deben anotar dos aspectos importantes: el primero es que este tipo de correcciones indirectas son comunes en bases de datos como reanálisis, como reporta Weedon et al. 2014 para el caso del WFDEI, y la segunda es que, dada la incertidumbre de los escenarios generados, indudablemente existe una incertidumbre asociada en las variables de salida del modelo. Sin embargo, por el momento no es posible cuantificar esta incertidumbre.

3.6 Escenarios de cambio en el uso del suelo para la MCMC

En el marco del proyecto Earth2Observe se aplicó la herramienta WaterWorld (Mulligan 2013) para el estudio de la MCMC. Este modelo permite calcular afectaciones por cambio climático y cambios en el uso del suelo sobre diversos índices hidrológicos. La herramienta asociada para la implementación de afectaciones por deforestación es QuickLuc 2.0 (Mulligan 2016).

QuickLuc 2.0 proyecta un escenario de deforestación a 50 años, basado en las tasas actuales, de acuerdo con datos satelitales de MODIS, provenientes de Terra-i (Reymondin et al. 2010). Con las tasas actuales, el modelo calcula las tasas futuras, concentrando los cambios en la cobertura en las celdas cercanas, de acuerdo con reglas relativas a la distancia, principalmente por cercanía a los frentes de deforestación, y accesibilidad de la población a la zona.

Los promedios regionales de estas tasas futuras pueden ser más fuertes o más débiles según especificaciones del usuario; además, se pueden agregar patrones adicionales de deforestación sobre zonas puntuales, como tasas de deforestación más altas de las estimadas por el modelo cerca a zonas ya deforestadas, frentes de deforestación nuevos cerca de carreteras y ríos, o tasas de deforestación reducidas en zonas protegidas como parques naturales. Esta herramienta fue utilizada para el análisis de la MCMC, y el escenario de cambio en el uso del suelo se muestra en la Figura 10.

Para el caso de la MCMC, además de la configuración básica del modelo QuickLuc, se agregaron las siguientes condiciones de cambio en cobertura, las cuales fueron asumidas de manera hipotética:

- Tasa en zonas fuera de áreas protegidas: -30%
- Tasa en zonas dentro de áreas protegidas: 30%
- Tasa en zonas cercanas a vías y ríos: -50%
- Tasa en zonas cercanas a áreas deforestadas: -50%

El proceso de configuración del modelo se realizó en línea, utilizando la interfaz web (<http://www.policysupport.org/waterworld>). Los patrones espaciales muestran claramente un escenario acelerado de deforestación en la zona norte y central de la cuenca, mientras que la zona sur, sobre todo en la Cordillera Central, presentarían menores tasas de pérdida de bosques.

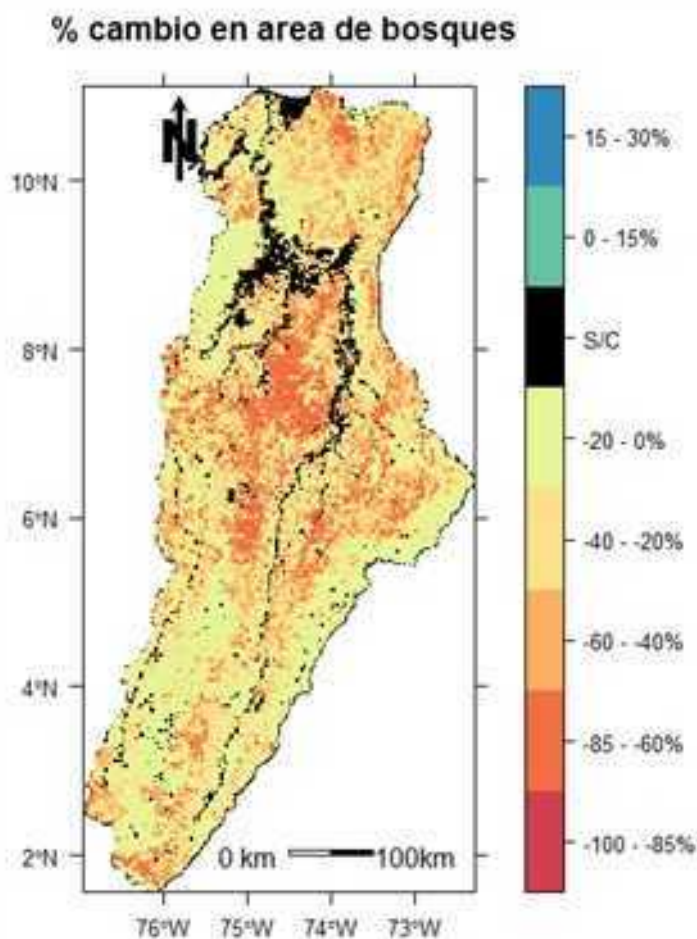


Figura 10. Cambios en el porcentaje de cobertura de bosque según área, de acuerdo con los resultados del modelo QuickLuc. S/C significa sin cambio. Elaboración propia a partir de datos de salida del modelo Quickluc 2.0

A partir de estos patrones espaciales de deforestación, se utilizó el programa SAGA GIS para calcular promedios por celda a una escala de 0.1° (alrededor de 10 km) y posteriormente se recalculó el porcentaje de bosque por celda, bajo el escenario planteado. El porcentaje restante fue repartido entre las zonas “Mixta” y “Cultivos”, considerando que los cambios más probables pueden deberse a una mayor presión por

alimentos, aumentando el área cultivada en conjunto con la expansión de zonas de ganadería (pastos) y bosques fragmentados (la comparación entre la línea base y el escenario planteado se muestra en la Figura 11).

La comparación entre la línea base y el escenario, muestra cambios pronunciados en algunas zonas, principalmente en las categorías “Mixta” y “Cultivos”, como era de esperar, dada la repartición adoptada. Sin embargo, se debe anotar que esta repartición tiene limitaciones, y corresponde a las hipótesis adoptadas en el marco de este trabajo. Por ejemplo, la repartición de las zonas deforestadas entre “Cultivos” y “Mixta” se asume por información secundaria que ha identificado el avance de la frontera agrícola como uno de los factores de transformación (González et al. 2011).

Así mismo, cabe anotar que estos modelos de simulación de cambios en la cobertura vegetal y en el uso del suelo presentan una gran incertidumbre asociada (González et al. 2011). Esto marca una limitante muy importante al analizar las variaciones bajo el escenario de cambio del uso del suelo, pues la transferencia de parámetros asociados a la cobertura puede no realizarse según lo estimado, y estos cambios en los patrones espaciales pueden suavizar o reforzar alguna de las variaciones que se hayan observado originalmente (Wagner et al. 2017).

Se hace notar que algunos ejercicios de modelación elaborados por el IDEAM, muestran tendencias que parecen seguir las que se observaron con el modelo QUICKLUC v2.0 (González et al. 2011). Si bien los ejercicios no son completamente comparables, dado el horizonte de tiempo de los ejercicios del IDEAM y de QUICKLUC v2.0, los patrones espaciales parecen mantenerse.

Sobre la cuestión de coherencia entre las coberturas de clasificación de los modelos de circulación global utilizados en la elaboración de los escenarios, y el modelo MESH, se debe remarcar que la configuración de las condiciones de cobertura son dependientes de cada modelo, y esta no es la excepción en los esquemas de cobertura vegetal de los modelos de circulación global. Por esta razón, la configuración de las condiciones de cobertura de MESH es propia del modelo, de su estructura, y de la reclasificación de la información disponible según las necesidades del modelo.

Ahora bien, los modelos incluidos en el quinto reporte de cambio climático tiene en cuenta dos componentes importantes en la modelación del clima y sus relaciones con la cobertura vegetal: el uso de modelos de dinámica global de la vegetación (Dynamic Global Vegetation Models, DGVM) (IPCC 2013) que simulan los cambios en la vegetación de acuerdo a las cambiantes condiciones atmosféricas, y sus consecuencias en la atmósfera, y los cambios en el uso del suelo inducidos por el hombre, debido a la expansión de deforestación, urbanización y agricultura, y su consecuentes efectos.

El escenario de cambio en el uso del suelo incluido en MESH solo tiene en cuenta el segundo componente, pues no se ha utilizado un módulo DGVM, y por lo tanto no se tienen en cuenta cambios en la vegetación inducidos por cambios en las condiciones atmosféricas.

Ahora bien, sobre el escenario de cambio en el uso del suelo, este es coherente con respecto al cambio que se simula: el paso de un área de bosque a una con pastos, vegetación, o zonas mixtas que incluyan los dos. Así mismo, con el fin de incluir cambios por urbanización, se incluyó la existencia de zonas urbanas en el componente “zonas mixtas”, por lo que esta clasificación puede incluir pastos, cultivos, o zonas urbanizadas. El cambio por urbanización no es incluido rutinariamente en los escenarios de cambio climático de los modelos de circulación global. Igualmente, no se incluyeron cambios por irrigación de manera directa (IPCC 2013).

Pese a todo lo anterior, se recalca que las fuentes de información para interpolar los patrones de cambio en el uso del suelo son diferentes entre los modelos de circulación global, y el escenario de cambio del uso del suelo de MESH, pues los primeros tuvieron en cuenta gran cantidad de información histórica (IPCC 2013), mientras que el modelo QuickLuc tiene en cuenta principalmente información satelital de deforestación, e información secundaria de zonas de protección, carreteras, e infraestructura.

Finalmente, se muestran gráficas de dispersión de las coberturas clasificadas para MESH, tanto para la línea base como para el escenario (ver Figura 12 y Figura 13). En general es posible observar los cambios ya remarcados en los mapas: baja en la cobertura de bosques, aumento en la cobertura de zonas mixtas, cultivos, y pastos. También es importante remarcar aquí como existen unas ciertas correlaciones entre las coberturas y la elevación (por ejemplo, entre las zonas mixtas y la altura), y como estas cambian sustancialmente bajo el escenario, debido sobre todo a la pérdida de cobertura tipo bosque por debajo de los 2.000 m.s.n.m.

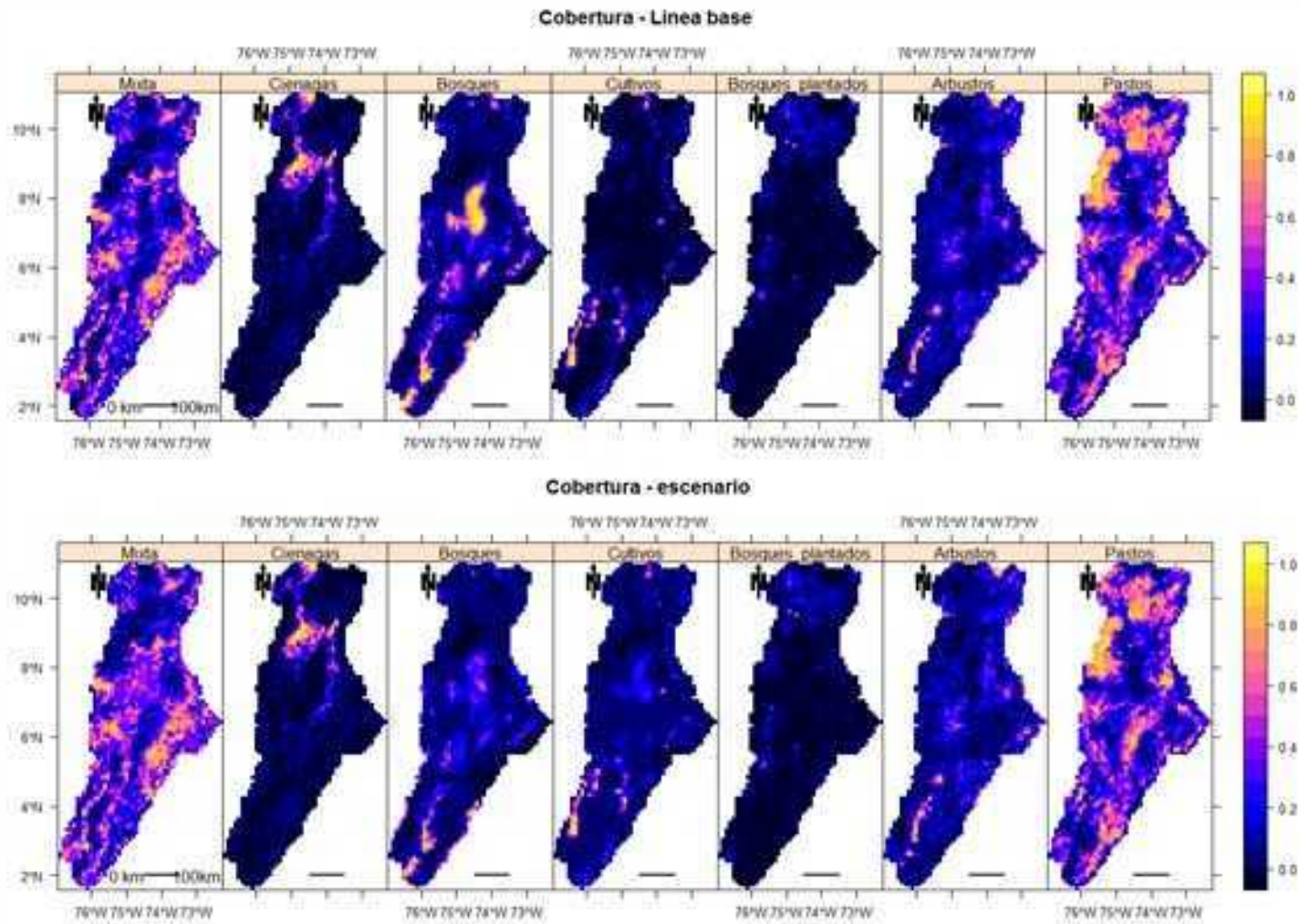


Figura 11. Comparación de línea base de cobertura vegetal para la MCMC y escenario de cambio de cobertura, según grupos de clasificación propuestos para MESH, para fracción de área por celda. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe

Gráficos de dispersión - Línea base

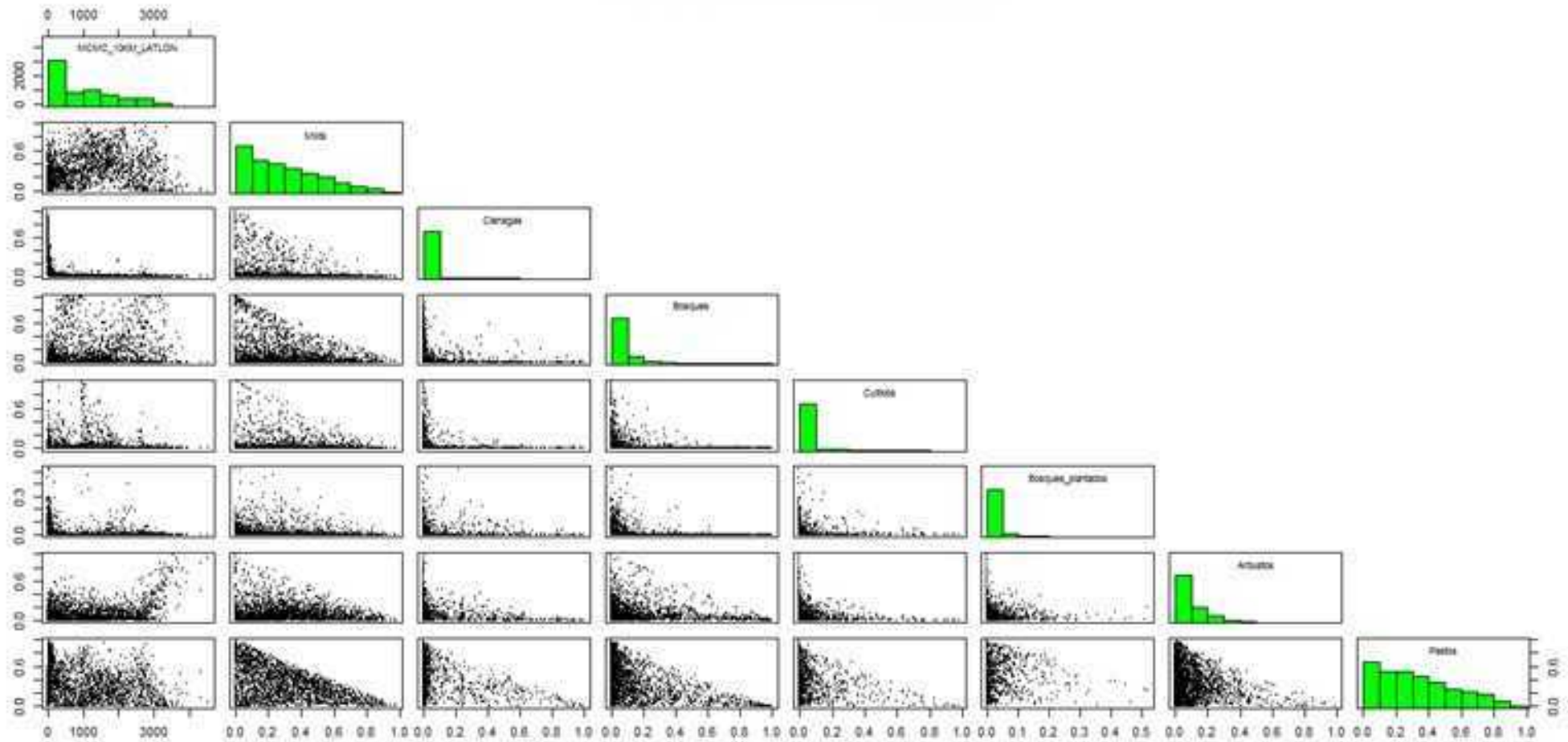


Figura 12. Gráficas de dispersión entre Elevación y porcentajes areales de cobertura, para línea base de coberturas

Gráficos de dispersión - Escenario

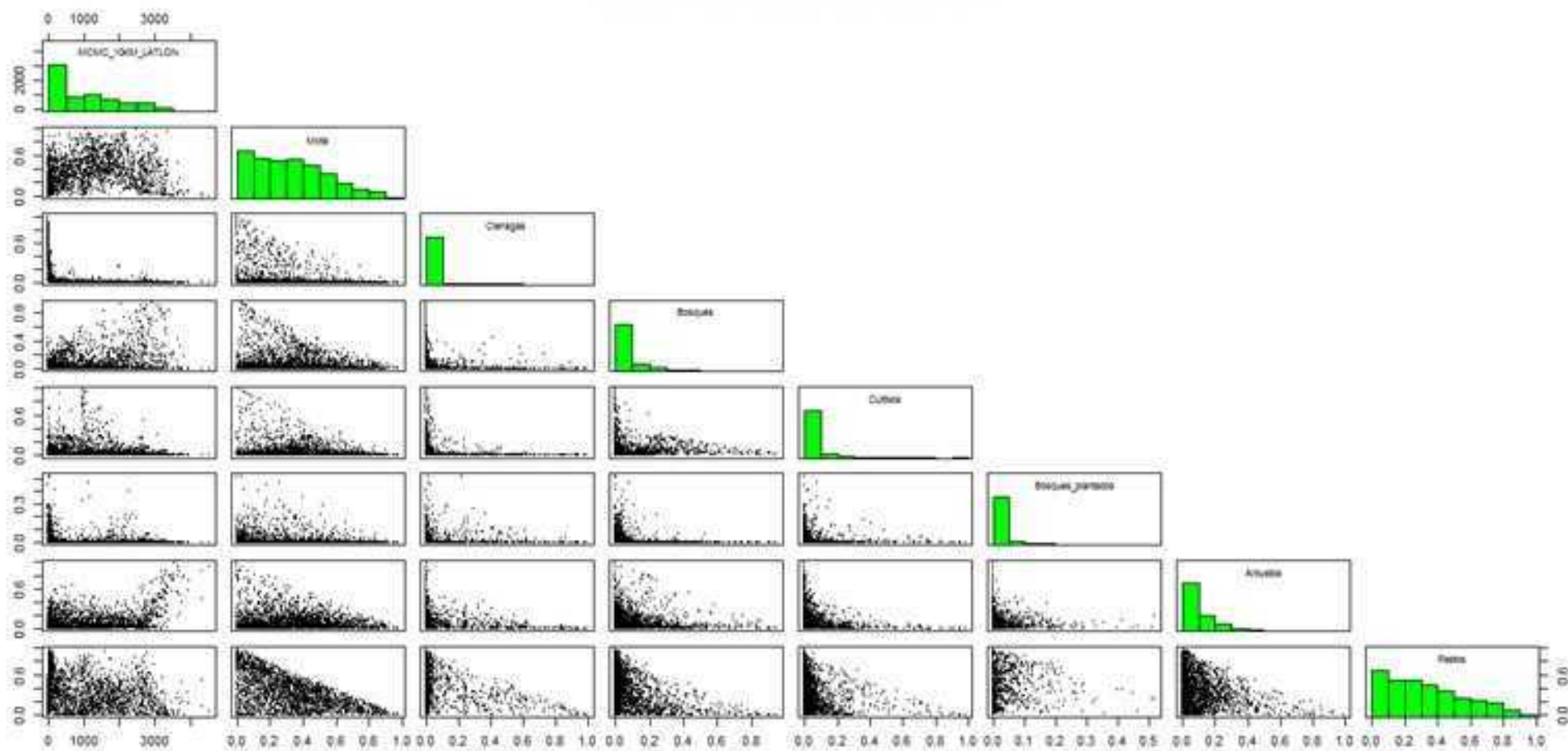


Figura 13. Gráficas de dispersión entre Elevación y porcentajes areales de cobertura, para escenario de coberturas

4. Metodología general

Con la información e insumos descritos en los capítulos anteriores y con la comprensión general del funcionamiento del modelo MESH y de sus necesidades al momento de implementarlo computacionalmente, se definió la metodología general del trabajo de tesis aquí reportado que permitió cumplir a cabalidad con los objetivos propuestos.

Es de remarcar que, en muchas ocasiones, las decisiones de modelación tomadas se basaron en los resultados de fases de modelación previas. Esto es especialmente cierto para las decisiones de modelación en la MCMC, cuyos planteamientos se basaron en los resultados de las simulaciones en la CRC.

A continuación se presenta de manera detallada esta metodología, haciendo hincapié en las razones consideradas para decidir entre las diversas opciones, sus implicaciones y los resultados requeridos.

4.1 Implementación de MESH en la cuenca del río Coello

La falta de conocimiento acerca de la implementación del modelo MESH en una cuenca tropical, como la MCMC, obligó a dar el primer paso de manera conservadora, simulando solo una de sus subcuencas. La cuenca del río Coello (CRC) fue escogida para este fin, debido al conocimiento que ya se tenía sobre la misma y a la amplia cantidad de datos con que se contaba en el marco del proyecto Earth2Observe.

La CRC se escogió por su tamaño medio (alrededor de 1580 km²) y por la diversidad de actividades económicas, coberturas, y pisos térmicos con los que cuenta (Cruz-Roa et al. 2017). Además, la CRC ha tenido análisis individuales de resultados de modelación en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia (Kaune et al. 2017; Rodriguez et al. 2017), por lo que podía contarse con información de comparación.

4.1.1 Datos de entrada

En la implementación de MESH en la CRC se recurrió a las mismas bases de datos posteriormente utilizadas en la implementación de la MCMC. La única diferencia fue el ajuste del dominio a los límites de la CRC.

En el caso de los datos meteorológicos se definió, aplicó y evaluó una metodología para escalar los datos diarios a datos cada 3 horas, con el fin de cumplir con los requerimientos

de MESH (que corre a un paso de tiempo de 30 minutos⁶). Con el paso de tiempo de tres horas, MESH automáticamente realiza una interpolación lineal de los forzamientos, consiguiendo un equilibrio entre la necesidad de contar con información intradiaria, el costo computacional asociado de generar esa información, y la incertidumbre asociada a esos valores, como ya se ha reportado en la literatura (Vormoor and Skaugen 2013).

La propuesta metodológica para el escalamiento temporal se muestra en la Tabla 3. Dadas las limitaciones de información intradiaria, se decidió utilizar información proveniente de la página *Water Cycle Integrator* (<https://wci.earth2observe.eu/>) del proyecto *Earth2Observe* (Schellekens et al. 2017). El análisis y comparación de estas bases de datos contra los valores diarios observados, arrojaron las siguientes conclusiones:

1. Los valores de presión atmosférica, humedad absoluta, y velocidad del viento, presentan variaciones alrededor del valor promedio diario, a lo largo del día
2. Los valores de Radiación de Onda Corta presentan un ciclo día-noche, siendo su valor igual a cero durante la noche, y máximo hace el mediodía en el trópico, cuando el sol alcanza su cenit.
3. Los valores de radiación de onda larga también presentan un ciclo día-noche. Sin embargo, durante la noche, el intercambio de radiación de onda corta entre la atmósfera y el suelo continúa, pero con valores más bajos que durante el día.
4. La variación de temperatura a través del día puede caracterizarse aproximadamente a partir de sus valores mínimos, máximos y medios. Al momento de la salida del sol (hacia las 6 A.M. en el trópico) se presenta una temperatura mínima, mientras que la temperatura máxima se presentará hacia el mediodía. Finalmente, la temperatura media parece presentarse hacia las 6 P.M.
5. La precipitación presenta patrones más bien aleatorios, Si bien pueden existir tendencias a producirse las lluvias en ciertas horas del día, estas tendencias no pueden considerarse patrones.

Estas consideraciones se tuvieron en cuenta al momento de definir la metodología de reescalamiento temporal. Si bien existen propuestas metodológicas para reescalamiento de datos de temperatura y precipitación (Vormoor and Skaugen 2013), estas requieren información intradiaria con el fin de obtener correlaciones aplicables a todo el dominio

⁶ a. La razón para el uso de 30 minutos como paso de tiempo es el uso que hace CLASS del modelo de fuerza restaurativa de Deardoff, así como de tres capas para representar el suelo. La forma como el modelo ajusta esta escala temporal a la escala espacial escogida es a través de valores paramétricos efectivos, es decir, valores que tienen en cuenta la escala espacial y temporal a la que simula el modelo, y que ajustan adecuadamente los flujos a las observaciones. En nuestro caso, el uso de una escala de 10 km, significa que todos los parámetros, empezando por los parámetros del suelo, son parámetros efectivos, que acoplan la escala espacial a la escala temporal, y permite obtener resultados físicamente posibles (Moene and Dam 2014).

espacial, por lo que no fueron tenidas en cuenta para este trabajo. Así mismo, más allá de las consideraciones anotadas anteriormente, no se encontró en la literatura un método para reescalar los demás datos meteorológicos.

Ahora bien, esta propuesta metodológica presenta algunas limitaciones, principalmente ligadas a la precipitación (cuyo valor diario se toma como valor intradiario, ver Tabla 3). Este tipo de reescalamiento, aunque simple y de rápida implementación, puede provocar disminuciones en los valores simulados de escurrimiento, y en los valores simulados de caudal diario, pues estas variables son parcialmente dependientes de la intensidad de precipitación; esto indica así mismo, que el análisis de eventos extremos no es posible de manera detallada con este modelo, hasta tanto no se mejore la representación intradiaria de las variables meteorológicas, en especial la precipitación (Vormoor and Skaugen 2013). Un análisis más detallado de la validación de la metodología se muestra en la pág. 138.

Tabla 3. Métodos de escalamiento temporal para pasar de datos diarios a datos cada 3 hr, para cada variable meteorológica analizada

Método de escalamiento temporal	Variable meteorológica
Uso de valor promedio diario como valores intradiarios de 3 horas	Precipitación Velocidad del viento Presión atmosférica Humedad específica
Uso de curva sintética a partir de valores de temperatura mínima, media y máxima	Temperatura
Uso de factores de afectación según ciclo diurno-nocturno. Los factores se calcularon a partir de datos del reanálisis	Radiación de onda larga Radiación de onda corta

4.1.2 Configuración general del modelo

Se mantuvo la escala espacial propuesta de 0.1° (ver pág. 35 y pág. 39). Toda la información, tanto meteorológica como de la red de drenaje, fue tratada a esta escala.

Adicionalmente, se utilizaron diversas opciones del modelo MESH, con el fin de definir la mejor configuración para simular la hidrología de la MCMC. Las opciones escogidas para implementar MESH en la CRC fueron:

1. Con y sin simulación del interflujo: este primer experimento se realizó para conocer la cantidad de parámetros a utilizar en la calibración automática.
2. Con simulación de interflujo y módulos antiguo y nuevo de tránsito: la finalidad de estos experimentos fue la de investigar acerca del mejor módulo de tránsito para simular la hidrología de la zona.

3. Con y sin utilización del módulo de flujo base: También se hicieron pruebas para definir la necesidad o no de utilizar el módulo de flujo base, implementado en el modelo MESH.

Estos experimentos se realizaron para definir la mejor configuración del modelo en cuanto a eficiencia computacional y fidelidad de los resultados, para escoger la mejor metodología de configuración, e implementar más rápidamente el modelo MESH en la MCMC en la siguiente etapa.

4.1.3 Implementación computacional de los GRU

Se probaron tres configuraciones generales para capturar la heterogeneidad de la superficie terrestre (El GRU es la forma de representar la heterogeneidad espacial de una manera más eficiente computacionalmente, ver pág. 18 para una discusión más detallada sobre el GRU):

1. Un solo GRU para todas las celdas, cada celda guarda el mismo porcentaje de coberturas aceptadas por MESH.
2. Cuatro GRU basados en la elevación de la celda, cada GRU presenta diferentes porcentajes de coberturas aceptadas por MESH, de acuerdo con la definición realizada a través del SIG, pero en una celda solo puede existir un GRU (ver Tabla 4)
3. Siete GRU basados en coberturas vegetales, cada GRU puede presentar diferentes porcentajes de coberturas aceptadas por MESH de acuerdo con la definición realizada a través del SIG y en cada celda pueden existir varios GRU (aproximación por subrejilla) (ver Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de GRU según elevación y cobertura para la CRC.

GRU por Elevación	>3000 m.s.n.m.		3000-2000 m.s.n.m.		2000-1000 m.s.n.m.		<1000 m.s.n.m.	
GRU por Cobertura	Zonas mixtas	Ciénagas	Bosques	Cultivos	Bosques plantados	Arbustos	Pastos	

Como se observa en la Tabla 4, cada una de las aproximaciones de definición de GRU significa un incremento en la complejidad adicional del modelo MESH en la representación de la heterogeneidad de la superficie terrestre. Los experimentos se iniciaron con la aproximación más simple, que ajusta parámetros únicos para todas las celdas, pasando por una aproximación intermedia que agrupa cuatro GRU y da un conjunto de parámetros para cada celda, hasta una aproximación en forma de mosaico, que subdivide las celdas en GRU, hasta un máximo de siete, lo que arroja hasta siete conjuntos de parámetros por celda.

Cada implementación implica ventajas y desventajas que debieron ser analizadas a la luz de los resultados obtenidos en la CRC. En general, a medida que se complejiza la representación, el modelo se vuelve computacionalmente más costoso, pero una representación más cercana a la realidad mejora los resultados de la simulación, si bien es cierto que existen límites para esta mejoría en los resultados, e incluso se puede presentar una degradación de los mismos.

Asimismo, se utilizó de manera general la configuración básica del modelo MESH para profundidades de las capas del suelo, es decir, uso de tres capas hasta una profundidad de 2.1 m (ver pág. 20). Esta configuración también se usó para la MCMC.

4.1.4 Calibración automática

La calibración automática del modelo utilizó el algoritmo PA-DDS (Pareto-Archived DDS) con tres funciones objetivo (Nash Sutcliffe Efficiency, Log Nash Sutcliffe Efficiency y bias), calculadas para la CRC a partir de datos observados y simulados en la estación hidrométrica Payandé (21217070). Si bien existe una estación hidrológica aguas arriba (Pte Carretera, 21217120), esta no fue considerada dentro del proceso de calibración, sino dentro del proceso de validación, actuando como punto ciego.

Las ecuaciones de las funciones objetivo escogidas para esta etapa fueron:

1. Nash Sutcliffe Efficiency (Nash and Sutcliffe 1970) : $NSE = 1 - \frac{\sum (Obs_i - sim_i)^2}{\sum (Obs_i - \bar{Obs})^2}$
2. LogNSE (Davison et al. 2016) : $Ln(NSE) = 1 - \frac{\sum (\ln(Obs_i) - \ln(sim_i))^2}{\sum (\ln(Obs_i) - \ln(\bar{Obs}))^2}$
3. Bias (Haghnegahdar et al. 2014): $bias = abs\left(100 * \frac{\sum sim_i - Obs_i}{\sum Obs_i}\right)$

La utilización de estas tres funciones objetivo corresponde a la búsqueda de diferentes criterios dentro del proceso de calibración automática. Así, el valor del NSE da peso a los picos de caudal, el valor de Ln(NSE) da peso a los caudales bajos y el valor absoluto del bias da importancia al volumen total en el periodo de estudio.

Como regla general, se asumen valores aceptables para las métricas de NSE y Ln(NSE) cuando están por encima de 0, siendo satisfactorias por encima de 0.5 (con un óptimo de 1.0), mientras que para el caso del bias, se asume un valor aceptable si está por debajo de 25%, con un valor satisfactorio por debajo de 10% (con un óptimo de 0%) (Moriassi et al. 2007).

Asimismo, se definieron dos periodos de tiempo para las fases de calibración y validación, de acuerdo con las necesidades de un protocolo riguroso de modelación:

1. Periodo de calibración: correspondiente a los datos utilizados directamente en el cálculo de las funciones objetivo. El periodo va de 1981 a 2001.

2. Periodo de validación: correspondiente a datos que no fueron utilizados en el proceso de calibración, pero que permiten validar los resultados obtenidos. El periodo va de 2002 a 2011.

Los conjuntos de parámetros a calibrar también variaron, utilizando tres opciones generales que fueron probadas y comparadas, con el fin de obtener la mejor opción al momento de simular la MCMC:

1. El primer experimento solo utilizó parámetros del suelo y de flujo superficial.
2. El segundo experimento utilizó parámetros del suelo, de flujo superficial y de cobertura vegetal.
3. El tercer experimento utilizó parámetros del suelo, del flujo superficial, de cobertura vegetal y del tránsito.
4. El cuarto experimento, el de mayor cantidad de parámetros, utilizó parámetros del suelo, del flujo superficial, de cobertura, del tránsito y del flujo base (ver Tabla 5).

Tabla 5. Número de parámetros incluidos en el proceso de calibración, para el caso de 4 GRU consideradas en la CRC.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Parámetro	Límite inferior	Límite superior
Parámetros de flujo base por GRU*			Parámetros de flujo superficial por GRU°			Parámetros del suelo°°		
dg1	0.0	10.0	Mn1	0.01	0.9	sand1	10.0	80.0
dg2	0.0	10.0	Mn2	0.01	0.9	clay1	10.0	80.0
dg3	0.0	10.0	Mn3	0.01	0.9	sand2	10.0	80.0
dg4	0.0	10.0	Mn4	0.01	0.9	clay2	10.0	80.0
ag1	0.0	1.0	xslope1	0.01	0.5	sand3	10.0	80.0
ag2	0.0	1.0	xslope2	0.01	0.5	clay3	10.0	80.0
ag3	0.0	1.0	xslope3	0.01	0.5	sand4	10.0	80.0
ag4	0.0	1.0	xslope4	0.01	0.5	clay4	10.0	80.0
Parámetros de tránsito**			ks1	0.0	0.1	* El numeral indica correspondencia con el GRU (1 a 4) mientras que dg corresponde al parámetro de retardo y ag al parámetro de recesión (unidades de segundos y s ⁻¹) ** Coeficiente de Manning para tránsito. El numeral corresponde a los tipos de ríos (máximo 5 dentro del modelo) en unidades de s /m ^{1/3} ***Root equivale a profundidad de las raíces (en m), mientras que lanzo equivale al log natural de la longitud de rugosidad e la es el área foliar. nl se refiere a plantas tipo coníferas, bl a plantas de hoja plana.		
WFR2_1	0.3	2.0	ks2	0.0	0.1			
Parámetros de cobertura vegetal***			ks3	0.0	0.1			
Root_nl	0.1	3.5	ks4	0.0	0.1			
Root_bl	0.1	4.1	sdep1	0.8	4.1			
lanzo_nl	0.0	1.0	sdep2	0.8	4.1			
lanzo_bl	0.3	1.7	sdep3	0.8	4.1			
la_nl	1.0	3.0	sdep4	0.8	4.1			
la_bl	5.0	15.0	En total, se cuentan con 39 parámetros en el proceso de calibración					

° Los numerales de los parámetros de flujo superficial se refieren al GRU. Mn corresponde a la rugosidad superficial de Manning en s /m^{1/3}, xslope a la pendiente efectiva dentro del GRU, ks a la conductividad saturada en la superficie en m/s, sdep a la profundidad permeable dentro de la columna de suelo en m.

°° Los numerales de los parámetros del suelo se refieren al GRU. sand se refiere al porcentaje de arenas y clay al porcentaje de arcillas en el suelo.

Para la calibración del modelo en la Cuenca del Río Coello, el problema inverso, para 4 GRU, incluía 39 parámetros y tres funciones objetivo. De acuerdo a las necesidades de muestreo por medio de Monte Carlo, (Beven and Binley 1992; Duque et al. 2017), se necesitan entre 60.000 y 100.000, mientras que el uso del algoritmo Shuffle Complex Evolution o SCE (Duan et al. 1993), hay antecedentes del uso de 250.000 iteraciones para problemas inversos con 37 parámetros. El costo computacional de utilizar 100.000 iteraciones para este caso, utilizando una aproximación de Monte Carlo, o el SCE, llevaría a necesitar 23 días, lo que a todas luces es un costo bastante alto, para una implementación piloto. Por eso, se decidió utilizar desde un comienzo el algoritmo PA-DDS (Asadzadeh and Tolson 2013) (ver pág. 26) para probar su eficiencia, conocer su funcionamiento, y verificar su implementación, con entre 3.000 a 10.000 iteraciones, pues existen referencias de que este rango de iteraciones es suficiente para alcanzar resultados satisfactorios.

Se hace notar aquí brevemente las dimensiones del problema de optimización: Al menos 39 parámetros de calibración, de los cuales se desconoce su sensibilidad paramétrica para las condiciones tropicales de la CRC, lo que imposibilita jerarquizar la importancia de los parámetros, y facilitar la optimización. Adicionalmente, con la escogencia de una aproximación multiobjetivo, se debe encontrar el frente de Pareto para tres funciones objetivo, lo que complica aún más la optimización.

En el caso de la CRC, el costo computacional de simular alrededor de 30 años de datos es de 20 segundos, lo que permite realizar una gran cantidad de iteraciones para optimizar el modelo. Sin embargo, calibrar los valores paramétricos para la MCMC, significa enfrentar un problema de optimización de 57 parámetros, dos funciones objetivo, y 22 minutos de corrida para 3 años de datos. Resolver este problema no podía ser igual para la CRC que para la MCMC y entonces, las decisiones tomadas para resolverlo se discuten en los siguientes capítulos.

A manera de resumen, en la Figura 14 se muestra un diagrama con los pasos seguidos para implementar MESH en la CRC y definir la metodología general para la MCMC.

4.2 Implementación de MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca

4.2.1 Datos de entrada

Se utilizaron las bases de datos construidas para el dominio de la MCMC. Asimismo, se conservó la escala espacial de aproximadamente 10 km (ver pág. 35 y pág. 39) y se reescalaron los datos diarios a tres horas, siguiendo la metodología propuesta para la CRC (ver pág. 55).

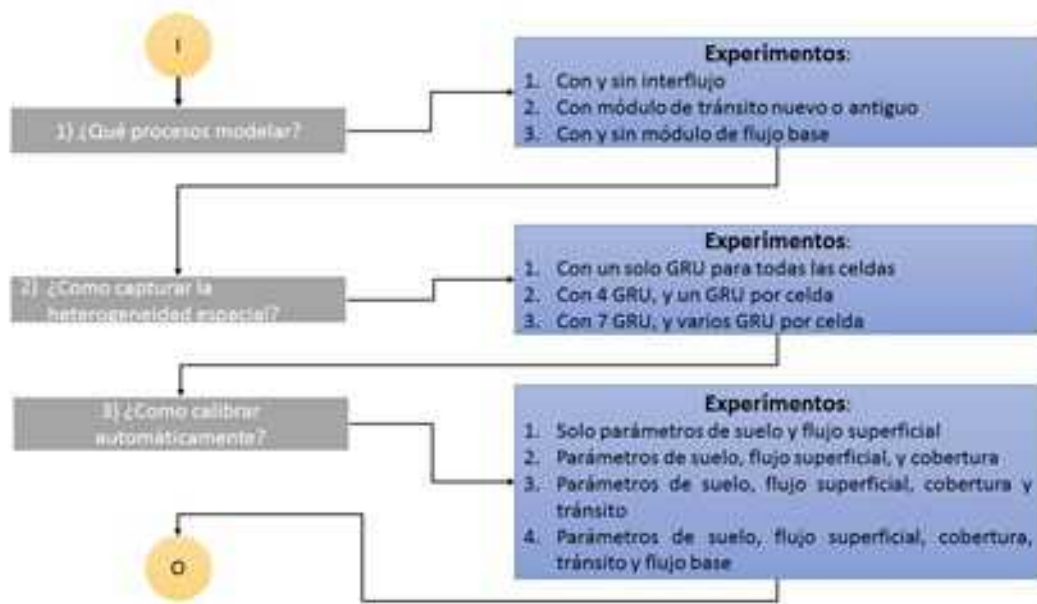


Figura 14. Diagrama de la metodología seguida para implementar el modelo MESH en la Cuenca del río Coello (CRC).

4.2.2 Implementación computacional de los GRU

Dados los resultados de implementación en la CRC, se decidió utilizar la elevación como un clasificador primario del comportamiento hidrológico de cada celda. Sin embargo, debido a la complejidad de la MCMC frente a la subcuenca CRC, también se incluyó la cobertura vegetal como clasificador secundario. Bajo estos dos clasificadores, se obtuvieron 28 GRU para toda la MCMC. Sin embargo, por celda solamente podrían existir un máximo de 7 GRU, debido a la clasificación realizada; algunos de los parámetros fueron agrupados según su elevación o su cobertura vegetal, con el fin de disminuir el número de parámetros en el proceso de calibración (ver Tabla 6). Los parámetros que finalmente se seleccionaron para el proceso de calibración se muestran en la Tabla 7.

4.2.3 Configuración general del modelo

Debido a problemas con la implementación del algoritmo más reciente de tránsito en MESH, se decidió utilizar la versión anterior de WATROUTE (WF_ROUTE, ver pag. 24). Además, al igual que en el caso de la CRC, se utilizó el módulo de flujo base (ver pág. 20) y la versión 3.6 de CLASS (ver pág. 20), con su configuración de tres capas del suelo.

Tabla 6. Definición de GRU para la MCMC, a partir de clasificaciones de elevación y coberturas y selección de parámetros según característica del GRU.

Clasificación de GRU Elevación/Cobertura	Zonas mixtas	Ciénagas	Bosques	Cultivos	Bosques plantados	Arbustos	Pastos
5000-2500 m.s.n.m	- Parámetros del flujo base, textura del suelo y flujo superficial, se clasificaron según la elevación, por lo que su numeral va de 1 a 4. - Parámetros de coberturas vegetales se clasificaron según coberturas. Sin embargo, se asume que los parámetros de Zonas Mixtas se comparten con Bosques, Cultivos y Pastos						
2500-1200 m.s.n.m							
1200-400 m.s.n.m							
400-0 m.s.n.m							

Tabla 7. Parámetros incluidos en el proceso de calibración, para la Macro Cuenca Magdalena Cauca.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Parámetro	Límite inferior	Límite superior
Parámetros de flujo base por GRU*			Parámetros de flujo superficial por GRU°			Parámetros del suelo°°		
dg1	0.0	10.0	Mn1	0.01	0.9	sand1	10.0	80.0
dg2	0.0	10.0	Mn2	0.01	0.9	clay1	10.0	80.0
dg3	0.0	10.0	Mn3	0.01	0.9	sand2	10.0	80.0
dg4	0.0	10.0	Mn4	0.01	0.9	clay2	10.0	80.0
ag1	0.0	1.0	xslope1	0.01	0.5	sand3	10.0	80.0
ag2	0.0	1.0	xslope2	0.01	0.5	clay3	10.0	80.0
ag3	0.0	1.0	xslope3	0.01	0.5	sand4	10.0	80.0
ag4	0.0	1.0	xslope4	0.01	0.5	clay4	10.0	80.0
Parámetros de tránsito**			ks1	0.0	0.1	* El numeral indica correspondencia con el GRU (1 a 4) mientras que dg corresponde al parámetro de retardo y ag al parámetro de recesión (unidades de segundos y s ⁻¹) ** Coeficiente de Manning para tránsito. El numeral corresponde a los tipos de ríos (máximo 5 dentro del modelo, 2 para este caso) en unidades de s /m ^{1/3} ***Root equivale a profundidad de las raíces (en m), mientras que lanzo equivale al log natural de la longitud de rugosidad, e la es el área foliar. nl se refiere a plantas tipo coníferas, bl a plantas de hoja plana. Br se refiere a árboles de hojas planas, cr a cultivos, gr a pastos. El número indica su pertenencia a una de las 7 clasificaciones de cobertura		
WFR2_1	0.3	2.0	ks2	0.0	0.1			
WFR2_1	0.3	2.0	ks3	0.0	0.1			
Parámetros de cobertura vegetal***			ks4	0.0	0.1			
Root_1_br	0.8	10	sdep1	0.8	4.1	***Root equivale a profundidad de las raíces (en m), mientras que lanzo equivale al log natural de la longitud de rugosidad, e la es el área foliar. nl se refiere a plantas tipo coníferas, bl a plantas de hoja plana. Br se refiere a árboles de hojas planas, cr a cultivos, gr a pastos. El número indica su pertenencia a una de las 7 clasificaciones de cobertura		
Root_1_cr, Root_1_gr, Root_2, Root_6, Root_7			sdep2	0.8	4.1			
Lanzo_1_br	-4.0	2.0	sdep3	0.8	4.1			
Lanzo_1_cr, Lanzo_1_gr, Lanzo_1_ur, Lanzo_2, Lanzo_6, Lanzo_7			sdep4	0.8	4.1			
La_1_br	1.0	13.0	DD1	1.0	100.0	° Los numerales de los parámetros de flujo superficial se refieren al GRU. Mn corresponde a la rugosidad superficial de Manning en s /m ^{1/3} , xslope a la pendiente efectiva dentro del GRU, ks a la conductividad hidráulica saturada en la superficie en m/s, sdep a la profundidad permeable dentro de la columna de suelo en m, DD la densidad de drenaje en km/km ² . °° Los numerales de los parámetros del suelo se refieren al GRU. sand se refiere al porcentaje de arenas y clay al porcentaje de arcillas en el suelo.		
La_1_cr, La_1_gr, La_2, La_6, La_7			DD2	1.0	100.0			
En total, se cuentan con 57 parámetros en el proceso de calibración			DD3	1.0	100.0			
			DD4	1.0	100.0			

Debido a la falta de información, no fue posible realizar la implementación de embalses, así como de caudales laterales por la existencia de ciénagas; sin embargo, es posible

pensar en un acoplamiento utilizando modelos propuestos para este tipo de áreas (Díaz-Granados et al. 2001). Este tipo de implementaciones requieren de una mayor cantidad de información y un análisis juicioso en su calibración y posterior evaluación, y se dejan por el momento como una posible futura línea de investigación. Esto también aplica para las intervenciones progresivas sobre la cobertura vegetal en la MCMC

Las razones para no incluir información de embalses, se debe esencialmente a la dificultad para obtener información, principalmente de caudales, o por medio de reglas de operación, que permita su inclusión en la modelación de MESH. Sobre la cobertura de los suelos, se utilizó información de coberturas del año 2008, lo que sin duda no tiene en cuenta los cambios progresivos que ha sufrido la MCMC en el transcurso del periodo de estudio, y una vez más, esto se debió a la inexistencia de información confiable sobre el desarrollo de estos cambios. Sin embargo, su inclusión es posible en futuros ejercicios, e incluso debe ser alentada.

4.3 Calibración de un modelo H-LSS no parsimonioso de gran escala

En la actualidad no existe una metodología definida para lograr calibrar un modelo no parsimonioso de escala regional, aunque se ha trabajado en diversos frentes para enfrentar este problema (Mizukami et al. 2017).

El espacio paramétrico del presente ejercicio de calibración tiene la siguiente complejidad: se incluyen 57 parámetros para calibración, cada uno con un rango de valores relativamente amplio basado en información secundaria proveniente de bases de datos gubernamentales (IDEAM, IGAC) y estudios e información proveniente de otras implementaciones de MESH y otros modelos globales y regionales. Además, el proceso de calibración utiliza una aproximación con dos funciones objetivo, producto de promedios ponderados en cierta cantidad de puntos, lo que implica el cálculo del frente de Pareto. La precisión de los valores paramétricos tampoco se conoce de antemano, por lo que se asume que una función de probabilidad uniforme representa la probabilidad de escoger un valor paramétrico que arroje un buen valor de eficiencia del modelo. Finalmente, el tiempo de corrida de 3 años de datos, en el cluster PLATO (<https://www.usask.ca/ict/services/research-technologies/advanced-computing/plato/index.php>) de la *University of Saskatchewan* (lo que permitió un poder de cálculo superior al de un computador de escritorio, con acceso a 48 nodos), tomaba alrededor de 22 minutos.

En términos prácticos, la complejidad del problema inverso y este tiempo de cálculo imposibilitaba la utilización de varias metodologías ampliamente utilizadas en hidrología (como GLUE, (Beven and Binley 1992; Duque et al. 2017), pues la literatura muestra que se necesitan entre 60.000 y 100.000 iteraciones en promedio, o SCE (Duan et al. 1993)), pues existen antecedentes del uso de SCE en un problema inverso con 37 parámetros, donde se necesitaron de 250.000 iteraciones. La solución intermedia para obviar estos problemas fue utilizar PA-DDS (Asadzadeh and Tolson 2013) (ver pág. 26) como algoritmo

de calibración automática y restringir las simulaciones a unos cuantos años antes de verificar los resultados en los periodos establecidos de calibración y validación en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia (1981-2000 y 2001-2011 respectivamente). La razón para realizar las campañas de calibración es que, aún con el uso de PA-DDS, se recomiendan entre 3.000 y 10.000 iteraciones para considerar que el algoritmo tiene suficientes iteraciones, lo cual sigue tomando mucho tiempo en el presente caso. Luego de cada campaña de calibración (8 en total), se debía verificar que efectivamente aumentaba su rendimiento en términos de las funciones objetivos escogidas: Nash Sutcliffe Efficiency (NSE) y bias (ver pág. 53), lo cual conllevaba a restringir o ampliar los rangos paramétricos para la siguiente campaña.

Se escogió realizar una calibración de tipo global (Haghnegahdar et al. 2014), es decir, se utilizaron promedios ponderados de funciones objetivos de diversos puntos de control, con el fin de mejorar al mismo tiempo, el promedio de las funciones objetivos dentro de la MCMC. Así mismo, se dejaron 4 estaciones para realizar validaciones en puntos ciegos.

Para simplificar un poco el proceso de calibración, se decidió utilizar solo dos funciones objetivo (NSE y bias), y se escogió un subgrupo de 50 estaciones del total de 88 existentes dentro de la MCMC, cuyas cuencas presentaban poca o nula regulación, para llevar a cabo el proceso de calibración global. Antes de cada campaña de calibración, se escogía al azar un número de estaciones dentro del subgrupo de 54, las cuales se utilizaban en el cálculo de las funciones objetivo ponderadas (28 estaciones para NSE, 18 para bias). El cálculo del bias era un promedio ponderado por área de la estación, mientras que el cálculo del NSE era un promedio simple

Además, debido a las restricciones en el costo computacional, se decidió utilizar periodos de 3 años, utilizando el primer año como calentamiento y los otros dos para calibración. Estos periodos de calibración cambiaron para cada campaña, con el fin de obtener valores de parámetros que funcionaron bajo diversos conjuntos datos de entrada.

Las comparaciones finales utilizaron el periodo 1980 como periodo de calentamiento, el periodo 1981-2001 como periodo de calibración, y 2001-2011 como periodo de validación. Las estaciones escogidas dentro del subgrupo de calibración, así como su participación en cada una de las campañas de calibración, o su utilización como punto ciego en el proceso de validación, se presentan en la pág. 147.

4.4 Experimentos bajo escenarios de cambio climático y en el uso del suelo

Como se ha venido remarcando, una de las ventajas de los modelos LSS es su versatilidad para ser utilizados en el análisis de escenarios, debido a la utilización de parámetros físicos cuyos valores pueden ser asociados a elementos cambiantes en el ambiente.

Tabla 8. Características de la calibración por campañas.

Campaña	No. estaciones para cálculo de Nash Sutcliffe Efficiency (NSE)*	No. estaciones para cálculo del bias*	Periodo de tiempo
1**	28	18	1980-1981-1983
2**	28	18	1980-1981-1983
3**	28	18	1989-1990-1991
4	28	18	1994-1995-1996
5	28	18	1989-1990-1991
6	28	18	1989-1990-1991
7	28	18	1992-1993-1994
8	28	18	1992-1993-1994
* Las estaciones utilizadas en el proceso de calibración variaron de una campaña a otra, escogiendo de un grupo de 54 estaciones, pero se conservó el mismo número de estaciones por campaña			
** Los resultados de las campañas 1, 2 y 3 se tomaron como si hubiesen sido una sola campaña			

Por esta razón, y con el fin de verificar los posibles efectos que el cambio climático y los cambios en el uso del suelo pueden tener sobre la hidrología de la MCMC, se decidió correr una serie de experimentos adicionales con el modelo calibrado y validado. Para tal fin, a partir de los escenarios de cambio climático (cinco en total) y un escenario de cambio en el uso del suelo, se configuraron 10 experimentos adicionales:

- Un escenario base (sin cambio climático ni cambio en el uso del suelo), correspondiente a los años 1995 – 2006.
- Cuatro escenarios con efectos de cambio climático (cada escenario se diferencia por el camino representativo de concentración, RCP, por sus siglas en inglés, utilizado para correr los Modelos de Circulación Global) (IDEAM 2015).
- Un escenario sin efectos de cambio climático, pero con efectos de cambio en el uso del suelo.
- Cuatro escenarios que combinan los efectos de cambio climático y el escenario de cambio en la cobertura del suelo.

En total se realizaron 10 experimentos de comparación bajo diversos escenarios. Las razones para escoger solamente 12 años de simulación en estos experimentos, años 1995 a 2006, son dos: la primera tiene que ver con el costo computacional del modelo. La segunda, como se observa en la Figura 15, entre los años escogidos se encuentran años secos, años húmedos y años promedio, lo que facilita el análisis de fenómenos exacerbados por cambios en el clima o en la cobertura vegetal, respecto a la línea base.

Los códigos utilizados en el marco del presente trabajo de tesis, para los experimentos de cambio climático y cambio en el uso del suelo, se muestran en Tabla 9.

Tabla 9. Códigos de escenarios de experimentos bajo escenarios de cambio climático y de cambio en la cobertura vegetal en la MCMC.

Escenario de cambio climático <u>sin</u> cambio en cobertura del suelo	Código en el marco de la tesis	Escenario de cambio climático <u>con</u> cambio en cobertura del suelo	Código en el marco de la tesis
Línea base (1995-2006)	Lu0cc0	Línea base (1995-2006)	Lu1cc0
RCP 2.6	Lu0cc1	RCP 2.6	Lu1cc1
RCP 4.5	Lu0cc2	RCP 4.5	Lu1cc2
RCP 6.5	Lu0cc3	RCP 6.5	Lu1cc3
RCP 8.5	Lu0cc4	RCP 8.5	Lu1cc4

Para investigar los efectos combinados del cambio climático y de cambios en la cobertura vegetal se realizó una comparación de tres variables hidrológicas importantes: la evapotranspiración, por ser esta variable de primordial importancia en los balances hídrico y energético, la humedad de la primera capa del suelo, por su importancia en el mantenimiento de la cobertura vegetal y el caudal, por ser esta una respuesta integrada de la cuenca a los cambios de los diferentes escenarios.

Con este propósito, debe recordarse la importancia de la evapotranspiración y de la humedad del suelo, como componentes del agua verde (flujos verticales de agua y almacenamientos), así como la de los caudales, como componente del agua azul (flujos horizontales), por estar estas variables directamente implicadas en la sustentación de la vida vegetal y de los ecosistemas en general, en concordancia con lo expuesto en el Estudio Nacional del Agua 2014, ENA-2014 (IDEAM 2014). Este componente teórico, incluido en el ENA-2014, determinó la escogencia de las variables hidrológicas a analizar. A modo de resumen, en la Figura 16 se presenta la metodología utilizada para la implementación del modelo MESH en la MCMC.

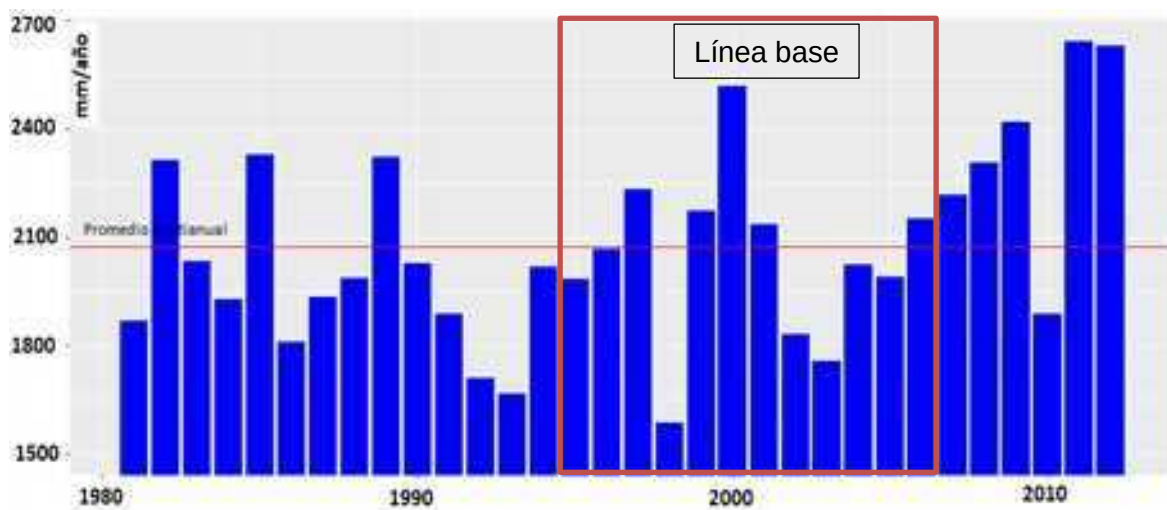


Figura 15. Precipitación media anual sobre la Macro Cuenca Magdalena Cauca, a partir de datos observados interpolados por el método de Kriging con deriva externa.

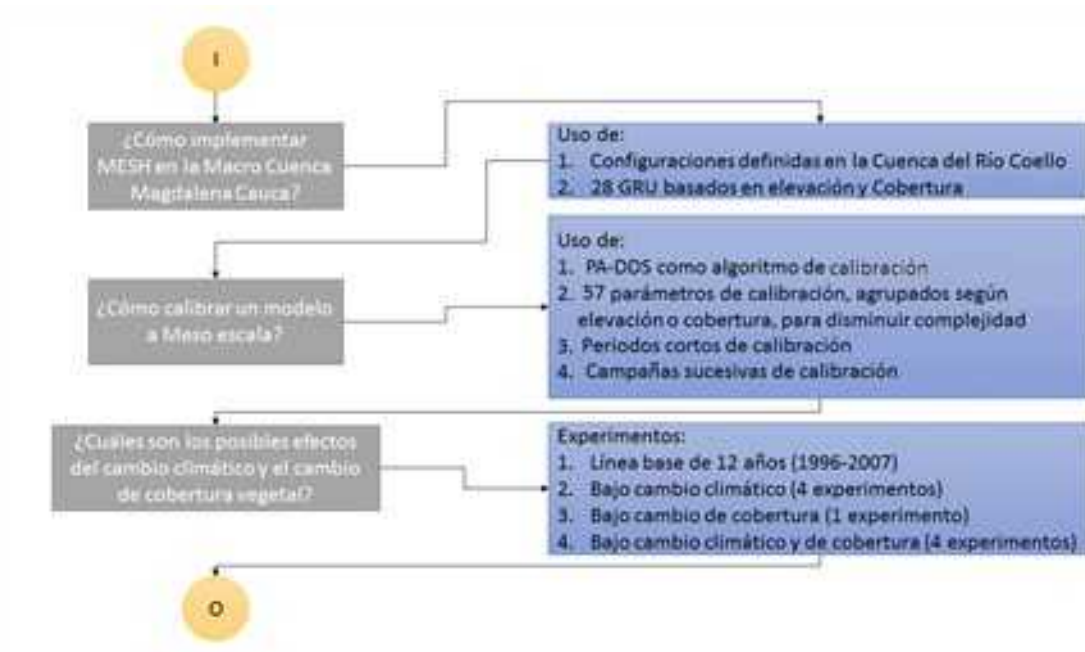


Figura 16. Diagrama de la metodología seguida para implementar MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca.

5.Resultados y discusión

Este capítulo presenta los resultados obtenidos tanto en la calibración-validación de la CRC, como en la calibración de la MCMC y su posterior análisis para investigar posibles efectos de cambio climático y de cambios en el uso del suelo en algunas de las variables del ciclo hidrológico.

En el caso de la calibración de MESH sobre la CRC, se hace especial énfasis en las conclusiones obtenidas, tanto para posteriores fases de calibración en la misma subcuenca, como en la MCMC.

Para el caso de la MCMC, el análisis se enfoca en el rendimiento general del modelo luego de las campañas de calibración y en los resultados obtenidos sobre diferentes puntos en el espacio, utilizando parámetros optimizados y diferentes configuraciones del modelo.

Igualmente, el análisis de los posibles efectos de cambio climático se centra principalmente en cambios en caudal, evapotranspiración y humedad de la primera capa del suelo.

Finalmente, un análisis del tratamiento metodológico de la incertidumbre se presenta para sustentar la fiabilidad de los resultados.

5.1 Resultados de la implementación de MESH en la CRC

5.1.1 Primera aproximación: definición de una estrategia de modelación

La primera aproximación en la implementación del modelo se realizó con el propósito de responder tres preguntas de suma importancia en los posteriores pasos de modelación: ¿Qué módulos de simulación deben ser incluidos en la configuración del modelo? ¿Qué parámetros del modelo computacional escogido deben ser incluidos dentro de la calibración automática? y ¿Cómo debiera ser representada la heterogeneidad espacial en el modelo?

Para tal fin, se realizaron diversos experimentos de calibración dentro de un marco más flexible, es decir, utilizando menos años de información, sin realización del proceso de validación, con el fin de proponer opciones de configuración básicas, antes de realizar un

proceso de calibración riguroso, es decir, un proceso utilizando un año de calentamiento, veinte años de calibración y diez de validación.

Estos experimentos incluyeron calibración con una sola función objetivo, con diferentes números de parámetros y con diferentes módulos de simulación. Asimismo, la representación de la heterogeneidad espacial se hizo utilizando un GRU, cuatro GRU basados en la elevación y siete GRU basados en la cobertura vegetal.

También se probaron diversas métricas como funciones objetivo: se seleccionaron Nash Sutcliffe Efficiency (NSE), bias, y logaritmo de Nash Sutcliffe Efficiency (Log(NSE)). Sin embargo, el valor del NSE y del bias fueron al final las métricas seleccionadas para obtener conclusiones acerca de la efectividad de las diversas configuraciones utilizadas. Los resultados de estos experimentos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Experimentos iniciales en la CRC, simulación diaria de caudales en la estación Payandé.

No. GRU	No. Parámetros	NSE	Bias (%)	Interflujo	Flujo base	Función objetivo	Años en calibración
1	12	-3457,09	33,48	Si	No	NSE	3
1	12	-6,24	36,16	Si	Si	NSE	3
4	16	-0,51	59,61	No	No	NSE	2
4	16	-1,03	71,59	No	Si	Log(NSE)	2
4	23	-0,91	61,56	No	Si	Log(NSE)	2
4	23	0,35	14,7	Si	Si	Log(NSE)	2
4	39	0,37	18,46	Si	Si	Log(NSE)	2
4	39	0,29	9,6	Si	Si	Multiobj.	5
7	69	-0,28	26,69	Si	Si	Multiobj.	5

¿Qué módulos incluir en la configuración del modelo?: Para definir los módulos a tener en cuenta dentro de la configuración final del modelo, se utilizó como criterio de definición la inclusión, o no, del módulo de interflujo completo, es decir, simulación de flujo superficial, interflujo, y flujo por debajo del nivel freático dentro de la columna de suelo, así como la utilización de un módulo de flujo base destinado a simular el intercambio entre la columna de suelo y un acuífero superficial.

Si bien puede parecer extraña esta pregunta, su propósito no era otro que entender bien la estructura del modelo MESH, comprender las implicaciones de cada uno de sus módulos principales, y entender de una manera razonable los resultados de la calibración-validación rigurosa.

Así mismo, este procedimiento buscaba representar de manera acertada en MESH los procesos dominantes dentro de la cuenca, a saber, saturación rápida y flujos rápidos en zonas montañosas de alta pendiente, y aporte de aguas subterránea en zonas de baja pendiente.

Sobre la inclusión del módulo de flujo base, sin el uso del módulo de flujo base, el modelo MESH simplemente agrega al canal de drenaje el agua que llegue al fondo de la columna de suelo. Sin embargo, al analizar los registros históricos para la cuenca del río Coello, se observó que en época de estiaje los caudales no descendían sino hasta cierto valor. Esto llevó a sospechar que la inclusión de un almacenamiento adicional que simulara la interacción con acuíferos profundos podía mejorar los resultados de simulación

De acuerdo con los resultados contenidos en la Tabla 10, mediante la inclusión del módulo de interflujo y del módulo de flujo base, los cuales permiten describir de mejor forma la hidrología tanto de la CRC, como de la MCMC, se obtienen mejores resultados, en cuanto a valores de NSE.

En cuanto al bias, la incorporación de estos dos módulos genera mejoras incluso mayores. Por ejemplo, para el caso de los experimentos con un solo GRU, el uso del módulo de flujo base mejora sustancialmente el valor del NSE, con un leve deterioro del valor del bias, mientras que el uso combinado de interflujo y flujo base, para el caso de cuatro GRU permitió obtener valores de bias por debajo del 15% y valores de NSE por encima de 0.3, lo que estaría indicando una importancia relativa de los flujos base en épocas de estiaje dentro de la cuenca.

No se incluyeron comparaciones entre los módulos de tránsito RTE y WF_ROUTE, pues los principios físicos y matemáticos de cada módulo son muy parecidos.

¿Cómo capturar la heterogeneidad espacial?: El criterio para definir la mejor forma de representar computacionalmente la heterogeneidad espacial en la CRC fue el número de GRU utilizados en la configuración del modelo.

Como se observa en la Tabla 10, el uso de un modelo con un GRU no dio buenos resultados, debido probablemente a su simplicidad (pese a ser una cuenca relativamente pequeña), por lo que fue descartado para su implementación posterior.

Los mejores resultados se obtuvieron con el modelo con cuatro GRU basados en elevación, en contraposición con el modelo de siete GRU basados en cobertura y utilización de la configuración en mosaico (varios GRU por celda), cuyo rendimiento fue más bajo, pese a su mayor complejidad.

¿Cómo calibrar automáticamente?: Para definir la configuración general del proceso de calibración automática, se tuvieron en cuenta dos criterios de definición: el número de parámetros a incluir dentro del proceso y la utilización de un algoritmo mono-objetivo o multi-objetivo.

Dadas las particularidades de la modelación de gran escala, se decidió desde el comienzo probar con la familia de algoritmos DDS, contenidos en Ostrich (ver pag. 27). Los experimentos preliminares mostraron que la aproximación multiobjetivo daba mejores resultados, tanto del NSE como del bias.

Además, dada la gran incertidumbre en los valores paramétricos sugeridos en la literatura para coberturas y suelos tropicales, la mejor opción era tener en cuenta la mayor cantidad de parámetros (39 para el caso de cuatro GRU). Sin embargo, los bajos valores de NSE y bias para siete GRU marcaban un límite: era posible obtener bajos rendimientos pese a incluir una gran cantidad de parámetros, probablemente debido a problemas de equifinalidad, o a un deterioro del rendimiento por complejizar en demasía el modelo (Overgaard et al. 2006).

La mejora en los valores de la función objetivo a medida que se incluyen más parámetros también significa mayores problemas por interacción paramétrica, lo que conlleva a su vez problemas asociados a la equifinalidad. Este problema implica que un modelo consigue buenos resultados luego del proceso de calibración, pero sus valores paramétricos no son únicos, sino que existen una gran cantidad de conjuntos de parámetros que ajustan el modelo a las observaciones (Clark et al. 2015b). Bajo esta situación se pueden presentar errores bajo condiciones no incluidas en la calibración, como eventos extremos, generando una gran incertidumbre en los resultados (Clark et al. 2015b).

Para intentar solucionar este problema, es posible utilizar varios de los puntos de calibración al mismo tiempo (calibración global), y utilizar información secundaria acerca de los parámetros. En el caso de la MCMC, como se verá más adelante, se hicieron calibraciones en varios puntos, y validaciones en puntos ciegos, con el fin de ver si el modelo calibrado se ajustaba a las condiciones observadas, y se utilizó información secundaria para ajustar el rango de los parámetros (cuando los parámetros presentaban un rango aplicable según las condiciones existentes en la MCMC). La literatura reporta que este tipo de aproximaciones escalonadas y con información secundaria pueden mejorar el rendimiento del modelo luego de la calibración-validación (Pechlivanidis y Arheimer 2015).

Estructuras retenidas para comparación: Teniendo en cuenta los análisis presentados en la Tabla 10, se decidieron probar de manera rigurosa tres configuraciones en el proceso de calibración de la CRC:

1. Cuatro GRU con módulos de interflujo y flujo base, uso del módulo de tránsito WF_ROUTE, algoritmo PA-DDS (multiobjetivo) y 39 parámetros en calibración.
2. Cuatro GRU con módulo de interflujo y flujo base, uso del módulo de tránsito RTE, algoritmo PA-DDS (multiobjetivo) y 39 parámetros en calibración
3. Siete GRU con módulos de interflujo y flujo base, uso del módulo de tránsito WF_ROUTE, algoritmo PA-DDS (multiobjetivo) y 69 parámetros en calibración

Los resultados de estos experimentos se discuten a continuación.

5.1.2 Proceso de calibración: resultados y conclusiones de configuración para un modelo de cuenca tropical de gran escala

Los resultados del proceso de calibración se presentan en la Figura 17. Experimentos en fase de calibración para la CRC (simulación de caudal a partir del conjunto de parámetros con los mejores resultados de las funciones objetivo), mientras que los resultados de la validación se presentan en la Figura 18. El proceso de calibración muestra algunas características interesantes:

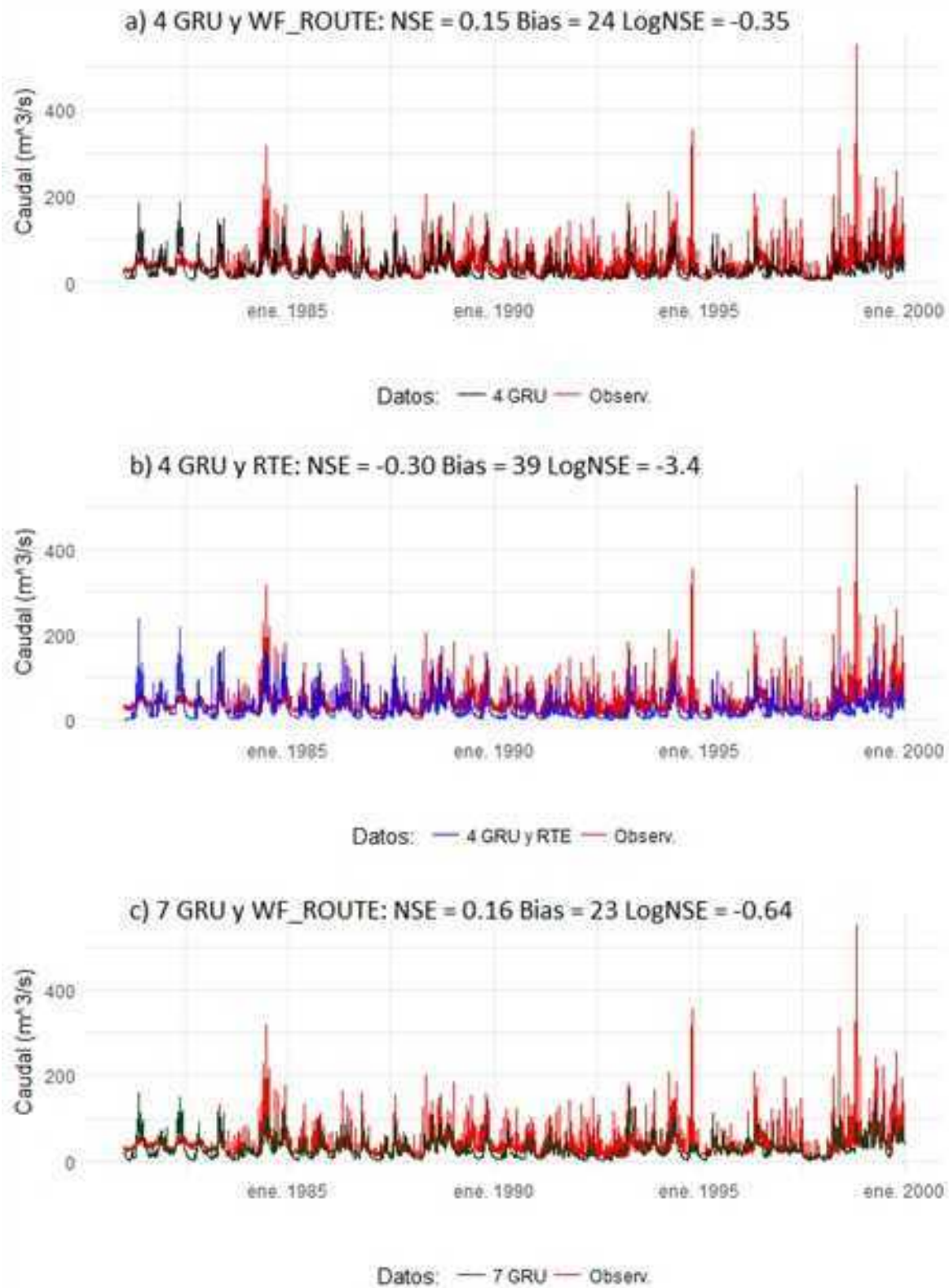


Figura 17. Experimentos en fase de calibración para la CRC

- Para este caso, la configuración con siete GRU (Figura 15-c) presenta resultados ligeramente superiores a los de la configuración con cuatro GRU (Figura 15-a) para el caso del NSE (0.16 frente a 0.15) y del bias (24% frente a 23%). Sin embargo, ninguno de los dos casos representa de manera acertada el flujo base (flujos bajos en época de estiaje), pese a la utilización del módulo de flujo base contenido en MESH, como se ven en los resultados de LogNSE (-0.64 para modelo con 7 GRU, Figura 15-c, y -0.35 para modelo con 4 GRU y WF_ROUTE, Figura 15-a).
- El caso de la configuración con cuatro GRU y uso del módulo RTE (nuevo módulo de tránsito, Figura 15-b) parece ser bastante extraña: pese a la semejanza en la parametrización de los dos módulos (ver pág. 24), los rendimientos son más bajos para la opción con el nuevo módulo de tránsito. Las razones para estos bajos resultados pueden ser debidas a una mejor representación física con el módulo de tránsito antiguo (lo cual no concuerda con la literatura, ver pág. 24), o a problemas de equifinalidad, al momento de realizar el proceso de calibración. Los indicios más fuertes apuntan hacia esta última razón, pues las configuraciones utilizadas son sumamente parecidas, y se sabe, también gracias a la literatura, que DDS (y por consecuencia PA-DDS) pueden no llegar a resultados aceptables, cayendo en las típicas trampas de “óptimos locales” o “resultados buenos” de acuerdo con la definición dada por Tolson & Shoemaker, 2008.

Por su parte, la posterior validación, con información no utilizada en el proceso de calibración (Figura 18), muestra hallazgos adicionales:

- El rendimiento del modelo con siete GRU (Figura 16-c) disminuye al ser comparado con los valores de las métricas de calibración, cayendo por debajo de 0 para el NSE. Sin embargo, mejora el resultado del bias (el bias cae por debajo del 10%) y mejora levemente la representación de caudales bajos (LogNSE de -0.43), probablemente por un mejor tratamiento de los parámetros asociados a la cobertura vegetal.
- El rendimiento del modelo con cuatro GRU y tránsito con WF_ROUTE (Figura 16-a) desmejora levemente para NSE y para el bias. Es posible aceptar, sin embargo, que el rendimiento se mantiene, debido a que los valores de NSE y de bias son muy similares entre los resultados de calibración y validación. Sin embargo, desmejora en la representación de caudales bajos (LogNSE de -0.72)
- El rendimiento del modelo con cuatro GRU y módulo de tránsito RTE se mantiene relativamente constante para las tres métricas, pero sus resultados son peores que al usar el módulo de tránsito WF_ROUTE.

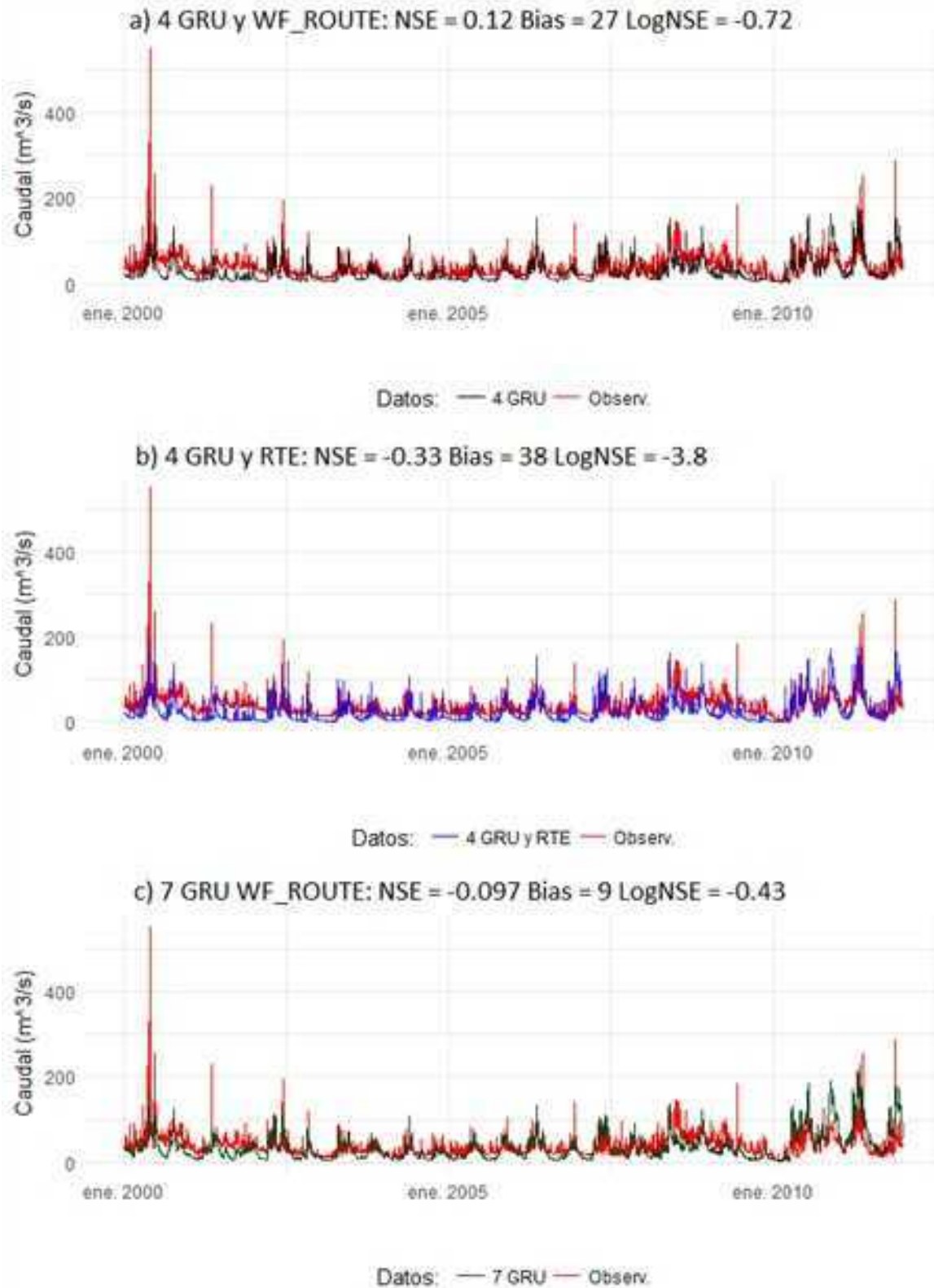


Figura 18. Experimentos en fase de validación para la CRC.

Estos resultados presentan al modelador una disyuntiva interesante para la implementación de MESH en la MCMC, pero de difícil respuesta: ¿Es mejor utilizar una aproximación con siete GRU, aumentando la dimensión del problema de calibración automática, pero exponiéndose a problemas de equifinalidad, o es preferible implementar una aproximación más simple de cuatro GRU, disminuyendo la dimensión del problema de calibración automática, pero exponiéndose a una sobre simplificación, que puede llegar a generar pobres resultados en la MCMC?

Debido a estas dificultades, se adoptó la metodología intermedia de implementación propuesta en la pág. 62. Esta implementación subdivide la MCMC en 28 GRU en configuración de mosaico (59 parámetros en total), pero agrupando un subgrupo de los parámetros según cuatro conjuntos clasificados por elevación (básicamente, todos los parámetros excepto aquellos ligados a la cobertura vegetal), mientras el subgrupo de parámetros ligados a la cobertura vegetal son clasificados según 7 conjuntos de coberturas⁷.

Adicionalmente, se decidió utilizar el algoritmo multiobjetivo PA-DDS utilizando valores de NSE promedio y de bias ponderado por el área de la zona aferente al punto de control. Para disminuir el número de funciones objetivo, dada la disponibilidad de puntos de concentración (ver pág. 35), se utilizaron estaciones de un subgrupo de 54 puntos con baja o nula regulación.

Igualmente, se presentaron complicaciones adicionales debido al costo computacional de correr 20 años de datos. Este costo, que rondaba alrededor de 3 horas, utilizando el cluster PLATO de la Universidad de Saskatchewan (ver <https://www.usask.ca/ict/services/research-technologies/advanced-computing/plato/index.php>), obligó a reducir las simulaciones a un año de calentamiento y dos de calibración, recortando el costo computacional a 20 minutos, para poder obtener una mayor cantidad de iteraciones. Pese a esto, las comparaciones en los periodos de calibración (1981-2000) y validación (2001-2011) permanecieron inalteradas.

Como punto final en los análisis realizados sobre las salidas del modelo en la CRC, se hizo un análisis preliminar y cualitativo de sensibilidad, utilizando el software MCAT (Wagener et al. 2001), y la aproximación por RSA (Hornberger and Spear 1981; Freer et al. 1996), utilizando una metodología basada en múltiples arranques de campañas de calibración de DDS (Tolson and Shoemaker 2008b).

Los resultados (ver pág. 219) muestran alta sensibilidad de los parámetros asociados a la cobertura vegetal, lo cual es coherente con lo expuesto por la literatura sobre el tema

⁷ La utilización de 28 GRU en mosaico significa una gran cantidad de parámetros a calibrar, para este caso en total fueron 59 parámetros. Sin embargo, la agrupación de estos parámetros en grupos, de acuerdo a elevación o cobertura, según el caso, permitió disminuir el número de parámetros que finalmente entraron en calibración.

5.2 Calibración del modelo MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca

Los resultados de las campañas de calibración del modelo MESH para la MCMC, mostraron resultados interesantes, como la interacción paramétrica de los módulos utilizados, y definieron la necesidad de escoger una de las campañas como resultado final, antes de proceder a correr los escenarios.

Dada la cantidad de puntos de calibración (estaciones hidrométricas en la MCMC) y con el fin de comparar de manera rápida los resultados entre campañas de calibración, se utilizaron dos tipos de gráficas. La primera corresponde al *Boxplot*, que presenta información de los cuartiles de los datos. La segunda corresponde a un diagrama tipo *Violin*, que presenta información acerca de la densidad de probabilidad de los valores.

Las dos gráficas fueron asociadas a un diagrama de dispersión de los valores del NSE, utilizando los resultados de los 88 puntos de control por campaña de calibración, los valores cuyo NSE está por encima de 0, y los valores cuyo NSE está por debajo de 0, con el fin de contar con un análisis más detallado acerca de las diferencias en el rendimiento del modelo entre las campañas.

No debe confundirse en este punto la presentación de las gráficas con 88 puntos de control, con el proceso de calibración, donde se utiliza un subgrupo escogido al azar de aquellas estaciones que no presentan regulación de su régimen hidrológico, y que corresponden a 50 estaciones. Si bien, a nivel computacional, no se tienen en cuenta todas las estaciones, y por lo tanto el cálculo de las métricas globales solo tiene en cuenta una parte de los puntos de control, al momento de realizar las comparaciones entre campañas es importante incluir todos los puntos para obtener análisis completos acerca de los desempeños obtenidos.

Un tercer tipo de figura corresponde a los valores espaciales del NSE. Para construir este mapa, cada celda se asoció al valor de NSE del punto de control más cercano aguas abajo. Los valores se presentan para resultados por campaña de calibración-validación (excepto para la campaña 3, que se toma como referencia, y para las campañas 4 y 5, cuyos resultados mostraron un decrecimiento inesperado en su desempeño, obligando a replantear algunos rangos de valores). Los datos por estación se presentan en forma gráfica en la pág. 158.

Análisis global

La Figura 19 presenta los resultados de *boxplot* y *dottyplot* frente a valores del NSE por campaña de calibración, para calibración y validación, para los 88 puntos de control. Si bien, debido al rango de valores (entre -20 y 1) no se observa fácilmente ningún tipo de tendencia, se pueden apreciar algunas características interesantes que van a seguirse presentando en las otras gráficas: la campaña de referencia 3 presenta menos puntos atípicos que el resto de campañas de calibración, pero es la campaña 6 la que presenta

“bigotes” más cortos, para calibración. Igualmente, se observa un menor rendimiento del modelo para la fase de validación.

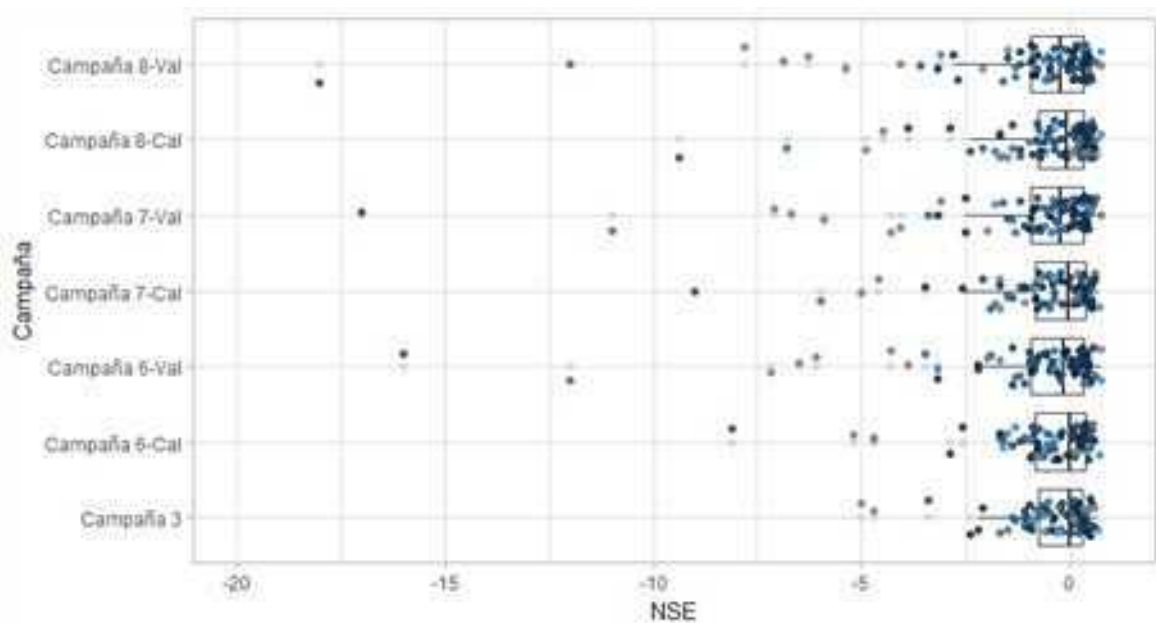


Figura 19. *Boxplot* y *dottyplot* del valor de NSE por campaña de calibración/validación, utilizando los 88 puntos de control en la MCMC.

La Figura 20 presenta estos mismos resultados en forma de gráfica *violin*, aproximando la distribución de probabilidad por Kernel. Esta gráfica confirma que las campañas 6, 7 y 8 presentan más datos atípicos frente a la campaña 3, como se ve en las largas colas con valores negativos, y que las campañas de calibración sucesivas tienden a hacer más largas estas colas. También permite observar que estas colas se alargan al utilizar datos de validación, lo que estaría demostrando que las campañas de calibración sucesivas profundizan bajos desempeños en ciertas cuencas, mejorando a cambio las que ya presentan desempeños altos.

Análisis para valores cuyo NSE está por encima de 0

Dados los resultados anteriores, se realiza el mismo ejercicio con los valores cuyo NSE está por encima de 0. La Figura 21 muestra el *boxplot* y *dottyplot* por campaña de calibración. Se observa una mejora de los valores de calibración de las campañas 6, 7 y 8 frente a la campaña 3, especialmente en el rango intercuartílico de la caja, la mediana, y los “bigotes”. En cuanto al número de puntos de control por encima de NSE de 0, se observa una desmejora en todas las campañas con respecto a la campaña 3.

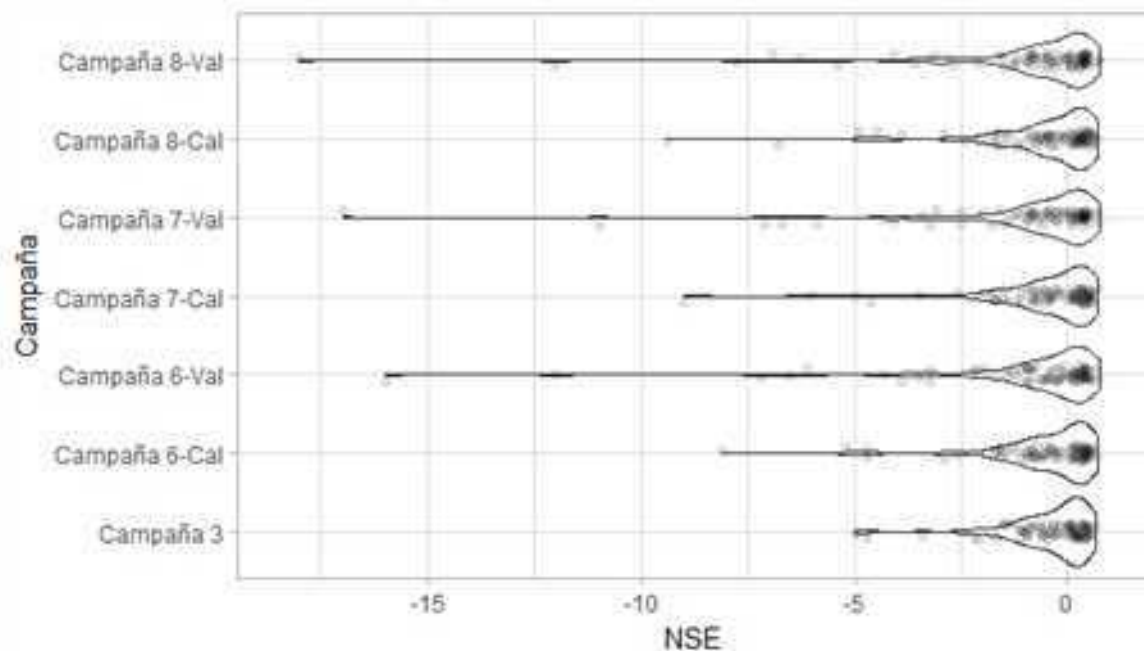


Figura 20. Densidad de probabilidad y *dottyplo*t de valores del NSE, por campaña de calibración, utilizando los 88 puntos de control en la MCMC.

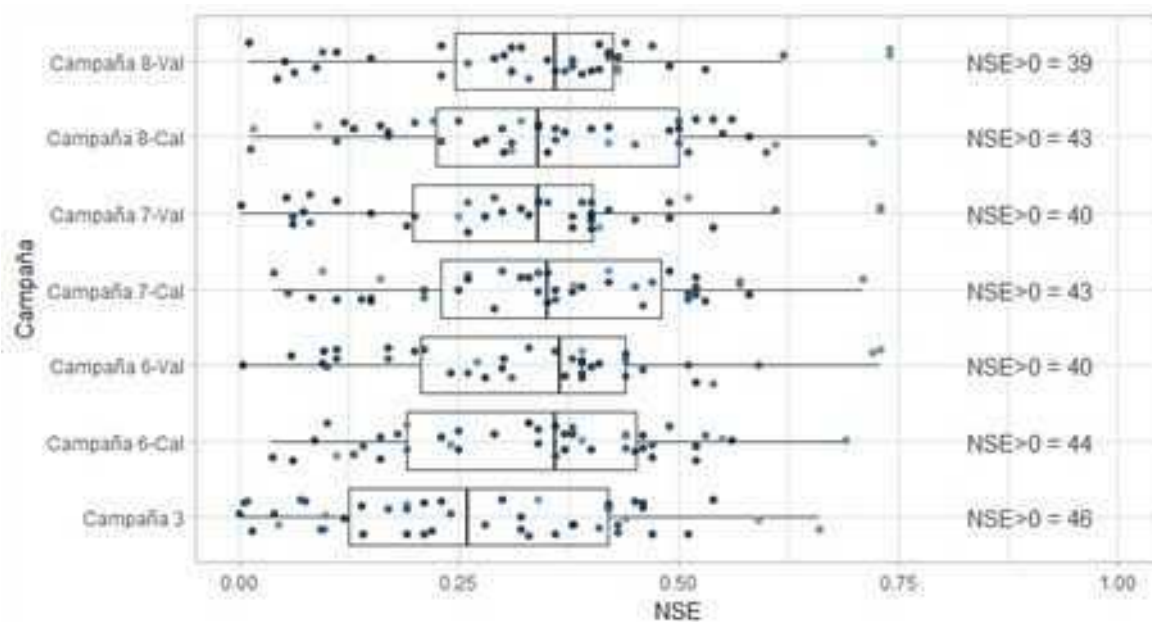


Figura 21. *Boxplot* y *dottyplo*t del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC, con valores del NSE por encima de 0.

Lo anterior se ve más claramente en la Figura 22, pues la densidad de puntos de control con respecto al valor del NSE tiende a concentrarse alrededor de la mediana de manera más pronunciada, para las campañas 6, 7 y 8, lo que no ocurre para la campaña 3.

Considerando solamente los resultados de validación, las densidades son parecidas para todas las campañas, pero la dispersión de los valores es más homogénea para la campaña 6, mientras que las campañas 7 y 8 tienen concentraciones de densidad alrededor de NSE de 0.08 y 0.37. Esto, sumado a la disminución del número de puntos de control con NSE por encima de 0 para las campañas 7 y 8, confirmaría que la calibración desmejora la eficiencia en puntos de control con bajos valores de NSE, para mejorar la eficiencia en otros que ya presentan buenos valores de NSE.

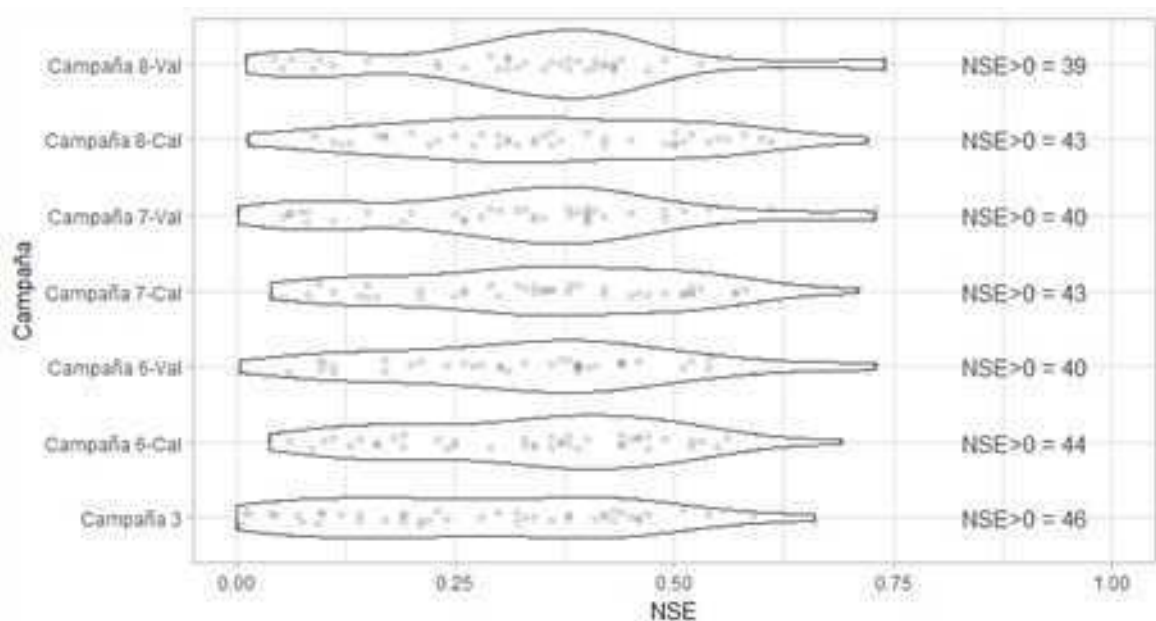


Figura 22. Densidad de probabilidad y *dotplot* del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC, con valores del NSE por encima de 0.

Análisis para valores cuyo NSE está por debajo de 0

Igualmente, se ha hecho el mismo análisis para aquellos puntos con valores del NSE por debajo de 0. En la Figura 23 se observan los resultados del *boxplot* por campaña. Estos muestran desmejoras en las campañas 6, 7 y 8 frente a la campaña 3, principalmente en los valores del rango intercuartilico y del “bigote” inferior. Asimismo, la validación de las campañas 6, 7 y 8 presenta valores de caja muy parecidos.

La distribución de probabilidad, por su parte, se presenta en la Figura 24. Se confirma la desmejora de las campañas 6, 7 y 8 frente a la campaña 3, observada en colas más largas para valores negativos del NSE lejanos a 0. Asimismo, tiende a presentarse una densidad de probabilidad menos inclinada hacia valores del NSE de 0 en las campañas 6, 7 y 8, frente a la campaña 3.

Resumiendo, se puede indicar que las campañas de calibración inducen el modelo a mejorar los valores de eficiencia en aquellos puntos de control donde ya presenta buenos

resultados, en detrimento de aquellos puntos de control que ya presentaban bajos valores en las métricas utilizadas. Sin embargo, las campañas de calibración 6, 7 y 8 presentan un mejor rendimiento de los valores simulados al comparar globalmente con los resultados de la campaña 3

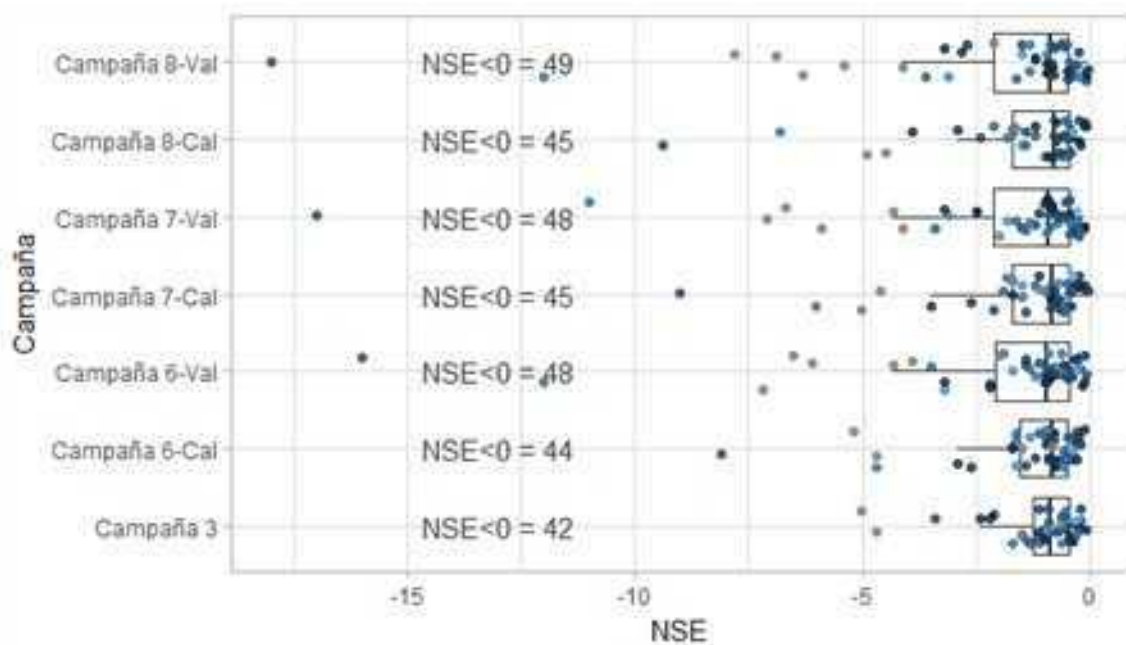


Figura 23. *Boxplot* y *dottyplo*t de NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC con valores del NSE por debajo de 0.

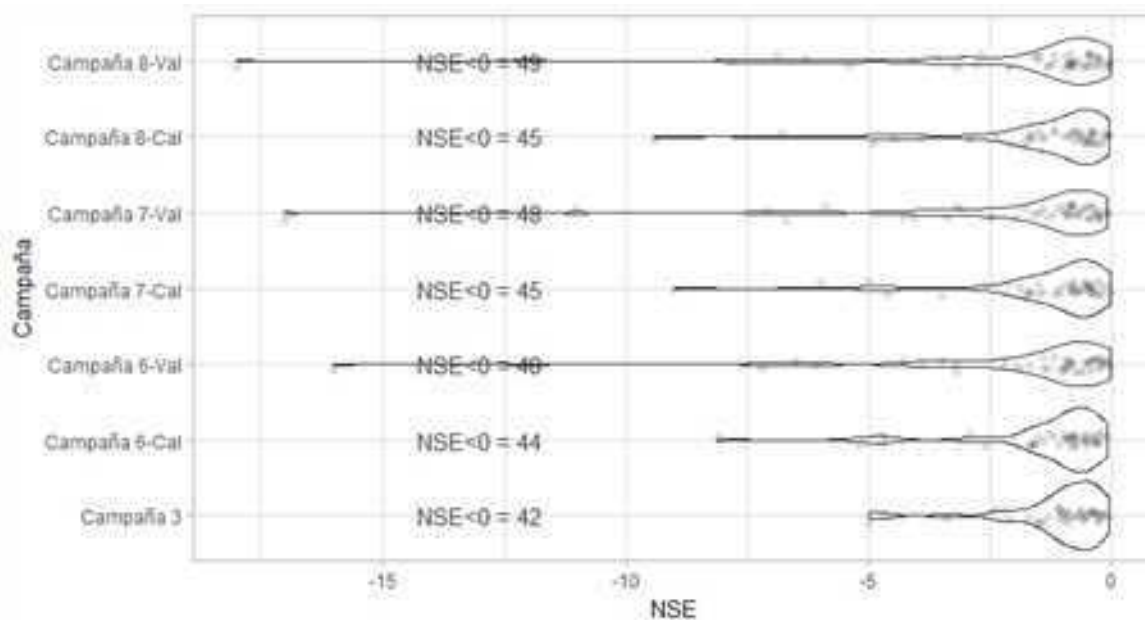


Figura 24. Densidad de probabilidad y *dottyplot* del NSE, por campaña de calibración/validación, utilizando los puntos de control en la MCMC con valores del NSE por debajo de 0.

Análisis espacial de los valores de NSE

Por último, en la Figura 25 se presentan los valores espaciales del NSE por campaña de calibración, tanto en calibración como en validación. Los mapas muestran una tendencia en la zona del Magdalena Alto (zona sur) a presentar valores por debajo de 0. Esta tendencia se repite a lo largo de la Cordillera Central (parte central de la MCMC), en la parte alta de la cuenca del río Chicamocha (zona oriental), en el alto Cesar (zona nororiental) y en la zona del Canal del Dique (zona noroccidental).

Para el caso de los bajos valores de NSE en la zona del Canal del Dique, las limitaciones del modelo para modelar la desviación artificial del caudal explican este bajo rendimiento. En cuanto a las otras zonas, no son claras las razones para los bajos resultados del NSE. Si bien existe una tendencia a presentar valores bajos en las zonas altas de la MCMC, también se presentan buenos resultados en la zona alta y media del río Cauca, en algunas cuencas del río Chicamocha, y en algunas cuencas del alto Cesar y de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Lo anterior podría indicar que existen fenómenos locales o regionales que impactan la hidrología de algunas zonas, pero que el modelo no es capaz de capturar. Estos fenómenos podrían estar ligados a flujos de agua subterránea, precipitación horizontal, o almacenamiento de agua por presencia de glaciales alto andinos. Una respuesta a estas limitaciones podrían ser cambios estructurales en el modelo utilizado. Por ejemplo, un módulo de flujo base que no simula adecuadamente la interacción con los acuíferos en estas áreas, o la necesidad de simular fenómenos adicionales de captura de niebla, podrían explicar un rendimiento bajo.

Este tipo de fenómenos no simulados ya se han presentado en otros casos, como en la cuenca del Somme (Francia), simulada con el modelo CLSM, y en donde se logró agregar una parametrización adicional de un acuífero profundo para producir mejores resultados sobre el caudal, pese a que el modelo ya obtenía buenos resultados en la representación de la evapotranspiración de la zona (Gascoin 2009).

Otras razones de los pobres desempeños del modelo en algunas zonas podrían deberse a problemas en los datos de entrada, como valores de precipitación excesivamente bajos para las zonas en cuestión, mala definición de la representación espacial de la MCMC, o incluso, problemas estructurales por parte del modelo implementado⁸.

⁸ Las razones pueden ser muchas, más aún en zonas tropicales. Ver la pág. 9, y principalmente (Zulkafli et al. 2013), para mayor información.

Análisis de hidrógrafas en puntos ciegos

Para ejemplificar los anteriores puntos, en la Figura 26 se presentan las hidrógrafas observadas y simuladas en la campaña 6, en cuatro estaciones no incluidas durante el proceso de calibración, pero que también tienen régimen natural, utilizadas para validaciones en puntos ciegos. Así mismo, se presentan los valores de NSE y bias para los resultados de la campaña de calibración 6.

Las cuatro estaciones están en zonas de montaña (Pte Carretera en el Alto Magdalena, San Rafael en el río Lebrija, El Alambrado en el río Cauca, y el Trébol en la zona de la Sierra Nevada). Un análisis comparativo muestra que las cuencas con malos resultados tienen problemas para simular el flujo base, pero parecen seguir adecuadamente los periodos de lluvias y estiaje. Así mismo, se observa una gran dispersión de las métricas de rendimiento, pese a las semejanzas entre las cuencas.

Así mismo, dadas las limitaciones para incluir el desarrollo de la intervención antrópica sobre infraestructura hidráulica y cambios en el uso del suelo y coberturas, surge la siguiente pregunta. ¿Hasta qué punto los valores paramétricos subsanan errores en la modelación por estas intervenciones antrópicas? Por el momento no es posible saberlo, sin embargo, puede hacer parte de las razones para los bajos resultados en la eficiencia de los modelos en las partes altas de la MCMC. Si la deforestación y la construcción de infraestructura hidráulica se ha concentrado en las subcuencas, sus efectos tenderán a sentirse de manera más intensa en las estaciones de caudal que las enmarcan

Las hidrógrafas para los demás puntos de control se muestran como anexo en la pág. 163

Equifinalidad y decisión de modelación de MESH para la MCMC

La cercanía relativa, en términos generales, del rendimiento del modelo entre las campañas de calibración estaría indicando, además, problemas de equifinalidad. Dada la complejidad del espacio parametral en este caso, con más de 40 parámetros en calibración y dos funciones objetivo, así como el costo computacional de correr el modelo, hicieron imposible realizar un análisis de sensibilidad riguroso, que permitiese ajustar el proceso de calibración en futuros ejercicios, como se realizó en Sánchez, (2014) para el modelo ISBA.

Además, dada la estructura adoptada de los GRU, muchos de los parámetros son compartidos entre diferentes subcuencas. Esto explica en parte las mejoras generales de los valores de rendimiento en las sucesivas campañas de calibración, pese a la desmejora en algunos puntos de control.

Ante la evidencia aportada acerca de problemas de equifinalidad y las características propias de los resultados de cada campaña de calibración, se hizo necesario tomar una decisión a fin de escoger uno de los conjuntos de valores paramétricos para continuar con el siguiente paso del trabajo de tesis, que corresponde a la simulación bajo escenarios de cambio climático y de uso del suelo.

Dados los análisis anteriores y considerando los resultados obtenidos, se decidieron utilizar los valores paramétricos de la campaña de calibración 6. Las razones para tomar esta decisión corresponden a las mejoras que produce el efecto de calibración respecto a la campaña de referencia 3, pero sin profundizar demasiado en las desmejoras que ocurren en ciertos puntos de la MCMC en las campañas de calibración 7 y 8

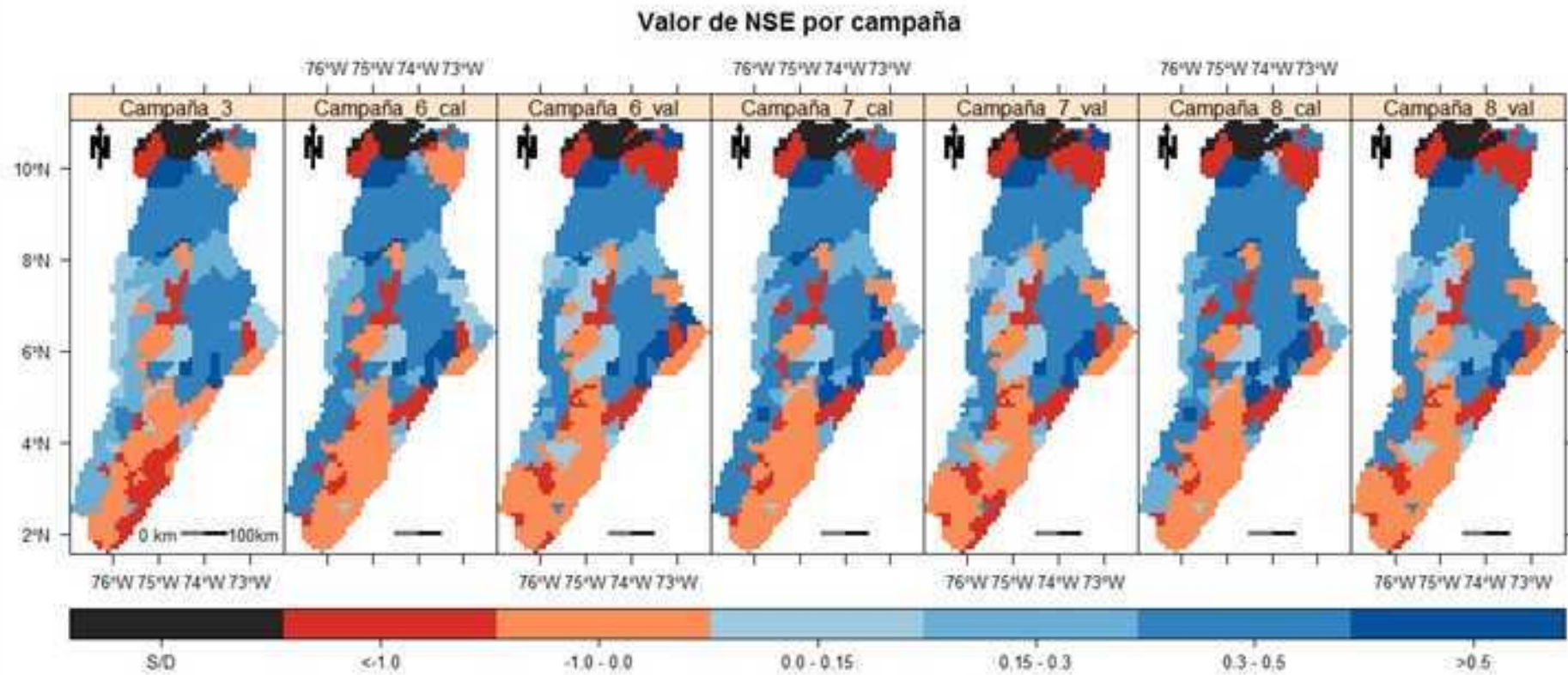


Figura 25. Valores espaciales del NSE por campaña, en calibración (cal) y validación (val).

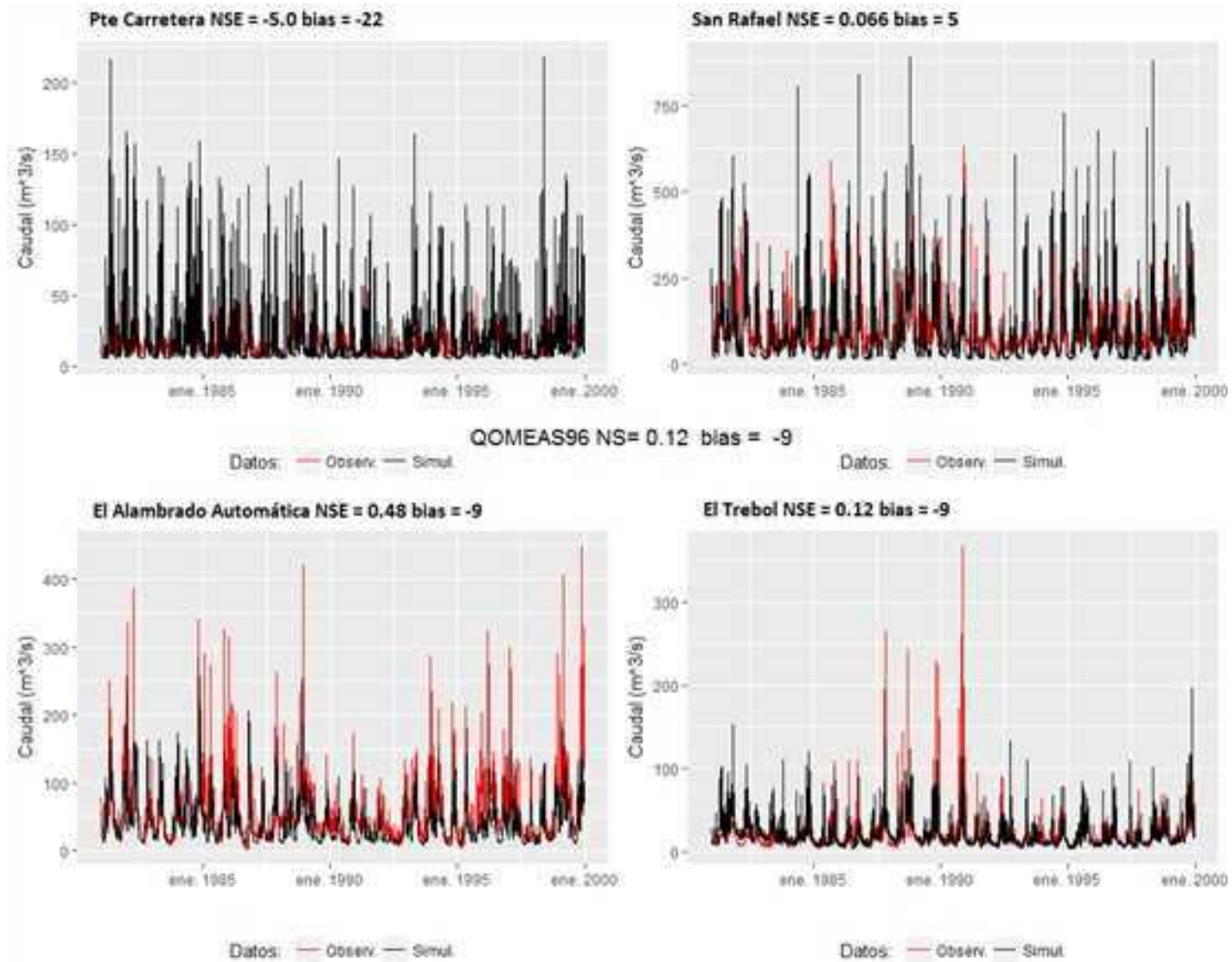


Figura 26. Hidrógrafas para estaciones de validación (datos observados y simulados) con valores del NSE y bias, considerando los valores paramétricos de la campaña de calibración 6.

5.3 Escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo en la Macro Cuenca Magdalena Cauca

El presente subcapítulo se ha dividido en tres partes, cada una dedicada al análisis de los efectos de los escenarios sobre cada una de las variables hidrológicas escogidas.

De antemano se debe remarcar que los escenarios generados corresponden a posibilidades, más no a predicciones totalmente certeras, o a simulaciones de realidades que van a ocurrir, y por lo tanto los resultados presentados aquí, así como los análisis y conclusiones correspondientes, deben ser apreciados con precaución y ser usados para estimular discusiones y generar mejores herramientas para la gestión del recurso hídrico, en concordancia con lo expresado por Silberstein 2006.

La anterior aclaración es pertinente como argumento para explicar la escogencia de las herramientas utilizadas para realizar los análisis: en este caso no se comparan series de tiempo (como se realizó para analizar el proceso de calibración). En vez de eso, la aproximación al análisis se hace tomando promedios anuales por celda, así como diferencias promedio a nivel mensual entre la línea base y los escenarios, para las variables de evapotranspiración y humedad del suelo, así como comparación de curvas de duración de caudales observados y simulados bajo los diferentes escenarios, para el caso del caudal.

5.3.1 Efectos sobre la evapotranspiración

Las tasas promedio anuales de evapotranspiración se muestran en la Figura 27. Los resultados de la línea base, así como de los escenarios bajo cambio climático, muestran una singularidad importante: la existencia de algunas pequeñas zonas con evapotranspiración negativa, o condensación. Esto puede deberse a una presión de vapor del aire mayor a la presión de vapor de referencia, a nivel del suelo. Esto provoca que el modelo, al utilizar las ecuaciones de momento y transferencia de calor, calcule una evapotranspiración negativa. Esta evapotranspiración negativa, en términos prácticos, significaría condensación de la humedad del aire sobre el suelo.

Estos eventos de condensación ocurren normalmente en la noche, cuando la temperatura de la superficie cae por debajo del punto de rocío de la atmósfera sobre la cobertura (Moene and Dam 2014). Existen dos condiciones para que esto suceda: caída de la energía disponible y una fuente de vapor de agua (Moene and Dam 2014).

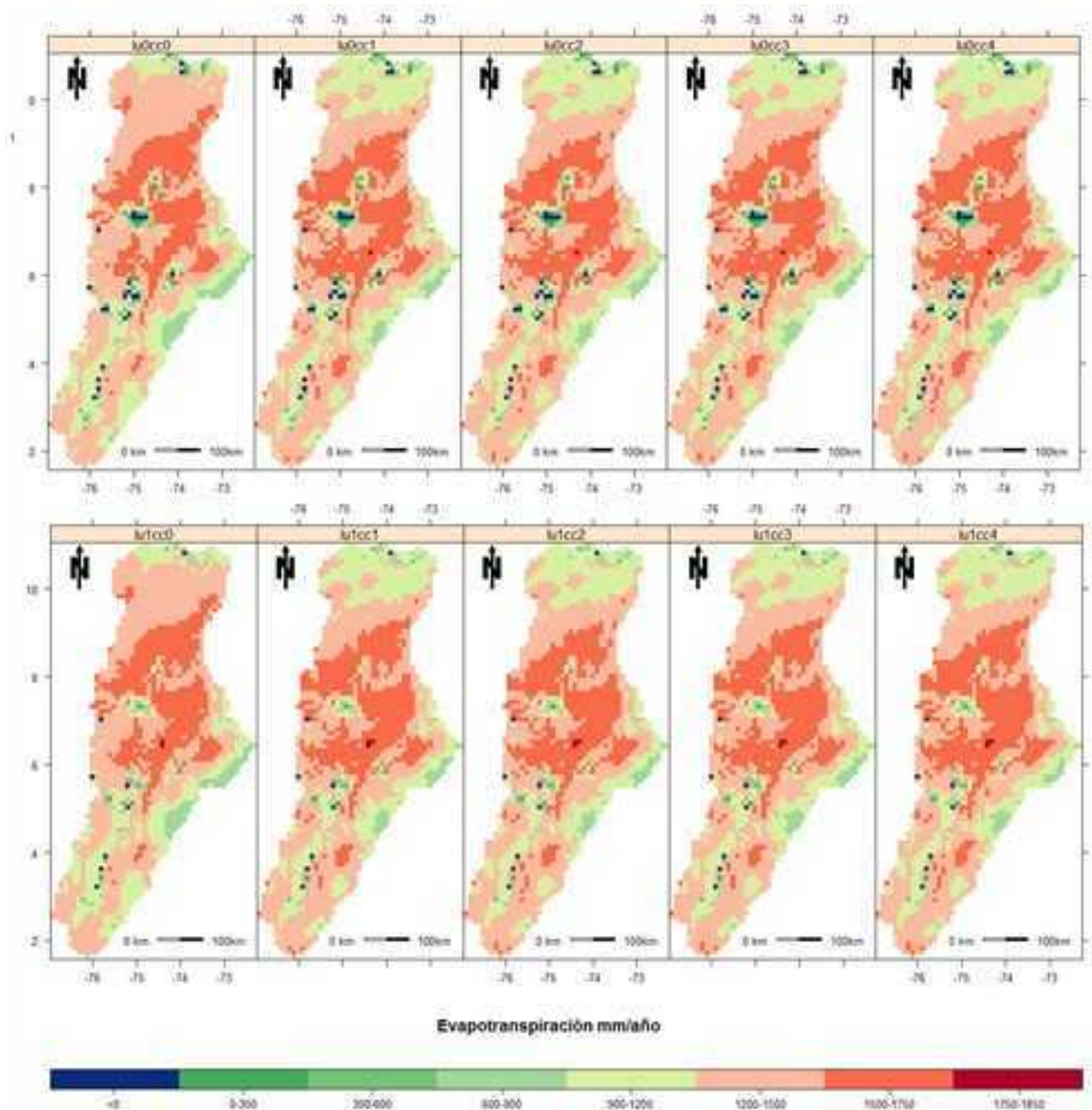


Figura 27. Evapotranspiración promedio anual para línea base (lu0cc0), escenarios de uso del suelo (partícula lu) y escenarios de cambio climático (partícula cc).

La necesidad de una caída en la energía se da porque la energía latente que recibe la cobertura por condensación debe removerse, para conservar el balance (Moene and Dam 2014). En cuanto a las fuentes de vapor de agua, se pueden considerar la atmósfera (a través de un flujo de humedad descendente) y el suelo (por medio de la difusión de vapor de agua en la zona no saturada) (Moene and Dam 2014)

Si bien este caso es muy común en zonas templadas, durante la temporada de invierno, es menos común en zonas tropicales, en donde el proceso de evapotranspiración es rápido y la presión de vapor cerca al suelo casi siempre es mayor a la presión de vapor del aire.

Así, en la alta montaña tropical se presentan algunos fenómenos importantes regionalmente, que sin embargo no son capturados adecuadamente por los modelos hidrológicos, o por los modelos *Land Surface*. Entre ellos se encuentra el de captura de niebla, y en general, procesos de precipitación oculta (Díaz-Granados et al. 2005; Cárdenas et al. 2017), cuya importancia es representativa respecto a la cantidad total de precipitación en estas zonas y que explicaría las altas tasas de escorrentía generadas en estas áreas (Cárdenas et al. 2017).

El modelo MESH no tiene un módulo para representar explícitamente el proceso de captura de niebla, sin embargo sería interesante confirmar que el modelo es capaz de identificar la existencia de fenómenos de flujos descendentes de la humedad del aire o captura de niebla, gracias al empleo de la ecuación de energía conjuntamente con la ecuación de balance hídrico, en zonas específicas de alta montaña dentro de la MCMC. Aunque no es posible en este momento validar estos resultados, estos hallazgos abren una posible línea de investigación futura para entender y modelar mejor estos fenómenos, en asociación con otros modelos propuestos específicamente para zonas de páramo (Díaz-Granados et al. 2005). Geográficamente, ellos se observan en la Cordillera Central, en las zonas hidrográficas del río Saldaña, Magdalena medio y río Nechí, así como en zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta.

Al detallar los cambios de los puntos de evapotranspiración negativa bajo cada escenario, se puede observar que los efectos de cambio climático no disminuyen su extensión y ubicación. Para el caso del escenario lu0cc4 (sin cambio en la cobertura vegetal, escenario RCP 8.5, el más severo de cambio climático), se observa que, con algunas excepciones, las celdas con evapotranspiraciones negativas se mantienen. Historia diferente se observa bajo el escenario de cambio de cobertura vegetal, en donde una amplia zona con evapotranspiración negativa desaparece.

Esto podría deberse a que el cambio de cobertura provoca una pérdida en la humedad de la primera capa del suelo, una de las fuentes de vapor de agua que pueden provocar fenómenos de condensación. Otra razón podría ser que el cambio de cobertura provoca cambios en los flujos de energía sensible y de calor en el suelo, lo que restringe los fenómenos de condensación.

Los resultados de cambios en la evapotranspiración por escenario, en comparación con la línea base, a nivel promedio multianual, se presentan en la Figura 28. La primera línea de la figura corresponde a los escenarios de cambio climático sin cambio en la cobertura vegetal, siendo el escenario lu0cc0 la línea base. La segunda línea corresponde a los escenarios de cambio climático, combinados con cambios en la cobertura vegetal. En esta figura, se muestran los valores de la diferencia (en mm/mes) entre la evapotranspiración del escenario base (lu0cc0) y la evapotranspiración de los otros escenarios. En azul oscuro, se encuentran aquellas celdas cuya diferencia es nula.

La presencia de celdas en azul oscuro es interesante porque muestra aquellas áreas en donde los efectos sobre la variable en cuestión no generan afectaciones. Bajo los efectos del cambio climático solamente, estas celdas no se presentan (ver lu0cc1). Sin embargo, considerando solo efectos del cambio de cobertura vegetal (ver lu1cc0) se observa que los patrones espaciales de la evapotranspiración pueden llegar a cambiar, incluso más que bajo efectos del cambio climático, y que sus tendencias pueden ir en la dirección contraria.

Esto también se observa al comparar escenarios de cambio climático sin cambio en cobertura y con cambio en cobertura: los efectos a nivel local pueden generar diferencias mensuales promedio del orden de 100 mm bajo cambio de cobertura y, de manera general, el cambio climático genera cambios en la tasa de evapotranspiración sobre toda la cuenca entre -25 y 25 mm/mes.

Esto último es importante de remarcar: el cambio climático puede llegar a generar afectaciones generales sobre toda la MCMC, con aumentos generalizados de la evapotranspiración al sur de la MCMC, y disminuciones generalizadas en las partes llanas cercanas a la Costa Caribe, al norte de la MCMC. Sin embargo, un cambio importante en la cobertura vegetal puede agravar o variar localmente estas tendencias, principalmente en zonas de la Cordillera Central y de la Sierra Nevada.

Si bien puede parecer extraño que se dé una disminución en la evapotranspiración en zonas en donde se intensifican los cambios de temperatura (zona norte de la MCMC), esto puede deberse al control fisiológico de la vegetación frente a condiciones más secas, o a una menor disponibilidad de agua para evapotranspirar.

La importancia de estos resultados radica en sus implicaciones para mitigar fenómenos de sequías, pues las nuevas condiciones hidroclimatológicas pueden condicionar la existencia de ciertos cultivos que se adapten mejor, por ejemplo, que tengan menores tasas de evapotranspiración. La gestión del territorio, principalmente la gestión de los usos del suelo a nivel regional, se identifica como una herramienta poderosa para mitigar estos posibles fenómenos de sequía.

Queda por investigarse la resiliencia de los ecosistemas a estos nuevos escenarios, cuyo alcance excede el propósito del presente trabajo de tesis. Este punto es importante, pues afectaciones sobre los ecosistemas pueden variar la cobertura vegetal, sin que exista intervención antrópica directa⁹.

⁹ La resiliencia de los ecosistemas y su consecuente impacto en la cobertura vegetal y en los flujos energético e hídrico, exceden el alcance de este trabajo de tesis. Sin embargo, es un tema de gran interés actualmente. Algunos trabajos a nivel global de este tipo se muestran en (Snyder et al. 2004; Port et al. 2012; Wagner et al. 2017; Jiao et al. 2017).

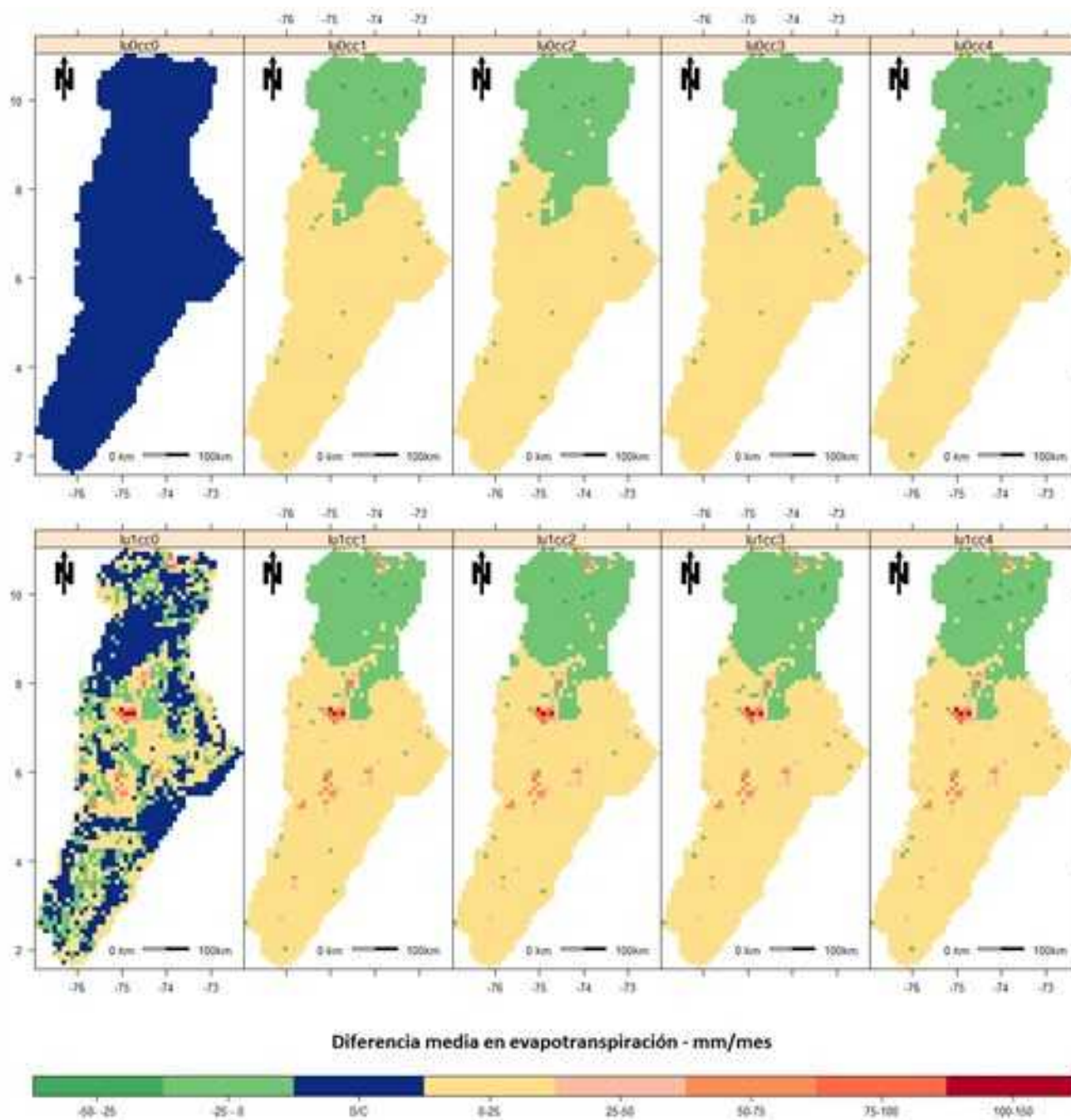


Figura 28. Diferencia promedio de evapotranspiración entre línea base y escenarios de uso del suelo (lu) y de cambio climático (cc).

5.3.2 Efectos sobre la humedad de la primera capa del suelo

Los resultados de cambios en la humedad de la primera capa del suelo (primeros 10 cm) a nivel promedio multianual se presentan en la Figura 29. A primera vista, es posible observar algunas zonas con baja humedad del suelo en el valle alto del Magdalena, en el

valle alto del Cauca y en el piedemonte de la Sierra Nevada. Por otro lado, las zonas con mayor humedad del suelo se presentan mayoritariamente en el valle medio del Magdalena, en el alto Chicamocha y en el valle medio y bajo del Cauca. Estas zonas de baja pendiente tienden a inundarse durante el año, y por lo tanto sus suelos presentan humedades a nivel de saturación más fácilmente.

Asimismo, al comparar escenarios en la Figura 29, se observan variaciones importantes en las zonas con humedades máximas y mínimas. Para corroborar de mejor forma estas afirmaciones, se hace necesario analizar la Figura 30, elaborada calculando la diferencia porcentual entre la humedad promedio multianual de la línea base y de los diferentes escenarios.

Sin tener en cuenta los efectos sobre la humedad del suelo por cambio de cobertura (escenarios lu0cc1 a lu0cc4), se observa un aumento generalizado en la zona norte de la MCMC, especialmente en las zonas del Bajo Magdalena y el río San Jorge. En la zona Andina, sur de la MCMC, también se presenta un aumento generalizado de la humedad de la primera capa, especialmente en zonas del altiplano cundiboyacense Cordillera Oriental y Cordillera Central.

Al considerar solamente los efectos de cambio de la cobertura, sin efectos de cambio climático (escenario lu1cc0), se observa una disminución generalizada de la humedad del suelo, con algunas “bolsas” de aumento de la humedad en la Cordillera Central y en la región de la Mojana. Pero, cuando se consideran los efectos combinados de cambio en la cobertura y de cambio climático, los patrones espaciales encontrados bajo escenarios de cambio climático sin cambio en cobertura, se mantienen.

Las anteriores comparaciones también tienen implicaciones para la gestión de eventos extremos: si la primera capa del suelo tiende a aumentar su humedad, la tasa de infiltración puede disminuir, provocando mayores eventos de inundación en zonas planas, o de deslizamientos en zonas montañosas. Otros resultados de investigación enfocados en determinar los cambios sobre la humedad del suelo por cambio climático, presentan semejanzas en los patrones espaciales, mas no en los porcentajes de cambio, probablemente debido a diferencias en los datos de precipitación y temperatura utilizados (Mogollón 2017) (Ver principalmente Figura 5-18, donde se observa un patrón norte – menor humedad del suelo y sur – mayor humedad del suelo).

Asimismo, menores humedades del suelo, sobre todo de la primera capa, pueden disminuir la resiliencia de los ecosistemas en épocas de estiaje, pues la primera capa del suelo es la principal fuente de agua para la vida vegetal.

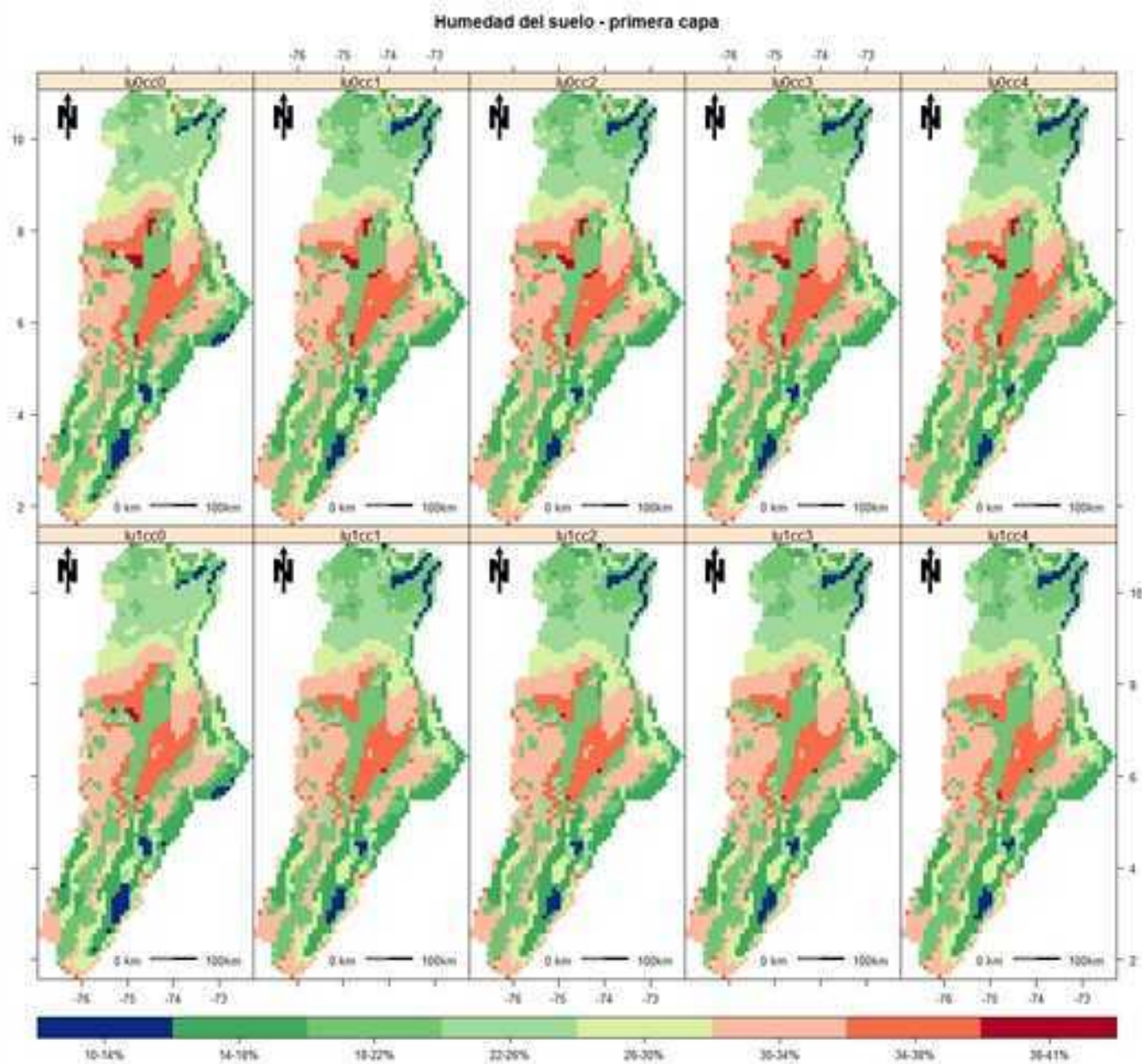


Figura 29. Humedad de la primera capa del suelo para línea base, escenarios de uso del suelo (lu) y escenarios de cambio climático (cc).

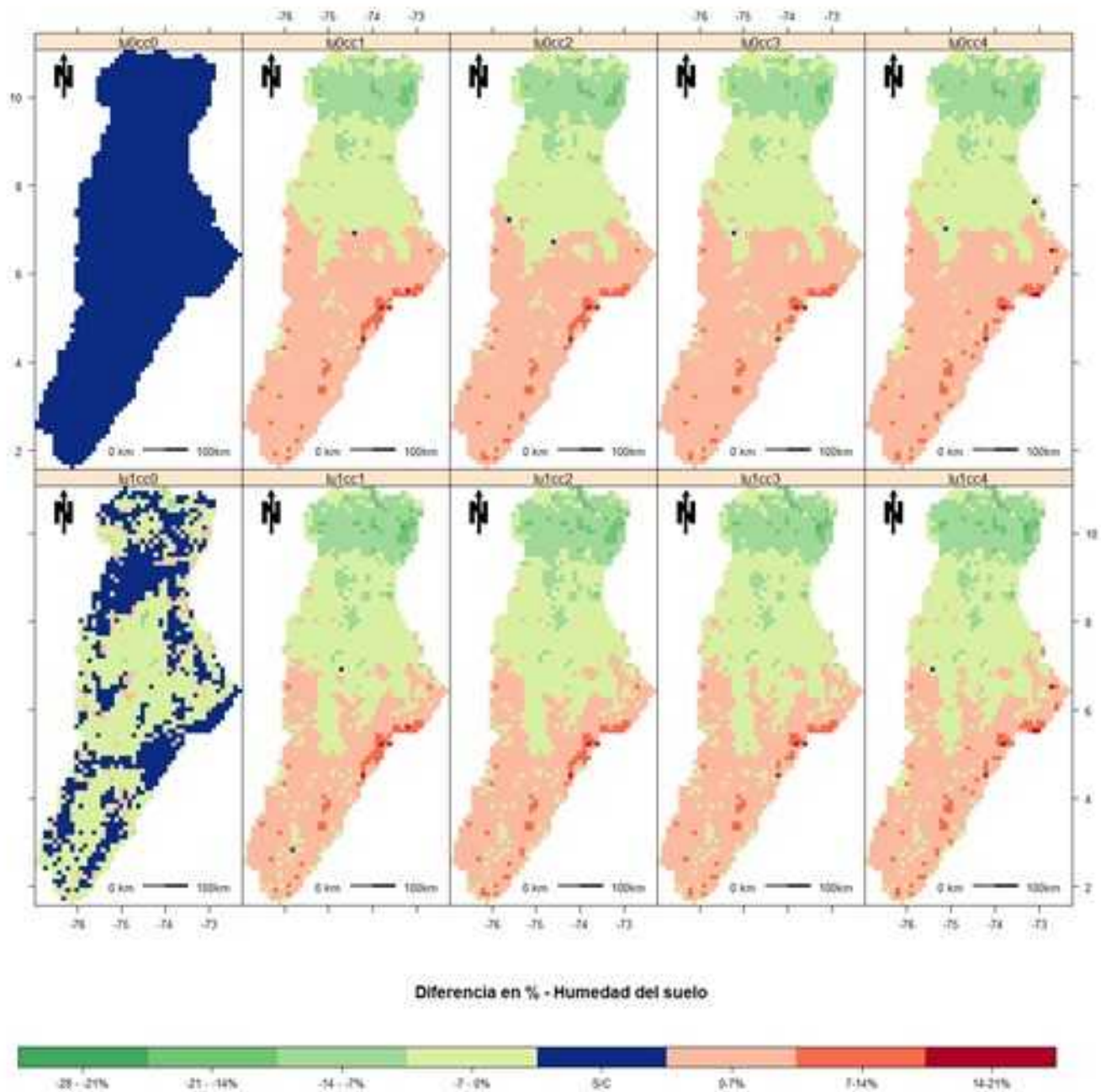


Figura 30. Diferencia porcentual de la humedad de la primera capa de suelo entre la línea base y los escenarios de uso del suelo (lu) y de cambio climático (cc).

5.3.3 Efectos sobre los caudales

La partición de la precipitación entre los componentes de evapotranspiración, infiltración, y escorrentía, implica relaciones complejas de interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera (Orgeval et al. 2008). Si bien los modelos *Land Surface* representan estas

interacciones, en general su validación se hace comparando los resultados de caudal, producto del acoplamiento con un modelo de tránsito (Decharme 2007). Este procedimiento se da debido a las particularidades propias de los caudales, pues corresponden a una variable de tipo integral, que enlaza los diferentes fenómenos que ocurren dentro de una cuenca, en un solo punto (Davison et al. 2016).

Tomando como referencia estos enfoques, se utiliza como herramienta de comparación y análisis la curva de duración de caudales (CDC). Esta organiza los caudales sin tener en cuenta su componente temporal, por lo que permite comparar rápidamente probabilidades de excedencia entre diferentes series de tiempo (Pereira et al. 2017). Puede adicionarse una agrupación de estaciones para comparar las CDC, con el fin de comparar CDC homogéneas (Moreno et al. 2014), sin embargo, este tipo de metodologías se dejan para un trabajo posterior.

A este respecto, se muestran las curvas de duración de caudales observados y escenarios en los mismos puntos de control escogidos como puntos ciegos de validación en el proceso de calibración (ver 5.2 Calibración del modelo MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca). Las razones para escoger estos puntos, es que representan diferentes condiciones climatológicas y geográficas existentes dentro de la cuenca, y sus regímenes de caudales no están regulados por embalses artificiales, por lo que son representativas de los cambios locales que se generan en el caudal a escala regional.

En la Figura 31 se presentan las curvas de duración de caudales sin cambio en la cobertura vegetal, por escenario de cambio climático, y el valor del bias promedio de todos los escenarios de cambio climático sin cambios en la cobertura vegetal, respecto a los caudales observados.

En esta figura se observa de manera general cómo el modelo es incapaz de representar adecuadamente la totalidad de los caudales en las estaciones analizadas. Por ejemplo, para el caso de Pte Carretera, el modelo no es capaz de simular adecuadamente los caudales medio altos (porcentaje de excedencia mayor 12.5%) y los picos de caudal, mientras en El Alambrado, los principales problemas de simulación estuvieron en los picos.

Sin embargo, también es importante remarcar la estabilidad de las curvas de duración al realizar la comparación entre escenarios: las líneas tienden a superponerse, con algunos cambios en los caudales medios y altos (ver San Rafael y El Alambrado, para valores de caudal altos, con porcentaje de excedencia del 12.5% o menos). Así, y en términos generales, los cambios en el régimen de caudales son sumamente pequeños y pueden variar dentro de los límites de la variabilidad climática.

En la Figura 32 se observan las CDC para escenarios de cambio climático con cambio en la cobertura vegetal. Al igual que para las curvas de escenarios sin cambio en la cobertura vegetal, en esta gráfica se presentan cambios pequeños en los regímenes de caudales, y de manera general, no existen diferencias entre los escenarios sin cambio en la cobertura y con cambio en la misma.

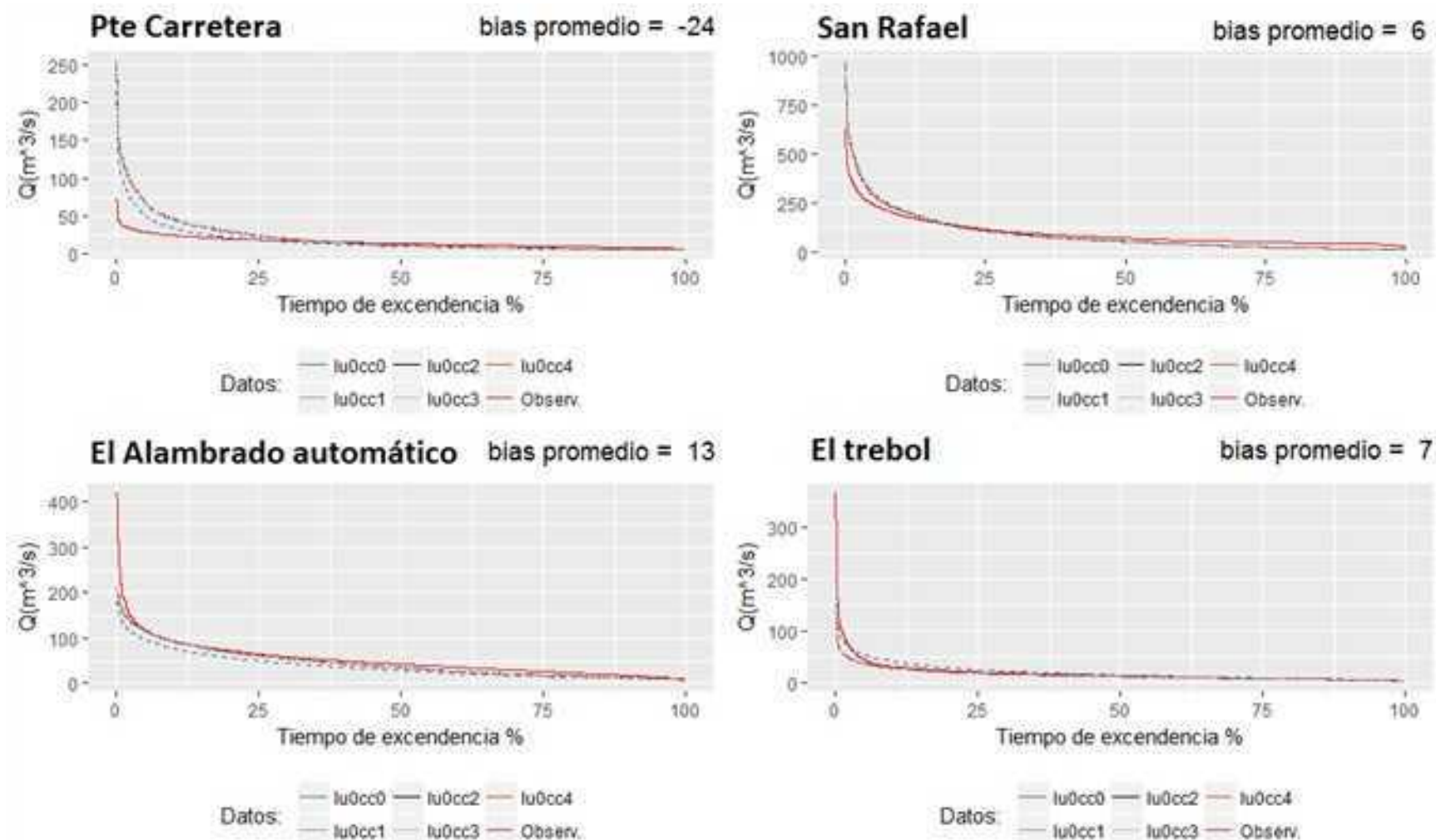


Figura 31. Curva de duración de caudales para datos observados y escenarios de cambio climático sin cambio en la cobertura vegetal, en los cuatro puntos de control escogidos para validación.

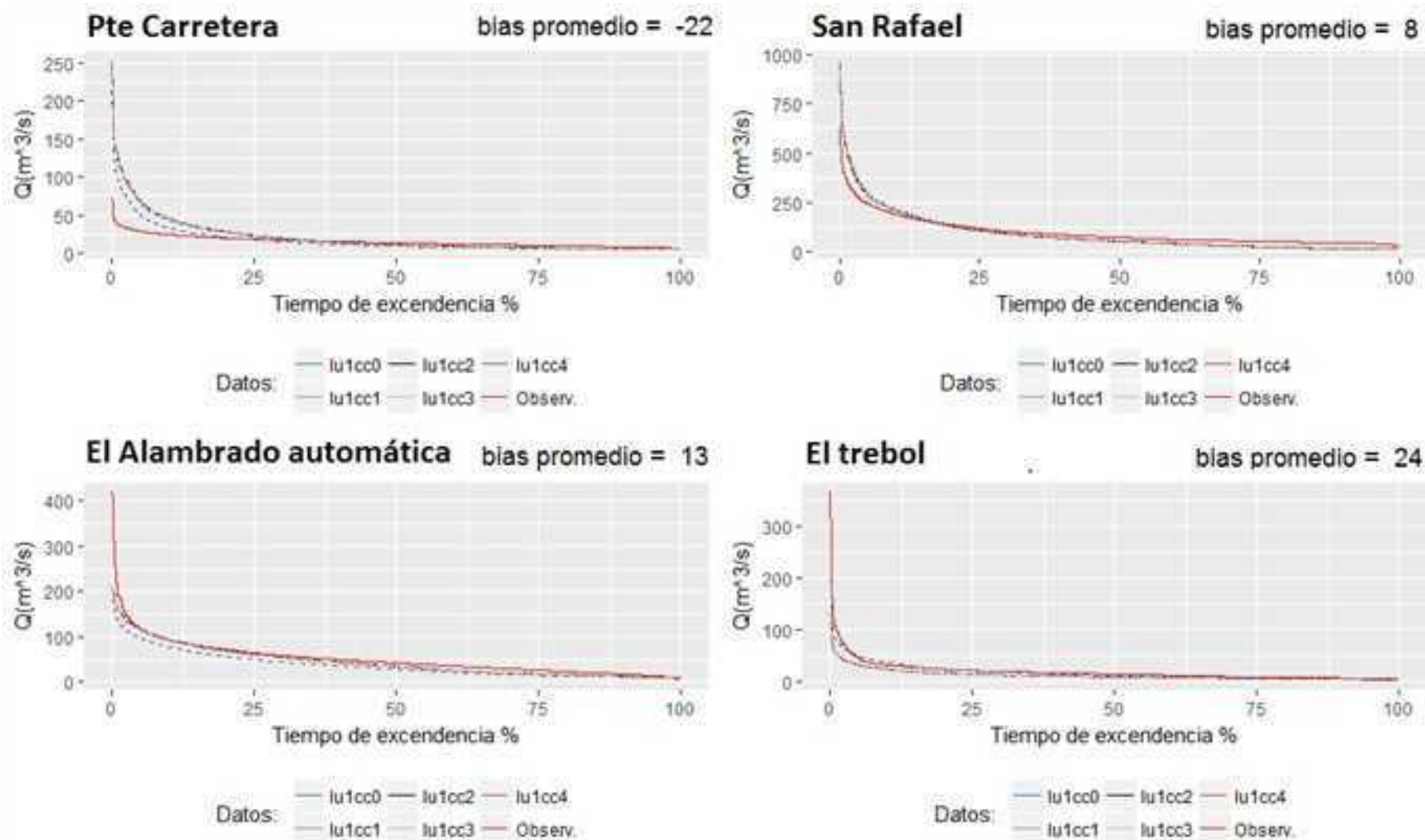


Figura 32. Curva de duración de caudales para datos observados y escenarios de cambio climático con cambio en la cobertura vegetal, en los cuatro puntos de control escogidos para validación.

Incluso los valores del bias promedio presentan cambios muy pequeños, con cambios menores a 5 puntos porcentuales en el bias. Existe una excepción para la estación de El Trébol, cuyo valor de bias pasa de 7% en los escenarios de cambio climático sin cambio en cobertura vegetal, a 24% para el caso de escenarios de cambio climático con cambio en la cobertura vegetal, principalmente debido a cambios en los caudales medios. Sin embargo, esta estación conserva su estabilidad en la forma de la CDC, indistinto del escenario, con cambios en los caudales con tiempo de excedencia iguales o inferiores al 25%.

Estos cambios en el régimen de caudales parecen estar condicionados más por cambios ligados al clima, pues los cambios por cobertura vegetal son menos importantes. Esto quiere decir que el régimen de caudales, de acuerdo a la modelación, no presentará cambios bruscos en su régimen de caudales, pero si se acomodará a las nuevas condiciones, de acuerdo a los valores de las variables meteorológicas que se presenten a nivel local y regional, y en menor medida a la cobertura vegetal. De manera general, las curvas de duración de caudales de las estaciones La Coquera (Río Cauca) y Calamar (Río Magdalena) presentan un aumento en los caudales, mucho más pronunciado en el caso del Cauca (ver resultados en Anexo G, pág. 184)

Sin embargo, debe recordarse que existen limitaciones en la precipitación utilizada, pues se utilizaron valores diarios como valores intradiarios. Si bien esto significa que el volumen de agua no cambia, el momento y la intensidad de la precipitación no corresponden a la realidad, lo que podría ocasionar distorsiones en las CDC, principalmente en cuanto a eventos extremos en cuencas de poco tamaño. Por lo anterior, estos resultados deben observarse con cuidado.

Los otros puntos de control presentan en general este tipo de particularidades, con diferencias según las características de la región (ver pág. 184).

Si bien es cierto que a nivel puntual las afectaciones sobre el caudal por escenarios de cambio climático y cambio en el uso del suelo no son tan importantes, a nivel regional sí se pueden llegar a generar cambios en el agua disponible para las actividades existentes, especialmente para la agricultura, principal actividad económica en el gasto de agua (IDEAM 2014).

5.3.4 Efectos sobre el balance hídrico

Ahora bien, dados los efectos particulares sobre cada una de las tres variables hidrológicas analizadas. ¿Qué significa esto para el balance hídrico?

Para responder a esta pregunta, se recurre a valores promedio sobre toda la cuenca, para el periodo de tiempo de 12 años definido en el análisis de los escenarios. Este balance presenta información general, la cual no tiene en cuenta las variaciones estacionales ni espaciales. Sin embargo, brinda información importante acerca de los flujos generales, partición de la escorrentía y almacenamientos promedio dentro de la MCMC.

En la Tabla 11 se muestra el balance hídrico para la MCMC, por escenario de cambio climático y cambio en el uso del suelo, mostrando los valores de los componentes (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento y almacenamiento), así como los componentes de la escurrimiento (superficial, interflujo y flujo dado al acuífero para flujo base, o percolación).

Esta tabla remarca las grandes semejanzas, en valores absolutos, en la partición de la precipitación a nivel vertical, al comparar los valores por escenario. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, se observa un aumento sostenido de la precipitación, la evapotranspiración, y la escurrimiento. Asimismo, se observa una disminución del intercambio de agua superficial y subterránea (percolación).

Para la Evapotranspiración y la percolación, los efectos de cambio climático se magnifican si existe cambio en la cobertura vegetal, mientras que la escurrimiento tiene una tendencia contraria bajo cambios de la cobertura. Esto significa que el principal impacto de los cambios en la cobertura en asociación a los efectos del cambio climático es un aumento de los flujos rápidos entre los componentes del sistema, y una disminución de los flujos más lentos.

Asimismo, respecto al componente de escurrimiento, es interesante observar el bajo porcentaje de participación de la escurrimiento superficial en la simulación de la escurrimiento, y el peso importante del interflujo, que estaría recibiendo el peso de la escurrimiento de corto plazo y del intercambio con el acuífero, el cual se traduciría luego en el flujo base, casi a partes iguales. Igualmente, se observa un ligero cambio en el patrón de simulación de escurrimiento bajo los escenarios, pasando el interflujo de 51% al 57% en participación de escurrimiento y dejando una menor participación a la percolación, pasando de alrededor del 48% al 42%.

La Tabla 12 muestra la diferencia entre los valores de los escenarios y el escenario base (lu0cc0) para cada uno de los componentes del balance hídrico, en términos porcentuales.

Esta tabla confirma algunos de los efectos ya observados: aumento de la evapotranspiración, con porcentajes de cambio más altos si además de cambio climático se da cambio en el uso del suelo; para el caso de la escurrimiento, bajo cambio climático se puede dar un aumento entre 2.75 y 4.92% en los valores promedio, pero la tendencia cambia si hay cambio de cobertura vegetal, que genera un descenso de 4.25% sin considerar cambio climático, y que desciende a 0.66% bajo el escenario de cambio climático más severo.

Igualmente, se presentan cambios en el almacenamiento con características similares a las de la escurrimiento, con rangos que van desde 0.66 hasta 8%. En este caso particular, los efectos de cambios en la cobertura son bajos (cambio de 0.66%), y los cambios principales se dan por cambio climático.

Tabla 11. Balance hídrico de largo plazo por escenario, para componentes generales y para el componente de escorrentía, para los doce años de simulación de escenarios.

Escenario	lu0cc0	lu0cc1	lu0cc2	lu0cc3	lu0cc4
Precipitación total (mm)	24688.855	24688.855	25033.256	25113.609	25096.867
Evapotranspiración total (mm)	15458.966 (62.6%)	15458.966 (61.9%)	15499.683 (61.8%)	15522.771 (61.8%)	15509.085 (61.5%)
Escorrentía total (mm)	9406.135 (38.1%)	9406.135 (38.6%)	9665.265 (38.7%)	9717.833 (38.7%)	9717.957 (39.0%)
Cambio en almacenamiento (mm)	51.056	51.056	54.664	54.819	54.374
Almacenamiento inicial (mm)	531.632	531.632	522.302	522.416	523.312
Almacenamiento final (mm)	582.688	582.688	576.966	577.235	577.686
Flujo superficial (%)	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Interflujo (%)	51.47	56.28	56.61	56.38	56.63
Intercambio con acuífero (%)	48.52	43.72	43.38	43.61	43.37
Escenario	lu1cc0	lu1cc1	lu1cc2	lu1cc3	lu1cc4
Precipitación total (mm)	24688.855	25033.256	25113.609	25096.867	25307.713
Evapotranspiración total (mm)	15875.688 (64.3%)	15917.925 (63.6%)	15940.989 (63.5%)	15926.897 (63.5)	15981.081 (63.1%)
Escorrentía total (mm)	9005.906 (36.5%)	9263.789 (37.0%)	9316.273 (37.1%)	9316.604 (37.1%)	9468.013 (37.4%)
Cambio en almacenamiento (mm)	51.395	54.985	55.139	54.698	54.71
Almacenamiento inicial (mm)	529.362	520.031	520.16	521.056	521.069
Almacenamiento final (mm)	580.757	575.016	575.299	575.754	575.779
Flujo superficial (%)	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Interflujo (%)	51.70	56.72	57.07	56.83	57.07
Intercambio con acuífero (%)	48.29	43.28	42.93	43.17	42.92

Tabla 12. Diferencia entre los componentes del balance hídrico de largo plazo de los escenarios con respecto al escenario base lu0cc0.

Comparación con escenario lu0cc0	lu0cc0	lu0cc1	lu0cc2	lu0cc3	lu0cc4
Diferencia en precipitación total (%)	0.00	1.39	1.72	1.65	2.51
Diferencia en Evapotranspiración total (%)	0.00	0.26	0.41	0.32	0.68
Diferencia en escurrimiento total (%)	0.00	2.75	3.31	3.32	4.92
Diferencia en cambio en almacenamiento (%)	0.00	7.07	7.37	6.50	6.55
Diferencia en almacenamiento inicial (%)	0.00	-1.75	-1.73	-1.56	-1.57
Diferencia en almacenamiento final (%)	0.00	-0.98	-0.94	-0.86	-0.86
Diferencia en flujo superficial (%)	0.00	-34.72	-37.42	-33.47	-39.29
Diferencia en interflujo (%)	0.00	12.35	13.63	13.17	15.43
Diferencia en intercambio con acuífero (%)	0.00	-7.41	-7.63	-7.14	-6.22
Comparación con escenario lu0cc0	lu1cc0	lu1cc1	lu1cc2	lu1cc3	lu1cc4
Diferencia en precipitación total (%)	0.00	1.39	1.72	1.65	2.51
Diferencia en Evapotranspiración total (%)	2.70	2.97	3.12	3.03	3.38
Diferencia en escurrimiento total (%)	-4.25	-1.51	-0.96	-0.95	0.66
Diferencia en cambio en almacenamiento (%)	0.66	7.70	8.00	7.13	7.16
Diferencia en almacenamiento inicial (%)	-0.43	-2.18	-2.16	-1.99	-1.99
Diferencia en almacenamiento final (%)	-0.33	-1.32	-1.27	-1.19	-1.19
Diferencia en flujo superficial (%)	1.87	-33.89	-36.80	-32.64	-38.67
Diferencia en interflujo (%)	-3.83	8.53	9.81	9.36	11.61
Diferencia en intercambio con acuífero (%)	-4.71	-12.16	-12.37	-11.88	-10.96

Finalmente, para el componente de escorrentía, se observa una tendencia marcada a observar disminuciones en los volúmenes de escorrentía superficial. De acuerdo al modelo, la escorrentía superficial no tendría gran importancia a nivel regional, siendo importante solo a nivel local, pero en general pierde importancia bajo efectos del cambio climático.

Sobre la escorrentía superficial, se observan valores muy bajos, lo que probablemente se deba a limitaciones de los valores paramétricos del modelo, por un lado, a limitaciones en los datos de precipitación, o a una importancia de tipo local más no regional, por otro.

Si bien tiene sentido pensar en un volumen mayor de la escorrentía superficial, no se tienen datos acerca de la magnitud de esta variable. Un proceso de simulación enfocado sobre esta variable podría identificar y permitir calibrar el modelo de una forma más realista, identificando el componente lento de las hidrógrafas por medio de algún filtro. Sin embargo, este tipo de calibración, que puede ser importante para análisis local y regional, no fue tenido en cuenta en este trabajo.

Por otro lado, el interflujo presenta aumentos importantes en sus tendencias bajo cambio climático. Estos cambios son un poco menos bruscos si existen cambios en la cobertura vegetal, mientras que los cambios en la percolación siempre son negativos, y el cambio en la cobertura vegetal magnifica y profundiza esta tendencia.

Estos cambios presentan grandes diferencias a nivel regional, como ya se vio al comparar las tres variables escogidas para el análisis de efectos. Asimismo, dadas las particularidades de la estructura climática de la MCMC (estructura que no cambia en aspectos fundamentales bajo los escenarios de cambio climático, como por ejemplo, días sin lluvia o meses lluviosos para el caso de la precipitación, debido al método utilizado para conformar los escenarios), los efectos presentan grandes divergencias a nivel temporal.

Asimismo, se confirma que el cambio en la cobertura del suelo puede aumentar aún más los efectos del cambio climático, principalmente en evapotranspiración, almacenamiento y percolación, mientras que en otros puede mitigar, o incluso invertir las tendencias que se presentan solamente bajo cambio climático, especialmente en escorrentía.

Finalmente, con el fin argumentar acerca de las grandes diferencias regionales que se pueden presentar en el balance hidrológico, se presenta la Tabla 13 y la Tabla 14, que muestran las subzonas hidrográficas con cambios porcentuales más grandes en humedad del suelo, y en evapotranspiración, respectivamente.

En general, las zonas más afectadas por aumentos en la humedad del suelo se encuentran al sur de la MCMC, mientras que las subzonas con disminuciones se encuentran al norte. En cuanto a la evapotranspiración, los aumentos se presentan al sur, y las disminuciones al norte, con grandes excepciones en el bajo Cauca – bajo San Jorge, y el Bajo Nechí.

Tabla 13. Subzonas hidrográficas con mayores porcentajes de cambio en la humedad de la primera capa del suelo, y escenario bajo el que se presenta ese cambio.

Código Subzona	Nombre Subzona	Mayor porcentaje de cambio	Escenario de mayor cambio
2802	Medio Cesar	-12.67	lu1cc4
2804	Río Ariguaní	-11.98	lu1cc4
2902	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (md)	-11.26	lu1cc4
2901	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (mi)	-10.02	lu1cc4
2908	Ríos Chimuica y Corozal	-9.57	lu1cc4
2905	Canal del Dique margen izquierda	-9.52	lu1cc4
2906	Cga Grande de Santa Marta	-9.29	lu1cc4
2903	Canal del Dique margen derecho	-9.00	lu1cc4
2801	Alto Cesar	-8.51	lu1cc4
2626	Directos Bajo Cauca - Cga La Raya entre río Nechí y brazo de loba	-6.88	lu1cc4
2904	Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y desembocadura al mar Caribe (mi)	-6.74	lu1cc4
2805	Bajo Cesar	-6.34	lu1cc4
2907	Directos Bajo Magdalena entre El Banco y El Plato (md)	-6.32	lu1cc4
2321	Quebrada El Carmen y Otros Directos al Magdalena Medio	-5.49	lu1cc4
2109	Juncal y otros Rios directos al Magdalena	5.03	lu1cc4
2630	Ríos Lili, Melendez y Canavalejo	5.75	lu1cc4
2113	Río Aipe, Río Chenche y otros directos al Magdalena	6.03	lu1cc4
2102	Río Timaná y otros directos al Magdalena	6.65	lu1cc4
2622	Río Desbaratado	7.03	lu1cc4

Tabla 14. Subzonas hidrográficas con mayores porcentajes de cambio ETP, y escenario bajo el que se presenta ese cambio.

Código Subzona	Nombre Subzona	Mayor porcentaje de cambio	Escenario de mayor cambio
2804	Río Ariguaní	-14.6548151	Lu1cc4
2902	Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (md)	-13.3596812	Lu1cc4
2802	Medio Cesar	-13.2715169	Lu1cc4
2908	Ríos Chimuica y Corozal	-13.2276798	Lu1cc4
2903	Canal del Dique margen derecho	-11.1063942	Lu1cc4
2106	Ríos directos Magdalena (md)	10.4148841	Lu1cc4
2622	Río Desbaratado	10.795431	Lu1cc4
2312	Río Carare (Minero)	11.0914558	Lu1cc4
2630	Ríos Lilí, Melendez y Canaveral	11.1368344	Lu1cc4
2634	Ríos Cali	11.1505619	Lu1cc4
2102	Río Timaná y otros directos al Magdalena	11.3749802	Lu1cc4
2111	Río Fortalecidas y otros	11.9907217	Lu1cc4
2701	Río Porce	12.6625361	Lu1cc4
2304	Directos Magdalena entre Ríos Guarín y La Miel (mi)	13.4258076	Lu1cc4
2110	Río Neiva	13.4925063	Lu1cc4
2302	Río Guarín	13.8912689	Lu1cc4
2201	Alto Saldaña	15.743051	Lu1cc4
2619	Río San Juan	16.8136458	Lu1cc4
2703	Bajo Nechí (md)	19.3859128	Lu1cc4
2702	Alto Nechí	19.9244536	Lu1cc4
2301	Río Gualí	25.0118803	Lu1cc4
2616	Río Tapias y otros directos al Cauca	29.561463	Lu1cc4
2305	Río La Miel (Samaná)	61.3617641	Lu1cc4

Sobre cambios en ET por subzona, se nota aquí un caso extremo en la subzona del río la Miel, con un aumento del 61% en la evapotranspiración promedio, bajo efecto combinado del cambio climático y de cambio en el uso del suelo. Su ubicación en zona de alta montaña (con ET bajos para la línea base, alrededor de 49 mm/mes) generan valores porcentuales mucho más dramáticos (aumento hasta alrededor de 79 mm/mes) pues parece ser una zona muy sensible al efecto de la cobertura vegetal existente.

5.4 Acerca de la incertidumbre en los resultados

La literatura acerca de modelación hidrológica de gran escala ha identificado cuatro fuentes principales de incertidumbre en los resultados (Döll et al. 2008; Song et al. 2011):

1. Los datos de entrada del modelo, incluyendo mapas estáticos, variables meteorológicas y valores paramétricos asociados.
2. La discretización espacial y temporal del modelo, es decir, la representación matemática que el modelo hace de la realidad, tanto en escala, como en enfoque en la resolución numérica.
3. La estructura del modelo, es decir, la aproximación simplificada que asume el modelo respecto a los procesos hidrológicos investigados y su aproximación numérica para resolver las parametrizaciones correspondientes (ecuaciones diferenciales, ecuaciones empíricas, etc.)
4. Las condiciones iniciales y de frontera del modelo, que determinan su punto de partida y su evolución posterior

Estas fuentes de incertidumbre se propagan en cascada a través de la modelación, por lo que se hace necesario caracterizarla para entender cómo se propagan a través del proceso de cálculo, e incluirlas dentro del estudio global de incertidumbre, luego de verificar y validar los modelos (Song et al. 2011).

Sin embargo, esta tarea no es sencilla, esencialmente porque no existen metodologías definidas para analizar la incertidumbre y su propagación en modelos hidrológicos complejos de gran escala, a diferencia de modelos hidrológicos conceptuales (Song et al. 2011).

Nunca fue el alcance de esta tesis realizar una cuantificación detallada de la incertidumbre a gran escala, esencialmente porque el proceso de implementación de un modelo de las características de MESH es en sí mismo todo un reto.

Ahora bien, esto no quiere decir que se haya dejado de lado el análisis de la incertidumbre. Dentro del desarrollo de esta tesis, se realizó un esfuerzo por

entender de manera cualitativa cada una de las fuentes de incertidumbre enunciadas arriba y por conocer su posible efecto sobre las salidas del modelo, para entender las limitaciones asociadas con los resultados aquí descritos.

Datos de entrada

Los datos de entrada constituyen una de las fuentes principales de incertidumbre del modelo, tanto a nivel de mapas estáticos, como de variables meteorológicas, y al mismo tiempo son una de las fuentes de incertidumbre más difíciles de entender y cuantificar (Döll et al. 2008; Song et al. 2011).

En el caso de los mapas estáticos, que contienen información acerca de coberturas vegetales, tipos de suelo, elevaciones y otras características del paisaje, el uso de información secundaria de base, como mapas de suelo y mapas de cobertura, bien sea a partir de información de campo o de sensores remotos, permite disminuir la incertidumbre de estos datos de entrada en la modelación (Zhao and Li 2015). Este enfoque fue mantenido en el marco de este trabajo, utilizando información oficial de instituciones nacionales, compilada en el marco del proyecto de investigación Earth2Observe. Se espera que el uso de información validada por parte de las instituciones nacionales y otros entes, permita corregir algunos de los errores que se pueden presentar en bases de datos globales, gracias por ejemplo al desarrollo de bases de datos mezcladas (datos in situ más datos globales) e información secundaria como visitas de campo y resultados de pruebas piloto (IDEAM et al. 2008).

En el caso de las variables meteorológicas se realizaron rigurosas interpolaciones a partir de datos puntuales de estaciones. Pese al cuidado que se tuvo, estas interpolaciones presentan limitaciones que son imposibles de corregir y que están asociadas a zonas con baja densidad de estaciones, complejidades de los campos, por ejemplo asociadas con la orografía, incertidumbre en el proceso de interpolación, e incluso errores en la medición (Döll et al. 2016).

Una primera aproximación al análisis de las diferencias espaciales entre los datos meteorológicos globales y locales fue la validación de los mismos utilizando una base de datos global, ERA-I, para temperatura, radiaciones y humedad y la base de datos de precipitación, MSWEP (Dee et al. 2011; Weedon et al. 2014; Beck et al. 2017), tanto para la MCMC, como para la CRC. Los resultados mostraron diferencias importantes fundamentalmente para las variables de precipitación y radiación. La falta de información para otras variables, como velocidad del viento y humedad específica, impidió realizar una validación de este tipo.

Para el caso de la precipitación, dada la escala del producto MSWEP que incluye ERA-I y asimilación de datos (0.25° de tamaño de rejilla) (Beck et al. 2017), se utilizó la información interpolada a partir de datos locales, puesto que la utilización de cerca de 2117 estaciones representa de mejor forma la precipitación, especialmente en zonas montañosas. En cuanto a la radiación, la base de datos interpolada a partir de observaciones presentó valores netos superiores en cerca de 1.5 mm/día (datos equivalentes de evaporación de mm de agua) por encima de los datos globales, un valor sumamente alto, que sin embargo se puede ver compensado por la disponibilidad casi sin restricción de agua para evapotranspiración, como reporta Döll et al. 2016, en un ejercicio de comparación de bases de datos meteorológicos.

Ahora bien, para disminuir la incidencia de esta fuente de incertidumbre, la calibración paramétrica utilizando datos de caudales se alza como una buena aproximación (Davison et al. 2016; Döll et al. 2016). La variación que se hace de los parámetros ajusta el modelo a las observaciones, lo que permite obtener resultados menos inciertos, pero puede generar problemas asociados de equifinalidad (Freer et al. 1996; Döll et al. 2008, 2016; Song et al. 2011; Beven 2012; Pechlivanidis y Arheimer 2015). La equifinalidad como fuente de error, se tiene en cuenta más abajo, en el marco de la incertidumbre proveniente de los valores paramétricos.

En cuanto a la escala temporal a la que corre el modelo, los resultados a nivel intra diario mostraron diferencias importantes frente a bases de datos globales, que son imposibles de cuantificar en términos de errores, dado que no se tuvo acceso a datos en tierra a esta resolución temporal, ni validaciones a nivel intra diario de alguna de las bases de datos globales utilizadas. Esta fuente de incertidumbre no ha podido por lo tanto ser abordada en su justa dimensión para cada variable, especialmente para la precipitación, pero su efecto en los resultados puede verse en valores pico de caudales más bajos y en una mayor importancia regional de la escorrentía subsuperficial frente a la superficial, debido a valores más bajos en la intensidad de la precipitación que los reales.

Parámetros del modelo

La sensibilidad de las salidas del modelo frente a los valores paramétricos es una de las principales fuentes de incertidumbre (Döll et al. 2008; Song et al. 2011). Sin embargo, estos parámetros, aunque sean físicamente basados, no pueden medirse debido a las diferencias de escala entre mediciones de campo, y modelación hidrológica (Gottschalk et al. 2001). Ante esto, el proceso de calibración – validación es el método más expreso y ampliamente utilizado para ajustar el comportamiento del modelo a los datos observados.

Ahora bien, el proceso de calibración puede llevar a problemas de equifinalidad, lo que genera más incertidumbre en los resultados. La metodología aplicada en este trabajo ha intentado contrarrestar estos problemas por medio de tres aspectos: la calibración multiobjetivo por pasos, utilizando diferentes puntos de control en cada campaña de calibración (Pechlivanidis y Arheimer 2015; Döll et al. 2016), el uso de información secundaria (rangos de valores de parámetros según estudios de suelos y de las diferentes coberturas vegetales, así como información proveniente de la calibración del modelo en la CRC) para restringir el rango de búsqueda de los parámetros a valores posibles (Pechlivanidis y Arheimer 2015), y una discretización espacial basada en el concepto de GRU (Haghnegahdar et al. 2015), con el fin de limitar el número de parámetros, sin sacrificar en demasía el rendimiento del modelo; este último punto es discutido en mayor detalle más adelante.

Adicionalmente, el proceso de validación en puntos ciegos busca validar el funcionamiento del modelo en puntos de control que no fueron utilizados durante la calibración, para así tener una mayor certeza acerca del desempeño del modelo y de los resultados de simulación.

Por otra parte, la realización de un análisis de incertidumbre paramétrica y de sensibilidad sobre los parámetros del modelo puede guiar el proceso de calibración y dar información valiosa acerca del rendimiento del modelo y su funcionamiento general (Döll et al. 2008; Song et al. 2011, 2015; Haghnegahdar et al. 2017). Sin embargo, para el caso de la MCMC se tiene una limitante poderosa en el costo computacional por corrida, pues este tipo de análisis requiere de una gran cantidad de puntos muestreados en el espacio parametral.

Como aproximación inicial se realizó un análisis de sensibilidad sobre el modelo implementado en la CRC, pues su menor tamaño y tiempo de cálculo permite realizar el muestreo. La utilización de la metodología *Regional Sensitivity Analysis* (RSA) (Hornberger and Spear 1981) tal cual fue incluida en el software MCAT (Wagener et al. 2001), muestreando el espacio parametral por medio de la aproximación DDS – AU (Dynamically Dimensioned Search – Uncertainty Analysis) (Tolson and Shoemaker 2008b) permitió contar con resultados cualitativos, muy importantes para entender mejor el funcionamiento del modelo.

Los resultados, que se muestran en el Anexo H (ver pág. 219), indican gran sensibilidad de los parámetros asociados a la cobertura vegetal, mientras que indicaron nula sensibilidad de los parámetros del módulo de flujo base. Esto es en cierta forma contradictorio, dado que el rendimiento del modelo de la CRC mejoró luego de incluir el módulo de flujo base, pero podría indicar que el modelo ya es lo

suficientemente complejo para simular los flujos hídricos y que su mejora debe concentrarse en una mejor parametrización, aún más extensiva.

Discretización espacial y estructura del modelo

Los efectos de la discretización espacial utilizada en la implementación de un modelo parecen ser dependientes de la cuenca y del modelo (Döll et al. 2008), y están íntimamente relacionados con la escala temporal escogida para simulación, y con los valores paramétricos efectivos que se pueden obtener luego del proceso de calibración (Gottschalk et al. 2001).

En el caso del ejercicio de modelación aquí reportado se utilizó la discretización basada en el concepto de GRU (Haghnegahdar et al. 2015). Dados los resultados de calibración – validación en la CRC, se decidió utilizar la elevación como valor de clasificación de la distribución espacial de los parámetros. Sin embargo, considerando que la MCMC es mucho más heterogénea en cuanto a coberturas vegetales que la CRC y que la simulación con 7 GRU clasificados por cobertura dio resultados interesantes en la métrica bias, se utilizó adicionalmente una aproximación en mosaico para los parámetros de la cobertura vegetal.

Esta decisión tiene coherencia, dada la importancia del control fisiológico de la vegetación en el flujo de calor latente en el trópico y está en armonía con los resultados del análisis de sensibilidad en la CRC.

En cuanto a la estructura del modelo y su correspondiente aproximación numérica, si bien no se hizo una comparación rigurosa, se probaron diferentes estructuras modulares para la CRC, lo que da un parte de tranquilidad sobre la aceptabilidad de las simulaciones. Sin embargo, es posible tratar de manera más rigurosa diferentes métodos de resolución numérica bajo la misma estructura, con el fin de investigar más a fondo este tema, pues se utilizó las aproximaciones numéricas ya implementadas en MESH.

Condiciones iniciales y de frontera

Dado que no es posible contar con un estado inicial y valores de frontera para ninguna de las modelaciones realizadas, se decidió utilizar la aproximación de calentamiento previo del modelo, con un año de datos. Esto con el fin de evitar que el estado inicial del modelo generara errores en los resultados, que se vieran reflejados en valores incorrectos en las salidas, permitiendo alcanzar un equilibrio en los valores de almacenamiento (Akkermans et al. 2012).

Rendimiento del modelo para la MCMC

El tratamiento metodológico que se ha hecho de las fuentes de incertidumbre permite identificar las limitaciones en la aplicación del modelo y acotar la incertidumbre sobre los resultados. Indudablemente se debe analizar en detalle la incertidumbre global de los resultados, para lo cual pueden existir diferentes aproximaciones.

Pese a las limitaciones anotadas arriba y a las posibles mejoras que pueden ser incluidas y que se sugieren como parte de las recomendaciones de este estudio, es posible afirmar que el modelo produce resultados razonables, y que sus valores pueden ser utilizados en los diferentes tipos de análisis que se puedan requerir, con las limitaciones que se han señalado en términos temporales y espaciales.

Ahora bien, un siguiente paso en el análisis de la incertidumbre global del modelo puede pasar por una comparación a través de un ensamble hidrológico (Döll et al. 2008). Los resultados de modelos individuales en el proyecto Earth2Observe, tanto de modelos hidrológicos globales (Schellekens et al. 2017), como de modelos regionales y locales (Rodríguez et al. 2017), han sido organizados en ensambles y existen resultados preliminares que muestran que MESH presenta buenos resultados en la MCMC para las estaciones con áreas aferentes más grandes; nuevos análisis pueden aportar más observaciones acerca de la incertidumbre de los resultados del modelo.

Otra posibilidad es la asimilación de datos provenientes de sensores remotos, incluyendo datos de caudales (López et al. 2017) o datos de otras variables hidrológicas, como humedad del suelo. El uso de estas bases de datos permitirá realizar un proceso de calibración más extensivo, que no solo se centre en los valores de caudal (Xu et al. 2015; Döll et al. 2016).

Incertidumbre de los escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo

Existen cuatro fuentes de incertidumbre en el análisis de escenarios de cambio climático (Döll et al. 2016):

1. Incertidumbre en las perturbaciones antrópicas, lo que incluye emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles, cambios en el uso del suelo, e incluso en la gestión del recurso hídrico.
2. Incertidumbre asociada con las deficiencias del modelo, lo que genera resultados distintos para dos modelos con datos de entrada idénticos, en parte relacionada con procesos no incluidos en la modelación de los

modelos de circulación global, en parte asociada con una escala espacial de análisis sumamente gruesa.

3. Variabilidad interna del sistema climático, o fluctuaciones propias y naturales del sistema en ausencia de intervención humana o incluso natural (actividad solar, erupciones volcánicas).
4. Incertidumbre asociada con la corrección por sesgo de las salidas de los modelos de circulación global.

Pese a estas fuentes de incertidumbre, se ha encontrado que la utilización de ensambles de modelos mejora la representación de la climatología de una base de datos observados (IDEAM 2015), y por lo tanto, una proyección, o escenario de cambio climático, necesita estar basado en la mayor cantidad de información conjunta producida por un ensamble de modelos (IDEAM 2015).

La tercera comunicación de cambio climático (IDEAM 2015) es el resultado de un ensamble de datos mensuales de 20 modelos de circulación global, incluidos en el quinto informe de cambio climático (IPCC 2013). Los resultados se compararon contra estaciones para el periodo histórico 1976-2005, y así mismo los escenarios se construyeron para esos mismos puntos.

Así mismo, se utilizó el método de ensamble Promedio de Fiabilidad Conjunta (*REA* por sus siglas en inglés) (IDEAM 2015). El método se basa en el criterio de desempeño, o capacidad del modelo para reproducir aspectos del clima presente, y en la convergencia, o mayor fiabilidad de un escenario al haber mayor convergencia entre los modelos.

Esto significa que la metodología aquí utilizada para conformar los escenarios de cambio climático busca disminuir en la mayor medida la incertidumbre asociada. Sin embargo, esta incertidumbre depende de factores externos a los modelos (los escenarios radiativos) e internos a los modelos (limitaciones estructurales). Pese a esto, la robustez y el grado de certeza es el más alto que se puede obtener, dadas la información y las herramientas disponibles actualmente.

En cuanto al escenario de cambio en el uso del suelo, su mayor fuente de incertidumbre está asociada con posibles cambios en las perturbaciones antrópicas. Puesto que el escenario se basa en patrones de deforestación obtenidos a partir de sensores remotos, cambios en los patrones espaciales provocarían errores en estas proyecciones, los cuales son imposibles de tener en cuenta dentro del modelo de uso del suelo. Por lo anterior, se debe asumir que no existe un modelo de cambio de cobertura vegetal que sea realmente confiable,

dada la naturaleza impredecible de varios de los factores que entran en juego (González et al. 2011).

Esto indica que, si bien los escenarios se han construido basados en información proveniente de fuentes confiables, y por lo tanto es acertado pensar que sus tendencias espaciales y temporales son válidas, sobre todo en el caso del escenario de cambio en el uso del suelo, su uso está abierto a discusiones y nuevos escenarios deberán ser construidos a medida que más información se encuentre disponible.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Se han presentado resultados acerca de la implementación del modelo MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca (MCMC), inicialmente aplicado en la Cuenca del río Coello (CRC).

La aplicación del modelo en la CRC fue importante, pues permitió definir la configuración general del modelo, con la correspondiente identificación de problemas y limitaciones de la modelación efectuada ligados a la equifinalidad del espacio paramétrico. Así mismo, permitió ajustar la metodología de calibración para la MCMC.

Se presentaron tres problemas importantes en la modelación de la MCMC utilizando MESH, ligados a la complejidad del modelo y el tamaño de la cuenca:

- Dada la escala de 0.1° de tamaño de rejilla, el modelo requería cerca de 20 minutos para simular tres años de información, sobre 2215 celdas
- Una mayor fidelidad del modelo para representar la heterogeneidad incurría en costos de eficiencia computacional, y tiempos de corrida más largos.
- Un modelo más simple puede ser poco fiable en sus simulaciones, por lo que las salidas no necesariamente ajustaran a las observaciones

La respuesta fue utilizar una configuración de tipo mosaico de 28 GRU, acotando el No. De GRU por celda a un máximo de 7 (según cobertura vegetal), y conformando espacialmente 4 grupos según la elevación. Así mismo, se decidió utilizar el cluster PLATO facilitado por la Universidad de Saskatchewan, en Canadá, para acelerar el proceso de simulación.

Las campañas de calibración evidenciaron un agudo problema de equifinalidad, y en general malos resultados en la Cuenca Alta del río Magdalena y del Cauca, en algunas subcuencas del río Magdalena ubicadas en la Cordillera Central, en la parte alta del río Chicamocha, y en la parte alta del río Cesar. En general, el modelo fue incapaz de simular los caudales base en estas zonas, por lo que pueden existir limitaciones del modelo, o problemas en los valores meteorológicos.

De otra parte, el modelo presenta buenos resultados para las cuencas medias del río Cauca y para los puntos de control ubicados sobre el Magdalena medio y bajo, y el Chicamocha medio.

Dadas las particularidades de los resultados de las campañas de calibración, se escogió el conjunto de parámetros obtenido de la campaña de calibración 6 para simular escenarios de cambio climático y de cambio en el uso del suelo, y analizar sus posibles impactos sobre la hidrología de la Macro Cuenca.

Los principales impactos de los escenarios de cambio climático encontrados fueron los siguientes:

1. Mayores tasas de evapotranspiración en la zona sur de la MCMC, y menores tasas en la zona norte, con promedios generales de aumento entre 0.26% y 3.38%, y enormes variaciones de tipo regional y temporal, pues existen casos de subzonas hidrográficas con variaciones de más del 10%.
2. Cambios importantes en la humedad de la primera capa del suelo, con aumentos importantes en toda la zona sur de la MCMC de hasta 21%, y disminuciones generales en la zona norte de hasta 28%.
3. Asimismo, aumentos en el almacenamiento de agua en el suelo entre 7.07% y 8.00%.
4. Aumentos en los valores de escorrentía para los escenarios de cambio climático. Estos cambios aumentan ligeramente los valores del régimen de caudal en las estaciones con áreas aferentes más grandes, pero hay excepciones en esta tendencia a nivel regional, ligadas a las características de las diferentes zonas hidrográficas.
5. Aumento importante de la escorrentía proveniente del interflujo, y disminución de la escorrentía proveniente de percolación hacia acuíferos (flujo base)

En cuando a los impactos del escenario de cambio en la cobertura vegetal, se encontraron los siguientes hallazgos:

1. Aumento drástico de la evapotranspiración a nivel local, principalmente en la zona norte de la Cordillera Central. Asimismo, se presentaron disminuciones en los valores de evapotranspiración en el Magdalena Medio, probablemente debido a menor disponibilidad de agua en la zona, y un mayor control fisiológico del flujo de calor latente.
2. Disminución en área de zonas de evapotranspiración negativa, cuya existencia está probablemente ligada a zonas de captación de niebla, o fenómenos de condensación nocturnos.

3. Disminuciones de la humedad del suelo en el Magdalena Medio, Cordillera Oriental y Cordillera Central, con algunos aumentos de carácter local. Asimismo, disminución del almacenamiento del orden de 0.33%
4. Disminución de la escurrentía del orden de 4.25% sobre toda la MCMC, que disminuye ligeramente los valores del régimen de caudal de los puntos de control, una vez más, con excepciones locales ligadas a las condiciones de las subcuencas
5. Ligero aumento del flujo superficial (1,87%) y disminución del interflujo (3.83%) y del intercambio de flujo con el acuífero (4.71%)

A su vez, los impactos combinados de cambio climático y cambio en la cobertura vegetal fueron los siguientes:

1. Mayores tasas de evapotranspiración a nivel local y regional. El cambio en la cobertura vegetal puede incluso invertir la tendencia que se presenta solo bajo cambio climático en algunos puntos entre la Cordillera Central y la zona de la Mojana
2. Mayores afectaciones en las tendencias espaciales de cambio en la humedad llegando también a invertir la tendencia en zonas de la Cordillera Central.
3. Aumento importante del interflujo (entre 8.53 y 11.61%)
4. Disminuciones en los flujos de intercambio con el acuífero (entre 12.16 y 10.96%).
5. Aumento ligero de los valores del régimen de caudales de los puntos de control, pero sin cambios bruscos en la forma de las CDC. Estas tendencias, una vez mas,, tienen grandes diferencias a nivel regional ligadas a las condiciones de subcuenca.

Estos datos, que pueden ser contradictorios, especialmente en lo referente a cambios en la humedad del suelo y en el almacenamiento, indican sin embargo que los flujos de agua a lo largo de la MCMC serán más rápidos. Esta afirmación es importante, pues en el trópico, los flujos de agua son mucho más rápidos que en zonas templadas. Un aumento adicional en la velocidad de los flujos significa que se necesitará un mayor control y vigilancia para evitar problemas a nivel local y regional.

Una mayor velocidad en los flujos hídricos explicaría que una tasa de evapotranspiración mayor y un valor más bajo de humedad del suelo afecten ligeramente los valores mas no las formas de las CDC, por ejemplo. Sin embargo, esta rapidez indudablemente va a tener impactos en eventos extremos, de manera muy diferente a nivel regional, que pueden resumirse así:

- En la zona norte de la MCMC, se presentará una disminución de la evapotranspiración pese a aumentos en la temperatura de la zona bajo todos los escenarios de cambio climático. Esta disminución puede estar ligada a un control de la ETP por menor disponibilidad de agua, como se observa en los valores más

bajos de humedad del suelo. Los efectos pueden ser sequías más fuertes, y menor disponibilidad de agua para mitigar sus efectos

- En cuanto a la zona sur, más montañosa, la humedad de la primera capa del suelo tiende a aumentar, así como la tasa de la ETP. Esto podría indicar que una gran parte de la precipitación adicional que caerá en esta zona según los escenarios de cambio climático se traducirá en suelos más saturados, en mayores tasas de ETP, y en aumentos ligeros en los valores del régimen de caudales, sin afectación de la forma de la CDC. Los efectos pueden ser mayores probabilidades de inundaciones y remociones en masa, dado que los suelos tenderán a estar más humedecidos, y a que esta zona es muy montañosa.

La aceleración de flujos impactará sobre todo en los flujos lentos, esencialmente en la percolación. Los caudales de ríos provendrán en mayor medida de las primeras capas del suelo, y menor de acuíferos. Esta disminución de los flujos lentos impactará por lo tanto los valores de flujo base en ríos, y supondrá un reto para la gestión del recurso hídrico en épocas de sequía.

En cuanto a la cobertura vegetal, esta se vislumbra como una poderosa herramienta para mitigar algunos de los efectos del cambio climático. Por ejemplo, es capaz de provocar un menor aumento en las tasas de ETP, menores disminuciones en la percolación, y en general, una ralentización de los flujos hídricos a lo largo de la Macro Cuenca.

Para utilizar esta herramienta de mitigación del cambio climático, se deben priorizar zonas en donde los efectos serán más pronunciados. En general, detener la tasa de deforestación en la zona norte de la MCMC puede tener efectos más agudos en la tasa de ETP, en especial en la zona de influencia de la Sierra Nevada de Santa Marta, así como en áreas de alta montaña al norte de la Cordillera Central. En cuanto a toda la zona andina ubicada al sur de la MCMC, una menor tasa de deforestación podría prevenir procesos de remoción en masa que muy seguramente aumentarán, ligados a unos suelos más húmedos.

Sobre el rendimiento del modelo, pese a limitaciones propias de los datos de entrada utilizados, y las incertidumbres asociadas a la parametrización y discretización espacial, se considera que los resultados de los pasos de calibración arrojan resultados aceptables y razonables, con limitantes espaciales en el rendimiento, principalmente en cuencas pequeñas del Magdalena Alto, y otras zonas de alta montaña.

Finalmente, se ha creado una sinergia con el Earth2Observe Colombia, gracias a un fluido intercambio de información. En el caso de los datos de entrada al modelo, la información meteorológica y los mapas estáticos fueron armonizados con el marco general del proyecto, mientras que los resultados están comenzando a ser implementados en la elaboración de un ensamble multi-modelo para la MCMC, y en la comparación de resultados junto a otros modelos.

6.2 Recomendaciones

El presente trabajo de tesis ha abierto interesantes líneas de investigación que, se espera, continúen en el tiempo, y permitan resolver algunas dudas, y mejorar la implementación actual del modelo.

Estas recomendaciones se presentan a continuación:

1. Debe evaluarse de manera más rigurosa el resultado de la calibración automática de MESH en la MCMC, con el fin de buscar mejoras en la simulación en áreas de bajo rendimiento en la eficiencia del modelo. Este proceso debe centrarse principalmente en la zona del Alto Magdalena y subcuencas altas de la Cordillera Central, Alto Chicamocha, y Alto Cesar. Las mejoras pueden incluir evaluaciones ligadas a los datos meteorológicos o sobre los mapas estáticos, cambios en la configuración del modelo, o inclusión de módulos adicionales de simulación de fenómenos no incluidos por el momento en MESH.
2. Puede llegar a ser importante comparar diferentes estructuras en el módulo de flujo base, con el fin de definir el que mejor se ajuste a los fenómenos que se presentan en la MCMC, y contrastar los resultados obtenidos con datos de percolación y aporte de aguas subterráneas, que permitan mejorar los resultados obtenidos, especialmente en zonas de alta montaña como el Alto Magdalena, Cordillera Central, Alto Chicamocha, Alto Cauca, y Sierra Nevada.. Así mismo, sería interesante explorar la posibilidad de acoplar el modelo MESH a un modelo hidrogeológico, en una cuenca piloto, para observar el rendimiento de un acoplamiento de este tipo.
3. Asimismo, debe realizarse un análisis más extenso de comparación de parametrización de la heterogeneidad de la superficie, utilizando datos adicionales a los de elevación y cobertura vegetal.
4. Se hace necesario analizar el impacto de la incertidumbre asociada a los datos de entrada, tanto meteorológicos como de mapas estáticos, en los resultados obtenidos. Para el primero puede realizarse una comparación utilizando otras bases de datos, mientras que para el segundo puede implementarse cambios dinámicos en la cobertura vegetal a través del periodo de tiempo simulado
5. Así mismo, sobre los datos meteorológicos, se hace importante contar con una base de datos de precipitación a nivel intradiario, tanto para modelar el clima presente, como para simular el cambio climático.
6. Puede llegar a ser importante aplicar otros algoritmos de calibración especialmente diseñados para modelos de gran costo computacional y verificar la metodología implementada para calibraciones multiobjetivo.

7. Es importante generar una clasificación de los ríos de la MCMC que tenga en cuenta regímenes climáticos, geomorfología y coberturas, con el fin de facilitar el análisis de resultados de diferentes corrientes, a nivel de meso escala
8. Debe incluirse información acerca de embalses, y en general cuerpos lenticos en la MCMC, cuya metodología debe desarrollarse, implementarse y evaluarse. Esto con el fin de mejorar los resultados del modelo.
9. Debe incluirse un módulo adicional para la simulación de intercambio de flujos en ciénagas, principalmente ligado a la existencia de caudales laterales en el proceso de tránsito, que permita analizar de manera detallada la hidrología de la zona de la Mojana.
10. Se hace importante realizar un proceso de validación en las zonas donde se simularon evapotranspiraciones negativas. Su importancia radica en la necesidad de entender el fenómeno de flujos verticales en estas zonas, desde el punto de vista energético
11. Puede ser importante estudiar la incertidumbre de los parámetros calibrados, comparándolos con valores medidos *in situ*, así como con bases de datos provenientes de sensores remotos, con el fin de verificar rangos más acordes con valores tropicales, en especial aquellos ligados a la cobertura vegetal y a las características de los suelos. Si bien es cierto que los parámetros que utiliza el modelo son parámetros efectivos, contrastar estos valores efectivos con valores reales medidos en campo o por medio de sensores remotos puede guiar el proceso de calibración-validación, y disminuir los problemas ligados a la equifinalidad.
12. Se hace importante realizar un análisis de sensibilidad para las condiciones tropicales imperantes en la MCMC. Dadas las necesidades de los análisis de sensibilidad (gran cantidad de iteraciones) puede llegar a ser importante la implementación de análisis más simples, o la realización de este tipo de análisis en algunas subcuencas.
13. Se considera importante realizar comparaciones entre implementaciones con escalas espaciales diferentes, para observar los efectos de la escala espacial sobre la eficiencia del modelo. Así mismo, sobre el punto 5 (base de datos de precipitación intradiaria), es necesario comparar diferentes pasos de tiempo en la escala intradiaria, y observar sus implicaciones sobre la eficiencia del modelo.
14. Finalmente, puede llegar a ser importante efectuar un análisis de la incertidumbre asociada a la estructura del modelo, comparando los resultados con otros modelos implementados en la MCMC. Asimismo, deben reevaluarse los análisis de efectos de cambio climático y cambio en usos de suelo, si se requieren cambios en la estructura del modelo que se reflejen en mejores rendimientos de simulación.

ANEXOS

A. Creación de bases de datos de mapas meteorológicos y validación para la Cuenca del río Coello y para la Macro Cuenca Magdalena Cauca

A continuación se muestra, paso por paso, la metodología general seguida para la conformación de las bases de datos meteorológicas. En la segunda parte, se muestran diversas comparaciones de estas bases de datos con otros productos, a modo de validación de la información.

Toda la información utilizada en el marco de este trabajo de tesis proviene del proyecto Earth2Observe Colombia. Las bases de datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas provienen del trabajo que ya había sido realizado en el marco del proyecto, las bases de datos de temperatura media, brillo solar (para calcular radiación de onda corta), radiación de onda larga (calculada a partir de temperatura media) y humedad relativa, fueron obtenidas a partir de datos observados, o por ecuaciones empíricas, utilizando datos observados en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia. Las bases de datos de velocidad del viento y presión atmosférica provienen de las bases de datos globales del proyecto Earth2Observe (<https://wci.earth2observe.eu/>).

EL periodo de interpolación abarca el periodo 1980-2012, para todas las series climatológicas, y utiliza una escala de 0.1° (alrededor de 10 km) , en concordancia con el marco general de modelación escogido para el caso estudio del proyecto.

1. DIAGNÓSTICO E INTERPOLACIÓN

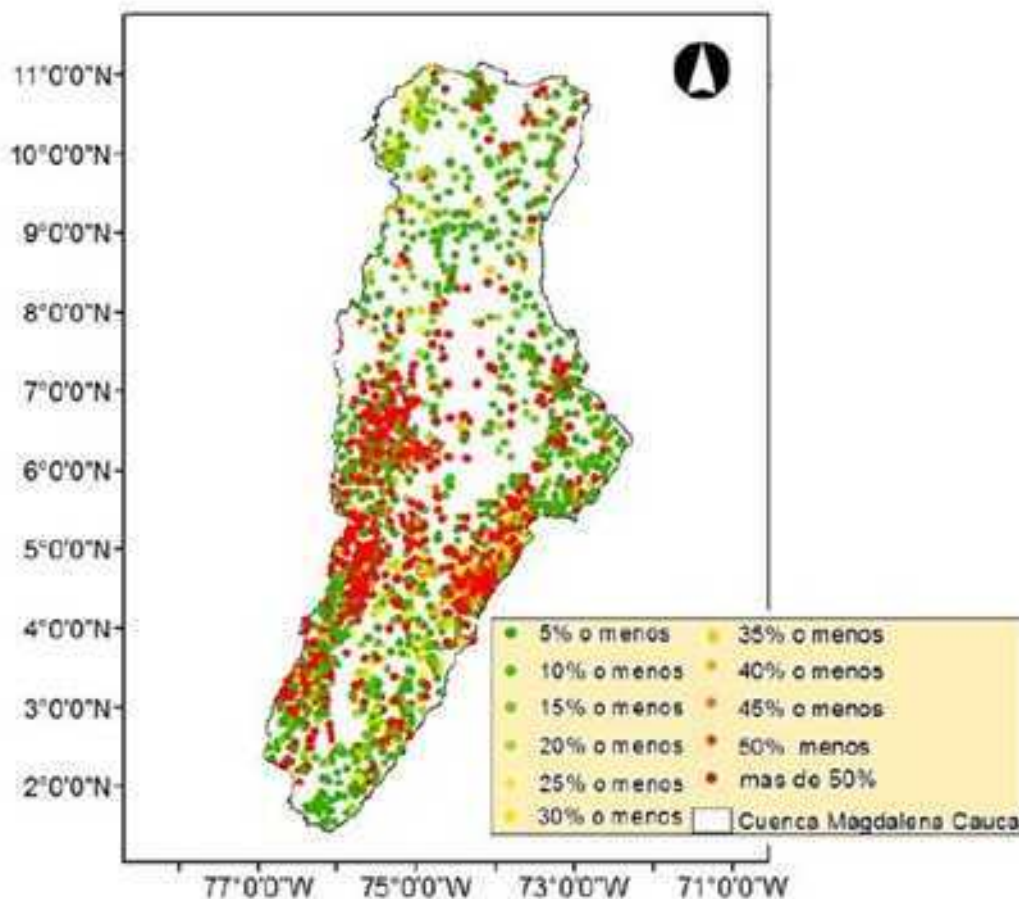
En esta fase se define el número. de estaciones por variable, así como la metodología general de interpolación por variable meteorológica.

- **Precipitación**

En el marco del proyecto Earth2Observe Colombia, se realizó un amplio conjunto de experimentos de interpolación de campos de precipitación, para definir el método de interpolación a utilizar.

Los métodos utilizados en la comparación cruzada fueron: IDW, método del polinomio local, método de Splines, método de Kriging, Método de CoKriging con respecto a la altura, a la distancia al mar, y a la distancia respecto a la Amazonía, y Kriging con deriva externa (altura)

El método escogido fue el de Kriging con deriva externa, utilizando como información secundaria el Modelo Digital del Terreno de 0.1° (alrededor de 10 km) elaborado en el marco del proyecto.



Anexo A - 1 Estaciones de precipitación utilizadas en la interpolación, con su porcentaje de datos faltantes (periodo 1980-2012). Elaborado en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia (Rodríguez et al. 2016)

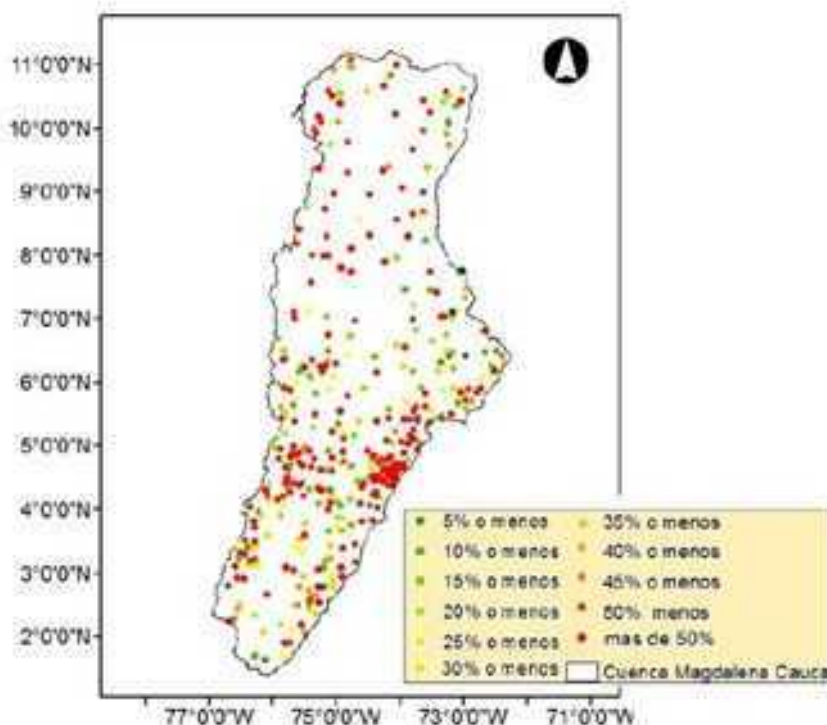
En total se utilizaron 2117 estaciones de precipitación en el proceso de interpolación. Sin embargo, no se efectuó un proceso de llenado de datos faltantes, por lo que se procedió a utilizar la cantidad de información disponible por día (es decir, si para el día N existían solamente 700 estaciones con datos, se utilizaban estas estaciones). Esta aproximación permitió hacer el mayor uso posible de los datos existentes, de una manera eficiente y rápida,

sin pasos previos. Un mapa con las estaciones utilizadas y sus respectivos porcentajes de datos faltantes se puede ver en Anexo A - 1.

- **Temperaturas**

En el caso de la temperatura, se interpolaron tres bases de datos para el periodo de estudio: Temperatura Máxima, Temperatura Mínima y Temperatura Media. Todas las bases de datos utilizaron datos observados y el método de CoKriging con Elevación.

La escogencia del método de interpolación se dio en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia, luego de un largo proceso de comparación y validación para las variables de Temperatura Máxima y Temperatura Mínima. Los métodos analizados en la calibración cruzada fueron: IDW, método del polinomio local, método de Splines, método de Kriging y Método de CoKriging con respecto a la altura. El método de CoKriging con respecto a la altura mostró los mejores resultados y fue escogido para la interpolación de los campos de temperatura.

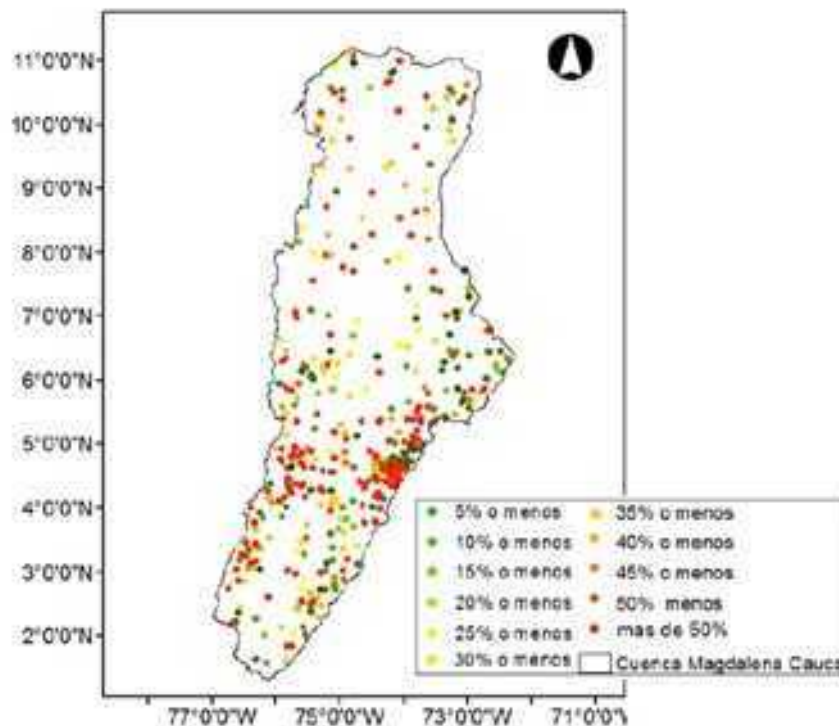


Anexo A - 2 Estaciones de Temperatura Máxima utilizadas en la interpolación, con su porcentaje de datos faltantes (periodo 1980-2012). Elaborado en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia (Rodríguez et al. 2016)

La Temperatura Media no fue incluida en este proceso, sin embargo, debido a la necesidad de escalar los datos a nivel intradiario, y a comparaciones con datos observados que mostraron inconsistencias en la Temperatura Media, calculada a partir de datos de

Temperatura Máxima y Temperatura Mínima, se decidió interpolar esta variable, utilizando el mismo método (CoKriging con respecto a la altura).

Al igual que para el caso de la precipitación, no se llevó a cabo ningún proceso previo de llenado de datos faltantes, pero se utilizó la totalidad de información disponible por día.

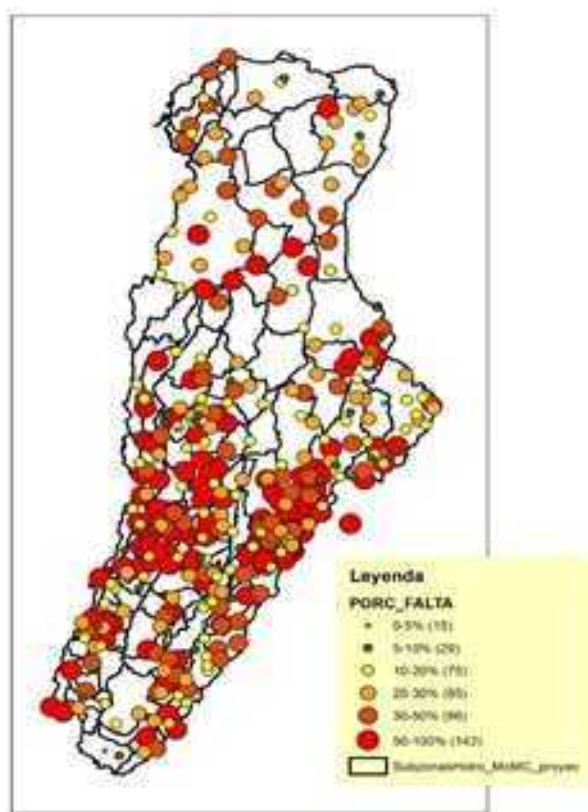


Anexo A - 3 Estaciones de Temperatura Mínima utilizadas en la interpolación, con su porcentaje de datos faltantes (periodo 1980-2012). Elaborado en el marco del proyecto EarthH2Observe Colombia (Rodríguez et al. 2016)

Las estaciones utilizadas en la interpolación de cada variable, así como su porcentaje de datos faltantes se observan en Anexo A - 2, Anexo A - 3, y Anexo A - 4. Como información adicional, se agrega que:

- Se utilizaron 426 estaciones para la interpolación de Temperatura Máxima
- Se utilizaron 440 estaciones para la interpolación de Temperatura Mínima
- Se utilizaron 392 estaciones para la interpolación de Temperatura Media

Al igual que en el caso de la precipitación, el uso del Modelo Digital del Terreno a escala 0.1° (alrededor de 10 km) se hizo necesario.



Anexo A - 4 Estaciones de Temperatura Media utilizadas en la interpolación, con su porcentaje de datos faltantes (periodo 1980-2012). Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia

- **Radiación de onda corta**

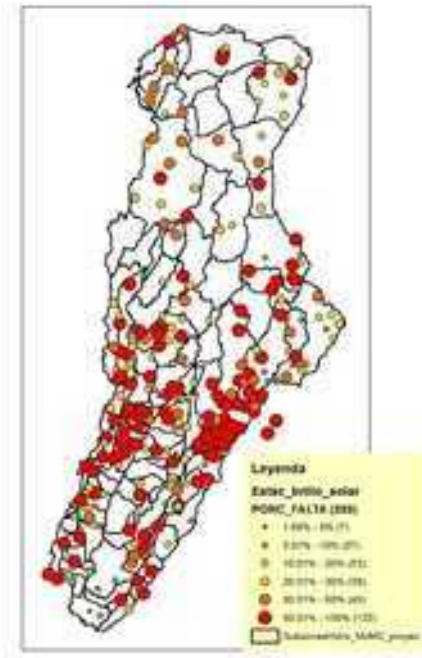
La Radiación de Onda Corta es una variable de gran importancia en los modelos *Land Surface*, debido a que se utiliza (junto a la Radiación de Onda Larga) en el balance energético. Sin embargo, es también una de las variables que presenta mayor escasez de datos en su medición.

Para el caso de Colombia, como se observa en Anexo A - 5, (a), existe una baja densidad de estaciones de radiación dentro de la Macro Cuenca (64 en total), y estas cuentan con un altísimo porcentaje de datos faltantes (38 estaciones tienen más de 90% de datos faltantes para el periodo de estudio).

(a)



(b)



Anexo A - 5 Estaciones de Radiación de Onda Corta (a) y de Brillo Solar (b) en la Macro Cuenca Magdalena Cauca, con su porcentaje de datos faltantes (periodo 1980-2012). Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia

Debido a la falta de datos, se diagnosticó la cantidad de datos existentes con la variable Brillo Solar, como se observa en Anexo A - 5, (b). Si bien la cantidad de datos faltantes sigue siendo alta para el periodo de estudio, la densidad es ostensiblemente mayor (288 estaciones).

Por lo anterior, se definió la utilización de ecuaciones empíricas para calcular Radiación a partir de datos de Brillo Solar a nivel puntual (es decir, por estación), utilizando los datos existentes de Radiación medida para su validación y ajuste, y posteriormente interpolar los campos de Radiación. La ecuación empírica utilizada fue la ecuación de Angström, según (Guzmán et al. 2013):

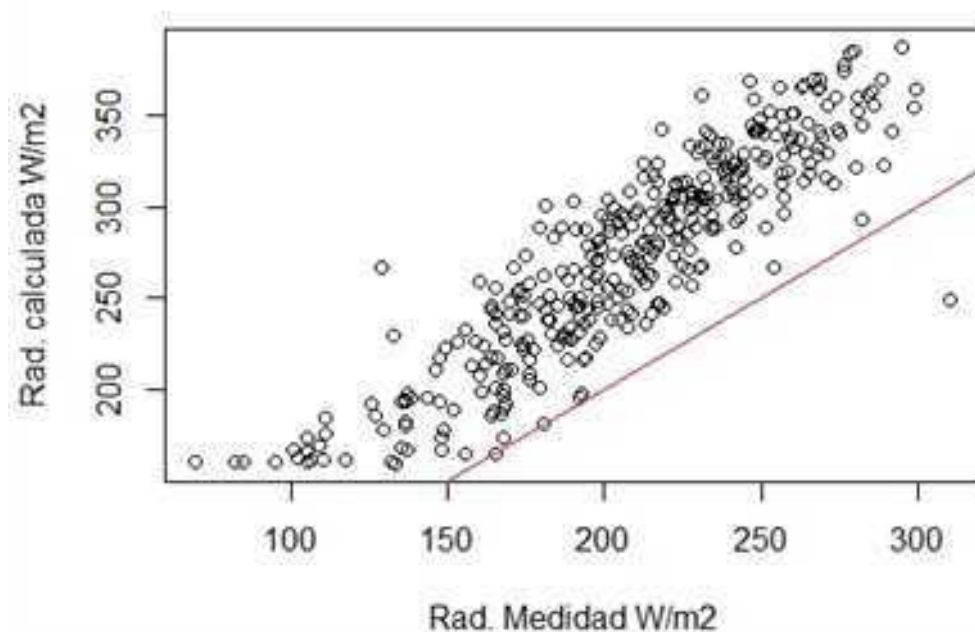
$$\frac{RG}{RA} = a + b * \frac{n}{N} \quad (6)$$

Donde RG es la radiación de Onda Corta y RA es la Radiación de Onda Corta Máxima teóricamente posible, n es el tiempo de brillo solar en horas y N es el tiempo máximo teórico de horas de brillo solar, a y b son parámetros calibrables.

Para Colombia, (Guzmán et al. 2013) propusieron y validaron los valores de los parámetros: en zona cafetera andina, a es igual a 0.221 y b es igual a 0.553, mientras que en la zona norte a es igual a 0.306 y b es igual a 0.516.

Para el cálculo de RA y N se utilizó el procedimiento matemático propuesto por (Allen G. et al. 1998).

La comparación de los datos calculados contra datos medidos en las pocas estaciones existentes, mostraron la necesidad de realizar un ajuste adicional debido a un error sistemático de los datos computados (ver Anexo A - 7).



Anexo A - 7 Comparación de datos calculados de radiación de onda corta por el modelo de Angström contra datos medidos. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia

Debido a lo anterior, se procedió a utilizar la siguiente ecuación de ajuste general, de tipo lineal, derivada del análisis de las radiaciones calculadas frente a las radiaciones medidas:

$$R_{med} = 0.6324 * R_{cal} + 67.4952 \quad (8)$$

Posteriormente se realizó una interpolación de los campos de Radiación, utilizando el método IDW. No se realizó un proceso de validación cruzada, debido a la baja cantidad de estaciones, y a la gran cantidad de datos faltantes.

- **Radiación de onda larga**

Para el caso de la Radiación de Onda Larga, y debido principalmente a las dificultades para conocer con exactitud las condiciones atmosféricas día a día, se decidió utilizar un modelo simple propuesto por Swinbank (1964) y citado por (Bilbao and de Miguel 2007):

$$R_{ol} = (0.92 * 10^{-5} * (T_m + 273.15))^2 * 5.67 * 10^{-8} * (T_m + 273.15)^4 \quad (9)$$

Donde R_{ol} es la Radiación de Onda Larga, y T_m es la temperatura media en °C.

A diferencia del proceso con los datos de Brillo Solar, donde primero se trabajó con información puntual de estaciones y luego se procedió a realizar la interpolación, en este caso se utilizaron directamente los mapas rasterizados de temperatura media a escala 0.1° (alrededor de 10 km) para calcular la Radiación de Onda Corta.

- **Humedad específica**

La humedad específica es la cantidad de agua presente en el aire, en masa (kg/kg). Es una medida de suma importancia en los modelos tipo *Land Surface*. Por su parte, la humedad relativa es el porcentaje de humedad respecto a la humedad en saturación, es decir, la humedad máxima teórica bajo las condiciones atmosféricas imperantes en ese momento.

Dado que no se contaron con datos de humedad específica, si no de humedad relativa, y a que es posible calcular la humedad específica a partir de datos de humedad relativa, presión atmosférica, y temperatura media, se procedió a realizar un diagnóstico de las estaciones existentes de humedad relativa, y su porcentaje de datos faltante (ver Anexo A - 12). En total se contaron 388 estaciones repartidas dentro de la Macro Cuenca.

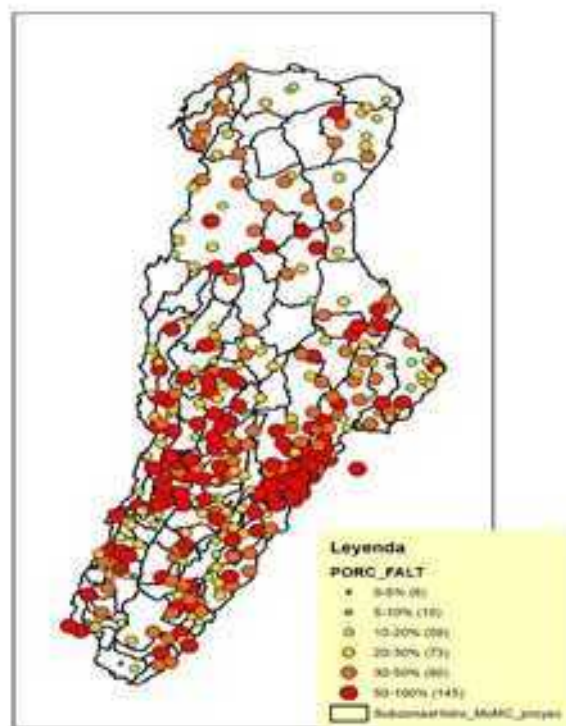
A partir de estos datos puntuales, se decidió realizar un proceso de interpolación utilizando IDW. No se realizó un proceso fino de comparación de varios métodos de interpolación, utilizando validación cruzada, debido a que esta interpolación debe considerarse como un paso intermedio, y a que se utilizaron posteriormente ecuaciones empíricas para calcular la humedad específica.

En efecto, a partir de los mapas interpolados de Humedad Relativa, Temperatura Media y Presión Atmosférica, se calculó la Humedad Específica utilizando la siguiente ecuación:

$$q_a = 0.622 * \frac{e_a}{P_a - 0.378 * e_a} \quad (10)$$

$$e_a = r_h * 10^{\frac{0.7859 + 0.03477 * T_m}{1 + 0.00412 * T_m} + 2} \quad (11)$$

Donde q_a es la humedad relativa en kg/kg, P_a es la presión atmosférica en Pa, r_h es la humedad relativa en porcentaje, T_m es la temperatura media en °C.



Anexo A - 12 Estaciones de humedad relativa y porcentaje de datos faltantes. Elaboración propia en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia

- **Presión atmosférica**

Debido a la falta de información de presión atmosférica puntual, se decidió utilizar información de reanálisis para la variable en cuestión. Estos datos provienen del reanálisis ERA-Interim reescalados a una resolución de 0.5° en el marco del proyecto Earth2Observe (<https://wci.earth2observe.eu/>). Se realizó un reescalamiento espacial simple utilizando el método del vecino más cercano, para ajustar el tamaño de rejilla a 0.1° .

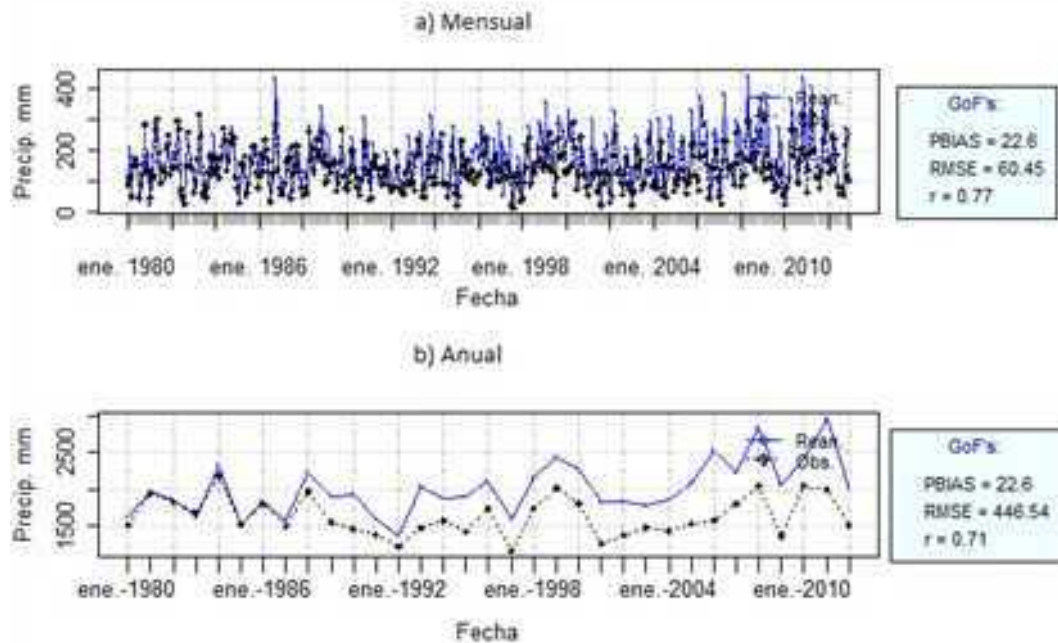
- **Velocidad del viento**

Debido a la falta de información de velocidad de vientos puntual, a la dificultad de su interpolación, se decidió utilizar información de reanálisis para esta variable. Estos datos provienen del reanálisis ERA-Interim reescalados a una resolución de 0.5° en el marco del proyecto Earth2Observe (<https://wci.earth2observe.eu/>). Se realizó un reescalamiento espacial simple utilizando el método del vecino más cercano, para ajustar el tamaño de rejilla a 0.1° .

2. VALIDACIÓN PARA LA CUENCA DEL RÍO COELLO – NIVEL DIARIO Y MENSUAL

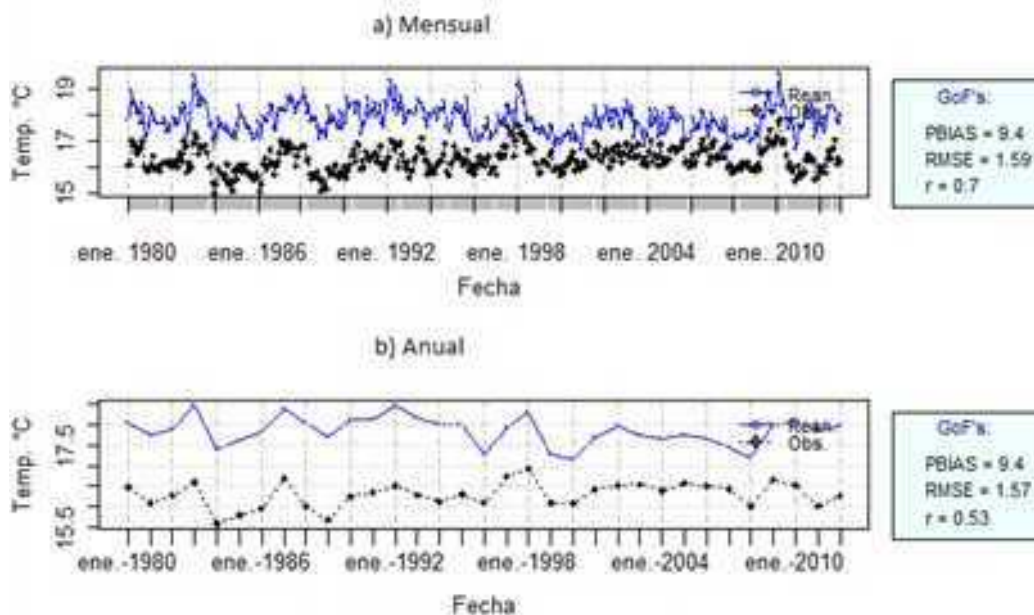
La utilización de datos de reanálisis tiene la ventaja de que estos datos son físicamente coherentes, gracias a la utilización de las leyes físicas. Sin embargo, debido al tamaño de la Cuenca del Río Coello, se decidió utilizar la información de manera agregada, y realizar entonces una comparación entre series de tiempo. Asimismo, la comparación se hace a escala mensual y anual, con el fin de observar mejor las tendencias de las dos series de tiempo.

Se realizaron comparaciones de validación sobre cuatro variables: Precipitación, Temperatura, Radiación de Onda Larga y Radiación de Onda Corta.



Anexo A - 13 Comparación de datos medidos de precipitación contra datos del reanálisis Era-Interim, Cuenca del Río Coello. Elaboración propia.

En el Anexo A - 13 se observa la comparación entre datos de precipitación observados y producidos por el reanálisis. Se observa que los datos de reanálisis tienen una tendencia marcada a sobreestimar los valores de precipitación. En total, la diferencia puede ser de alrededor del 22.6%, y en promedio, las diferencias entre datos observados y datos de reanálisis son de 60 mm a nivel mensual, y 446 mm a nivel anual, con lo que parece ser una tendencia creciente a aumentar esta diferencia. Sin embargo, existe una clara correlación lineal, lo que indica que las dos series de tiempo tienen las mismas tendencias.



Anexo A - 14 Comparación de datos medidos de temperatura contra datos del reanálisis Era-I, Cuenca del Río Coello. Elaboración propia.

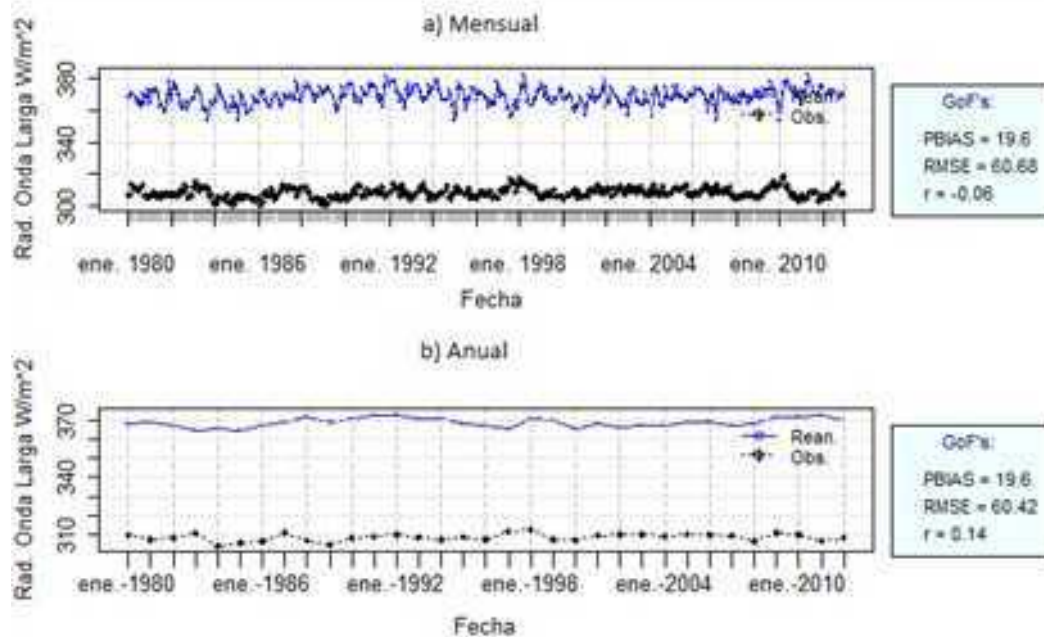
Por su parte, al comparar los datos de temperatura media (ver Anexo A - 14), parece presentarse una tendencia inversa: si bien los datos de reanálisis tienden a sobreestimar la temperatura (en alrededor de 1.59 °C a nivel diario, 1.57°C a nivel mensual, alrededor de 9.4%) también parece existir una tendencia a disminuir estas diferencias. Estos errores generados por el reanálisis pueden deberse en parte a la escala espacial original utilizada (0.5°, alrededor de 50km), lo que implica que algunos fenómenos locales (como bajas temperaturas por presencia de montañas) se dejen de lado, elevando la temperatura.

La comparación de los datos de radiación (radiación de onda larga, ver Anexo A - 15, y radiación de onda corta, ver Anexo A - 16) presenta una situación mixta que es necesario analizar: mientras que los datos producto de ecuaciones empíricas de radiación de onda larga están por debajo de los datos de reanálisis en alrededor del 19%, los datos de radiación de onda corta producidos por ecuaciones empíricas están un 37% por encima de sus respectivas contrapartes de reanálisis.

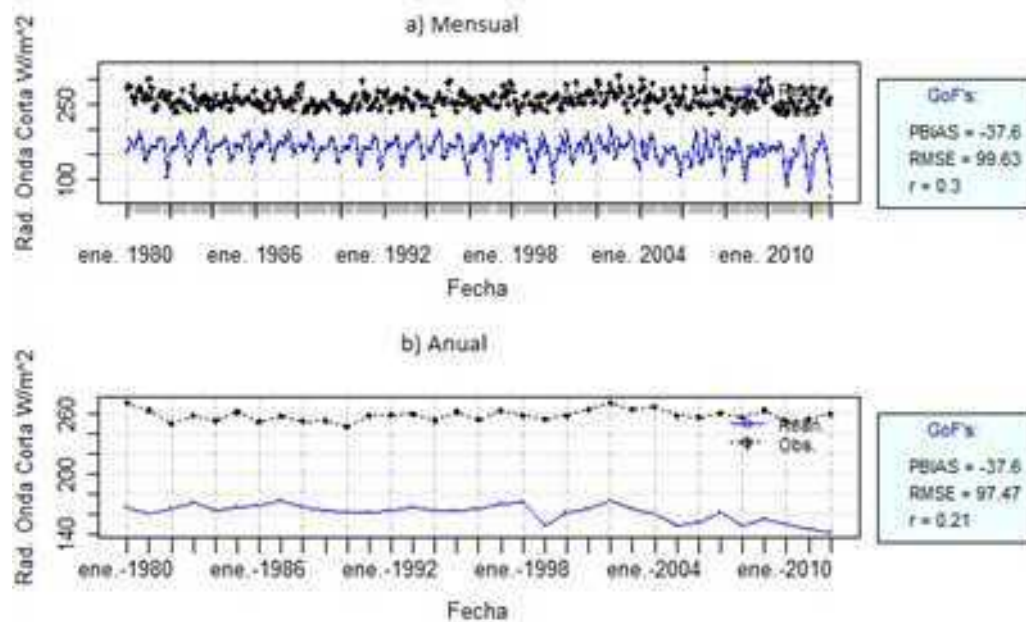
Al comparar el error total para la componente de radiación (es decir, sumar el error de radiación de onda larga y de radiación de onda corta), se encuentra que hay un error de 38.95 W/m² en términos netos. Utilizando un calor latente de vaporización de 2260 kJ/kg, este error neto equivale a 1.48 mm/día.

Se debe notar que este error es bastante alto (pues anualmente puede significar alrededor de 540 mm de evapotranspiración) lo que indica la necesidad de utilizar una de las dos bases de datos. Con el fin de mantener el marco de trabajo de otros esfuerzos de modelación del caso de estudio Colombia en el marco del proyecto Earth2Observe, y para aprovechar la

utilización de información local, se decidió utilizar las bases de datos interpoladas utilizando ecuaciones empíricas.



Anexo A - 15 Comparación de datos calculados de radiación de onda larga contra datos del reanálisis Era-Interim, Cuenca del Río Coello. Elaboración propia.



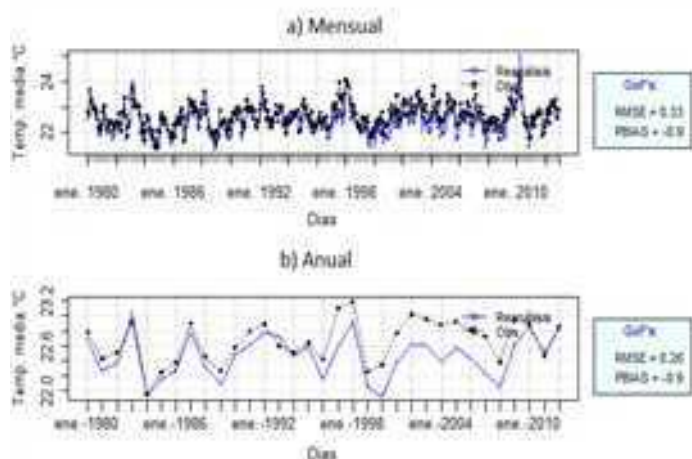
Anexo A - 16 Comparación de datos calculados de radiación de onda corta contra datos del reanálisis Era-Interim, Cuenca del Río Coello. Elaboración propia.

3. VALIDACIÓN PARA LA MACRO CUENCA MAGDALENA CAUCA A NIVEL DIARIO Y MENSUAL

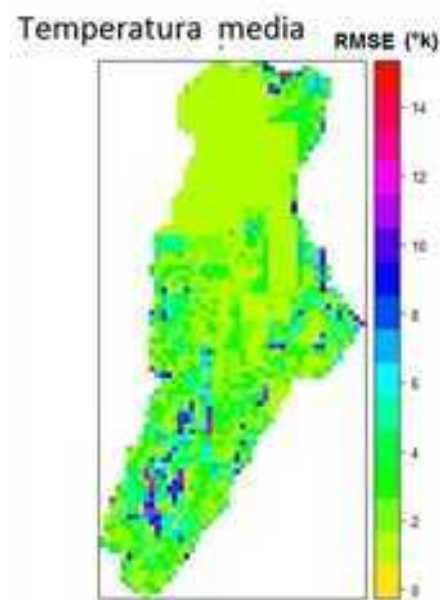
La validación de la información meteorológica para toda la Macro Cuenca siguió la misma línea general que la realizada para la Cuenca del Río Coello. Sin embargo, dado el tamaño de la Macro Cuenca, y la necesidad de anotar la distribución espacial de los errores, al análisis simple de comparación de series de tiempo agregadas, se añade el análisis del RMSE en el espacio.

Las variables bajo validación fueron: Temperatura media, Humedad específica, Radiación de Onda Larga y Radiación de Onda Corta. La velocidad de vientos y la presión atmosférica no entraron en la validación, por provenir también de ERA-Interim, que es la base de datos de reanálisis utilizada para comparar. Así mismo, no se realizó ningún tipo de comparación de datos de precipitación, pues esta validación fue realizada en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia, y se decide utilizar sus conclusiones para continuar el trabajo (Rodríguez et al. 2016). Finalmente, sobre las escalas de comparación, a nivel temporal se usan pasos de tiempo mensual y anual, por considerarlos más aptos para conocer las tendencias generales de las series de tiempo (el nivel diario puede llegar a presentar bastante ruido en los datos, lo que hace difícil de visualizar las tendencias), y a nivel espacial, se utiliza la escala de 0.1° (alrededor de 10 km), ya utilizada anteriormente.

a)



b)



Anexo A - 17 Comparación de datos observados de temperatura contra datos del reanálisis Era-Interim, Macro Cuenca Magdalena Cauca, a) series de tiempo promedio sobre la Macro Cuenca, b) valor espacial del RMSE. Elaboración propia.

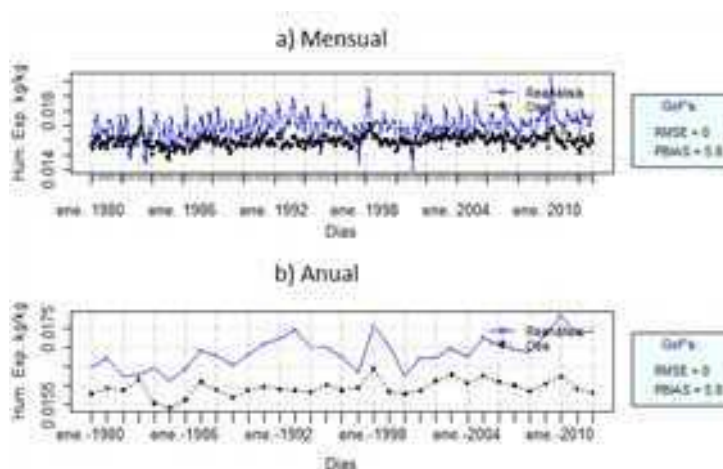
La primera variable considerada en el análisis es la temperatura media (ver Anexo A - 17). Cabe resaltar que esta variable fue interpolada a partir de observaciones en tierra, utilizando como variable secundaria la altura dentro del método de CoKriging, debido a la correlación existente entre temperatura y altura en el trópico.

A nivel temporal, de manera general se observa gran coherencia entre los datos de reanálisis y los datos observados. Al comparar los patrones temporales, se observa que los datos observados tienden a ser ligeramente mayores a los datos de reanálisis, pero estas diferencias nunca parecen ser mayores a 0.5° . En general, tanto a nivel mensual como anual se observan valores bajos de RMSE medios (0.33 y 0.26°C respectivamente, 0.9% de bias)

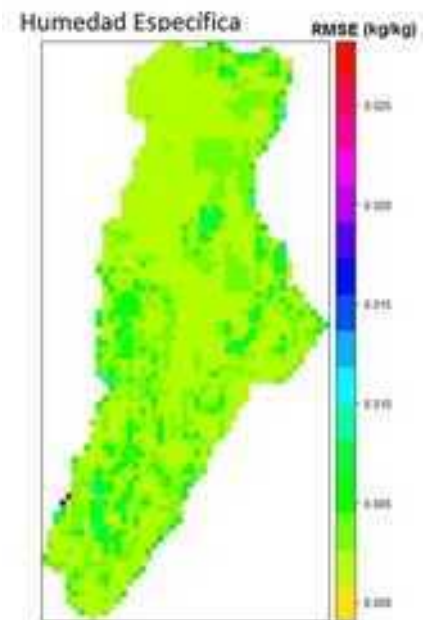
Al observar el patrón espacial del error RMSE, justamente sus valores más altos se observan principalmente en las zonas altas (Cordillera Central, partes de las cordilleras Oriental y Occidental, Sierra Nevada de Santa Marta) probablemente ligado a las dificultades de los datos de reanálisis para representar fenómenos locales debido a la escala, y probablemente al reducido número de estaciones en zonas altas, aunque estas afirmaciones requieren mayor análisis para ser confirmadas.

Pese a estas diferencias, es posible anotar que las dos bases de datos cumplen con los objetivos de representar el campo interpolado de temperaturas para la región de la zona Magdalena Cauca. Sin embargo, debido a la necesidad de contar con información que represente fenómenos locales, se decide utilizar las bases de datos observados.

a)



b)



Anexo A - 18 Comparación de datos calculados de humedad específica contra datos del reanálisis Era-I, Macro Cuenca Magdalena Cauca, a) series de tiempo promedio sobre la Macro Cuenca, b) valor espacial del RMSE. Elaboración propia.

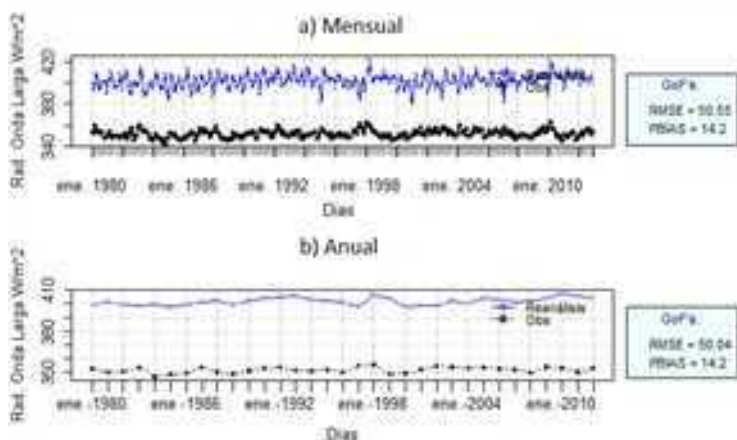
La siguiente variable meteorológica es la humedad específica (Ver Anexo A - 18). Se debe remarcar que esta variable es ligeramente diferente a la humedad relativa, pues la segunda es el porcentaje de la humedad del aire respecto a su máximo teórico, mientras que la humedad específica es la cantidad de agua (en masa) que hay en la masa de aire. Por esta razón, dos zonas con humedad relativa de 100% pueden tener humedades específicas diferentes.

A nivel temporal, las diferencias en el porcentaje del bias es de 5.8%. Debido a los valores propios de la variable, y a la cercanía de los datos de reanálisis y de ecuaciones empíricas, el RMSE es muy cercano a 0. Sin embargo, en general, se puede afirmar que los datos de reanálisis tienden a ser superiores durante todo el periodo de estudio.

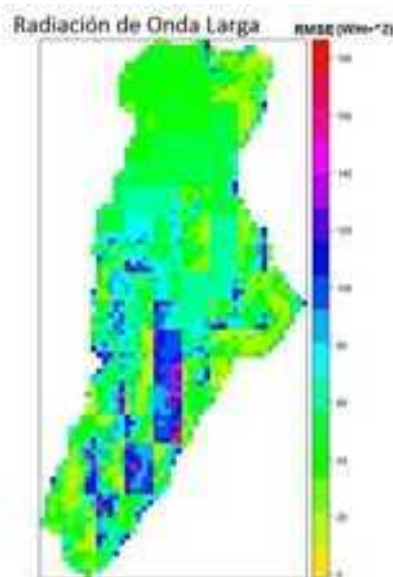
A nivel espacial, estas tendencias se confirman con algunas pocas excepciones en la Cordillera Occidental. Sin embargo, en general los errores que muestra el RMSE son cercanos a 0.

Dada esta cercanía en los valores calculados con ecuaciones empíricas a partir de observaciones, y datos de reanálisis, es posible afirmar que pueden usadas cualquiera de las dos bases de datos. Con el fin de mantener un marco de trabajo equivalente al de otros esfuerzos de modelación de la Macro Cuenca en el caso de estudio Colombia, se decidió utilizar la base de datos elaborada a partir de observaciones y ecuaciones empíricas.

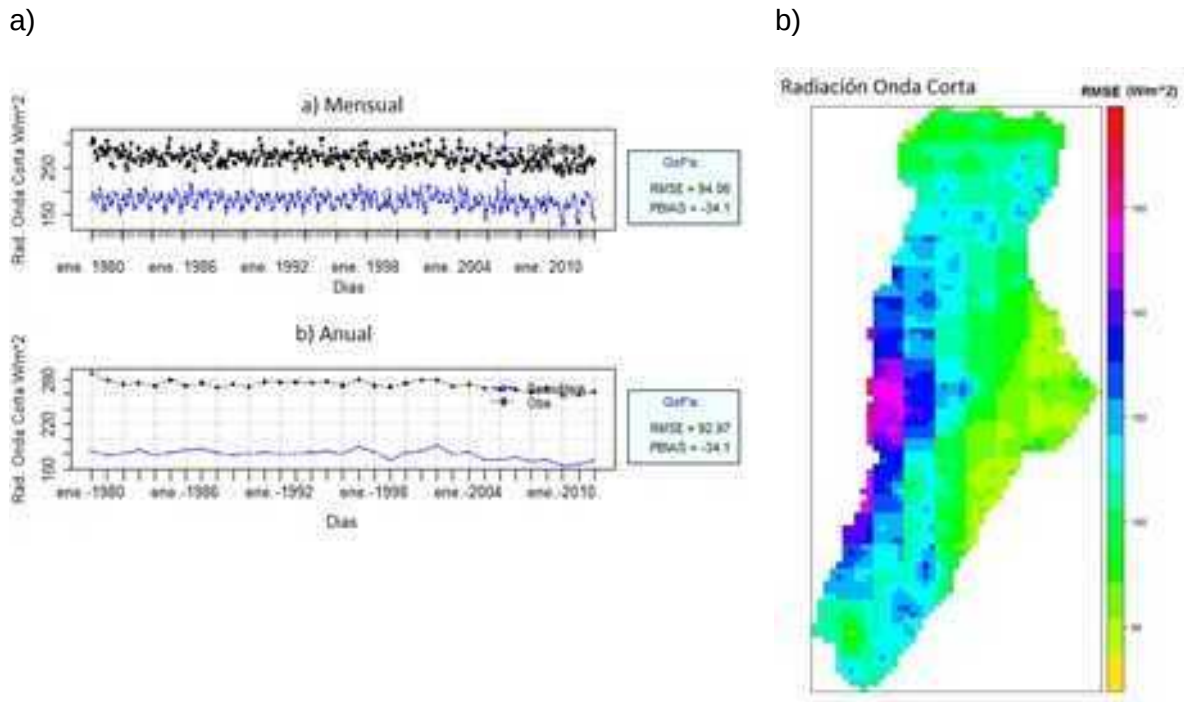
a)



b)



Anexo A - 19 Comparación de datos calculados de radiación de onda larga contra datos del reanálisis Era-Interim, Macro Cuenca Magdalena Cauca, a) series de tiempo promedio sobre la Macro Cuenca, b) valor espacial del RMSE. Elaboración propia.



Anexo A - 20 Comparación de datos calculados de radiación de onda corta contra datos del reanálisis Era-Interim, Macro Cuenca Magdalena Cauca, a) series de tiempo promedio sobre la Macro Cuenca, b) valor espacial del RMSE. Elaboración propia.

Las siguientes variables meteorológicas son las radiaciones: de onda larga (ver Anexo A - 19) y de onda corta (ver Anexo A - 20). Mientras que la radiación de onda corta es aquella que proviene directamente del sol o reflejada en la atmósfera de algún punto intermedio, la radiación de onda larga es aquella que se produce por el calentamiento de la atmósfera, o por el intercambio de calor entre la superficie y la atmósfera. Sus valores son de gran importancia para realizar el cálculo del balance de energía sobre la superficie terrestre, y conocer, por ejemplo, los valores de evapotranspiración reales.

A nivel mensual, es importante remarcar la coherencia entre lo observado anteriormente para la Cuenca del Río Coello, y lo que es posible observar para la Macro Cuenca: los valores de radiación de onda larga calculados con ecuaciones empíricas tienden a estar por debajo de los valores de reanálisis, y viceversa para el caso de la radiación de onda corta calculada con ecuaciones empíricas. En términos netos, la radiación por ecuaciones empíricas añade $43.51 W/m^2$ adicionales (alrededor de $1.66 mm/día$ en términos de calor de vaporización) lo que es bastante cercano a lo hallado para Coello.

Sin embargo, al analizar la distribución espacial del RMSE, se observa que el error está distribuido ampliamente y de manera diversa. Para el caso de la radiación de Onda Larga, Se presentan altísimos valores de RMSE en la Cordillera Central, el Valle Medio del río Magdalena, algunas partes de la Cordillera Oriental, y otros puntos que parecen ser aislados,

y repartidos mayoritariamente al sur y al norte de la Macro Cuenca. Por otro lado, la radiación de Onda Corta presenta una acumulación de valores altos de RMSE sobre la Cordillera Occidental y el Valle Alto del río Magdalena.

Estas distribuciones de los valores del RMSE pueden estar asociadas a la escala espacial del Reanálisis. Es bien sabido que la presencia de accidentes orográficos importantes afectan los valores de estas variables meteorológicas (Jaramillo-Robledo et al. 2006), y la escala original de los datos de reanálisis (0.5° , alrededor de 50 km) podría estar generando la concentración de los valores altos de RMSE en algunos puntos de la Macro Cuenca.

Sin embargo, eso no explica la tendencia a presentar una menor radiación neta de alrededor de 1.6 mm/día (en términos de calor de vaporización). Puesto que no existe literatura que explique estas diferencias entre las dos bases de datos, y dados los buenos resultados preliminares en la Cuenca del Río Coello, así como para conservar el marco general de trabajo del caso de estudio Colombia, se decide utilizar la base de datos producida con observaciones y ecuaciones empíricas.

4. COMPARACIÓN DE DATOS INTRADIARIOS PARA LA CUENCA DEL RÍO COELLO

Como comparación final de datos meteorológicos, se muestran a continuación la comparación de datos meteorológicos con paso de tiempo de 3 horas, provenientes del reanálisis de Era-Interim, con los resultados de la metodología de reescalamiento de datos observados diarios a intradiarios, para diez días del año 1980.

Para este caso se presenta la comparación agregada entre los datos provenientes de estaciones, y los datos provenientes del Reanálisis, por lo que sus valores podrían verse como un promedio de la cuenca.

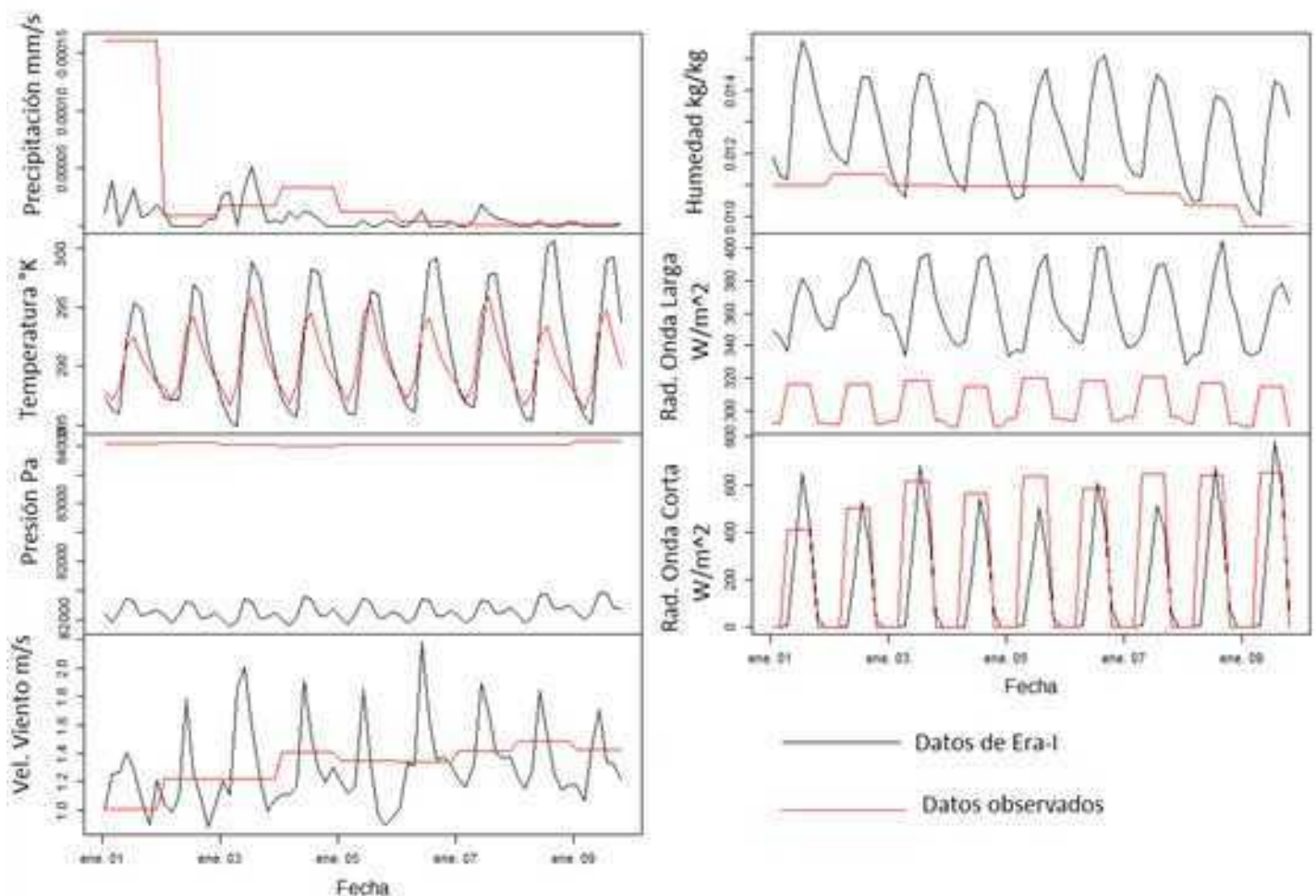
Así mismo, se utilizó la ecuación hipsométrica (Wallace and Hobbs 2006), con el fin de comparar resultados de presión atmosférica a partir de datos de temperatura, contra datos de presión atmosférica provenientes de ERA-I. Los datos observados provienen de la estación Perales, ubicado fuera de la CRC, pero suficientemente cercana como para utilizarla

Los resultados se muestran en Anexo A - 21. Se observan diferencias importantes entre los valores de precipitación, presión atmosférica, humedad, y radiación de onda larga. En cuanto a la temperatura y la radiación de onda corta, si bien se observan diferencias importantes, en general sus valores parecen ser bastante cercanos.

Estos datos arrojan cierta tranquilidad sobre las curvas sintéticas de precipitación, y radiación de onda corta y onda larga, donde pese a las diferencias en valores absolutos, se conservan las formas y proporciones de las curvas. Así mismo, los resultados desechan la posibilidad de utilizar la presión atmosférica calculada a partir de datos de temperatura, pues sus diferencias con los datos de ERA-I no arrojan ninguna validación concluyente. En cuanto al caso de la humedad, si bien los valores observados son bajos respecto a los valores del

reanálisis, puesto que provienen en parte de observaciones, se decide utilizar la base de datos calculada con ecuaciones empíricas.

Finalmente, la precipitación presenta un problema cuya solución requiere de análisis más profundo y prolongado, y que sobrepasa el alcance de este trabajo de tesis. Utilizar el valor diario para reescalar a un paso de tiempo de 3 horas, sin ningún tipo de análisis adicional, muestra graves limitaciones, principalmente ligadas a la estructura temporal de la precipitación. Esto quiere decir que utilizar valores diario a niveles intradiarios puede provocar valores errados en intensidades, que a su vez provocarían errores en valores de escorrentía y caudal transitado. Esta limitación debe tenerse en cuenta al analizar los resultados de caudal, especialmente para el caso de eventos extremos por tormentas de alta precipitación en zonas de alta montaña.



Anexo A - 21 Comparación de datos intradiario de ERA-I contra datos observados diarios reescalados. Paso de tiempo de 3 horas para 10 primeros días de 1980. Elaboración propia

B. Mapas estáticos originales de la Macro Cuenca Magdalena Cauca

Los mapas originales de elevación, cobertura vegetal y textura del suelo, se presentan aquí, explicando brevemente cual fue su tratamiento en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia. Esto con el fin de dejar constancia del marco general de modelación que fue elaborado para este proyecto y que se utilizó para simular la hidrología de la zona con el modelo MESH.

1. DEM ORIGINAL PARA LA MACRO CUENCA MAGDALENA CAUCA

El Modelo Digital del Terreno constituye una representación de la elevación de la superficie terrestre. Utiliza para tal fin valores de elevación promedio de elementos rectangulares (celdas) que juntos forman una matriz, o raster.

En el caso de la Macro Cuenca Magdalena Cauca, se cuenta con un Modelo Digital a escala 90 m, proveniente de la base de datos SRTM (Jarvis et al. 2008), y corregida para Colombia por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi).

A partir de este modelo, se definió otro a escala de 10 km, el cual se convirtió en la base de modelación de todos los esfuerzos realizados en el marco del proyecto Earth2Observe Colombia. Además, el modelo original fue utilizado para obtener otros mapas como el de pendientes y el de direcciones de flujo, a la misma escala de 10 km.

El Modelo original a escala 90 m se puede ver en Anexo B - 1

2. COBERTURA DE LA TIERRA ORIGINAL

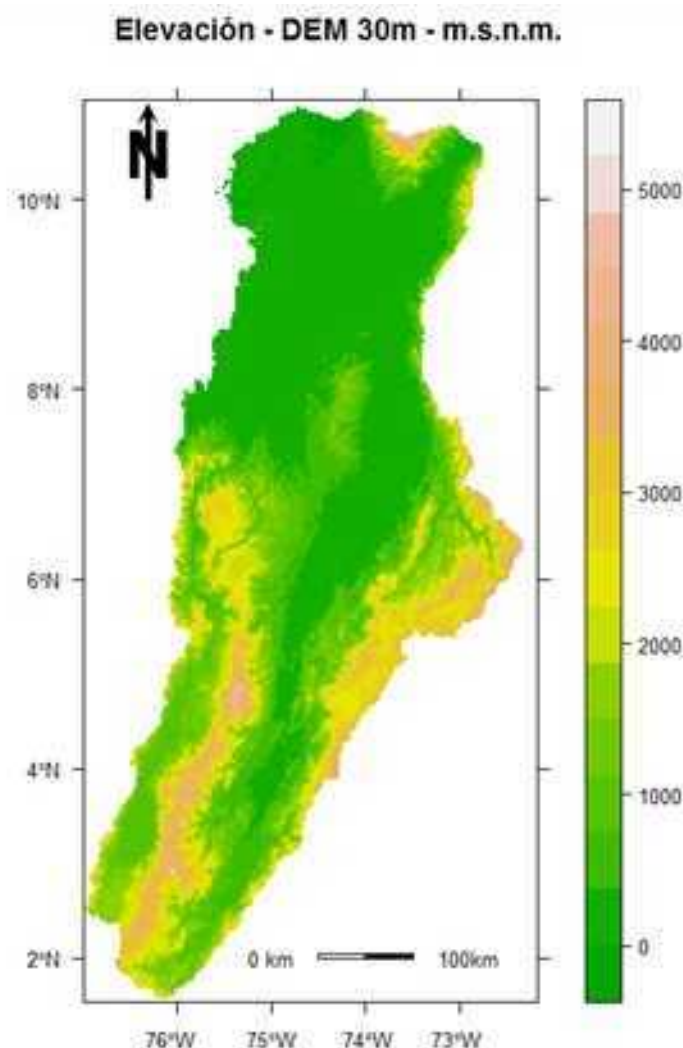
El IDEAM realizó un trabajo de elaboración de mapas de cobertura vegetal, utilizando la metodología Corine Land Cover de la Unión Europea adaptada, a las condiciones colombianas (IDEAM et al. 2008). Este mapa fue elaborado a una escala de 1:100.000 a partir de imágenes satelitales (Landsat), y presenta, en total, 37 ítems de nivel 3 (el nivel más fino).

En el marco del proyecto, este archivo recibió un pre-procesamiento que separó los ítems en archivos separados y se calculó el porcentaje de área ocupada en celdas de 10 km (coherentes con las celdas del Modelo Digital de 10 km) por cada ítem.

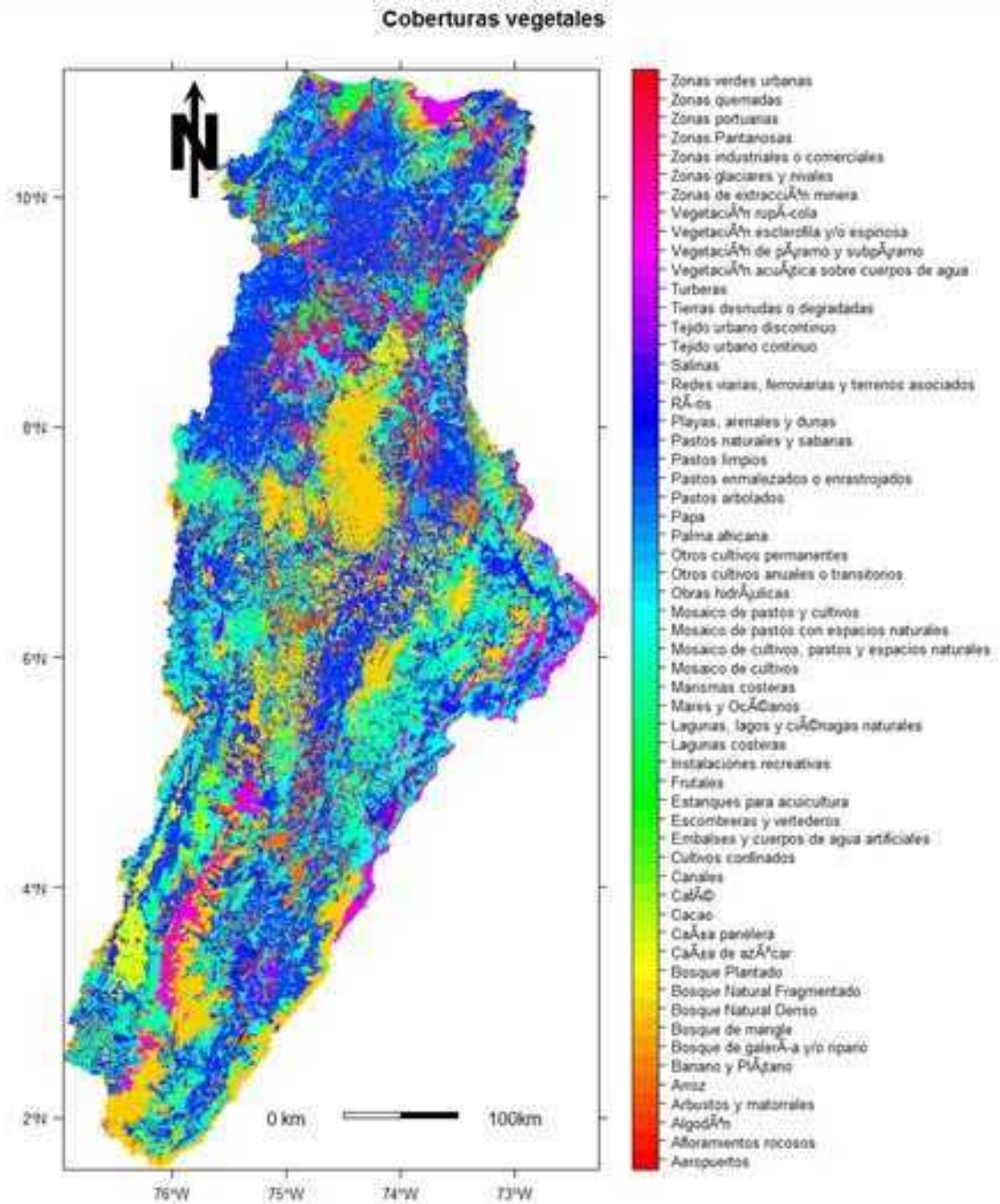
A partir de estos 37 ítems, se realizó posteriormente en MESH una reclasificación en 7 coberturas, con el fin de obtener marcadores para conformar los GRU.

Para mayor información acerca de la metodología Land Cover y su implementación en la Cuenca Magdalena Cauca, puede consultarse (IDEAM et al. 2008). Asimismo, el mapa de coberturas original se muestra en el Anexo B - 2.

Si bien el mapa de coberturas es de 2008, puede considerarse representativo del periodo de tiempo considerado, dado que los cambios en la cobertura vegetal por cambios en el uso del suelo se han dado de manera paulatina. Sin embargo, una representación dinámica de la cobertura vegetal puede presentar ventajas en la simulación hidrológica.



Anexo B - 1 Modelo digital del terreno original de la Macro Cuenca Magdalena Cauca, a escala de 90 m (Jarvis et al. 2008)



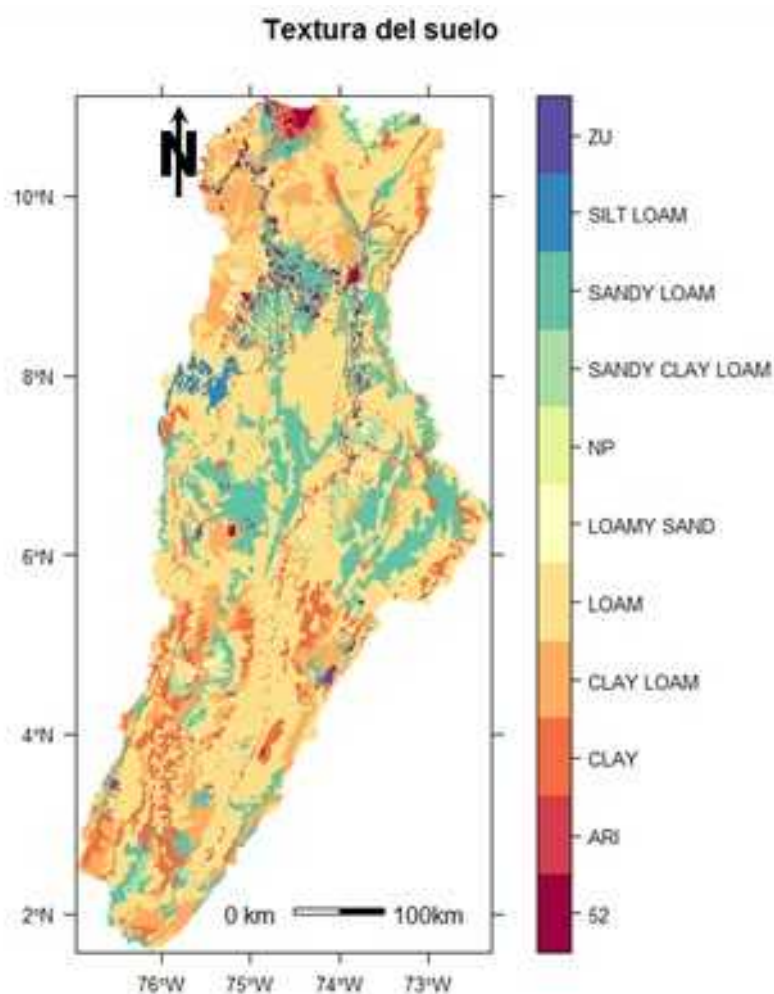
Anexo B - 2 Cobertura de la tierra original, a escala 1:100.000, utilizando la metodología Corine Land Cover (IDEAM et al. 2008)

3. MAPA DE SUELOS ORIGINAL

El mapa de suelos para la Macro Cuenca fue elaborado por el IGAC a una escala de 1:500.000 (IGAC 2003). Su clasificación tiene en cuenta características como la pendiente del terreno, clima, geomorfología y porcentaje de arena, limo, arcilla y materia orgánica.

En el marco del proyecto Earth2Observe Colombia se llevó a cabo un esfuerzo de conformación de una base de datos de los distintos tipos de suelo existentes en la Macro Cuenca. A partir del mapa de suelos del IGAC se clasificaron las unidades cartográficas en texturas del triángulo textural de suelos. Nomenclatura especial (ARI, area de ríos, NP, nieves perpetuas, ZU, zonas urbanas, 52, cuerpos de agua) no sufrieron reclasificación.

El mapa original utilizando la nueva clasificación texturas puede verse en Anexo B - 4. Posteriormente, la información se reclasificó a una escala de 0.1° (alrededor de 10 km) con el fin de mantener coherencia con el resto de información estática.



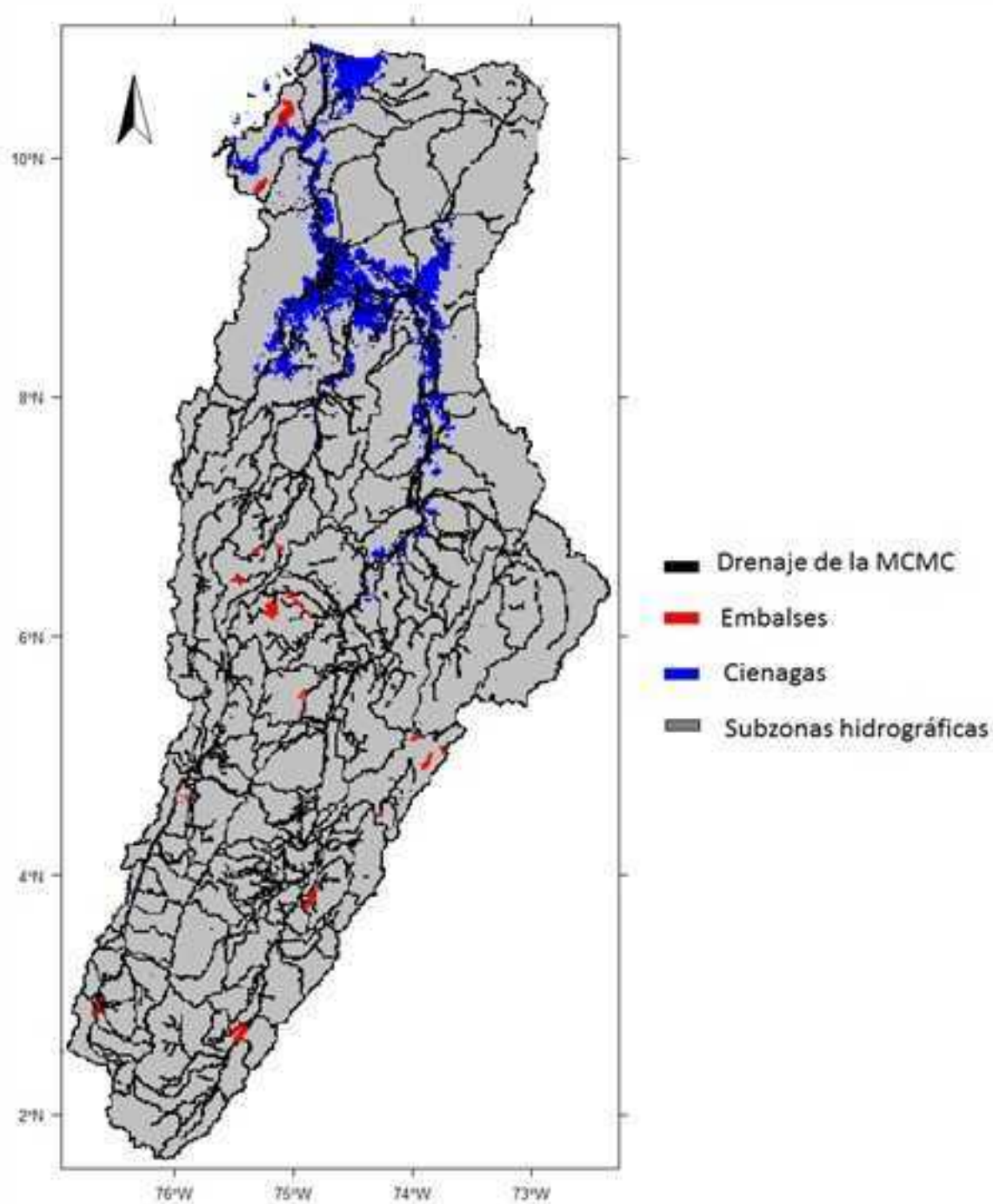
Anexo B - 3 Mapa de suelos de la Macro Cuenca Magdalena Cauca, utilizando la clasificación del IGAC y su correspondiente textura (IGAC 2003)

4. OTROS MAPAS UTILIZADOS EN EL MARCO DE ESTE TRABAJO DE TESIS

Información adicional en forma de mapas fue utilizada con el fin de comprender de mejor forma la hidrología del área de estudio y afinar la información de algunos mapas, como la dirección de flujos, etc.

Los mapas de la red drenaje (drenaje doble, a una escala de 1:100.000) (IGAC 2014b) provienen de la información básica del IGAC, al igual que el mapa de embalses (IGAC 2014a) y el mapa de ciénagas (IGAC 2014c).

Asimismo, se tuvo en cuenta el mapa de zonificación hidrográfica del IDEAM (IDEAM 2013), el cual contiene valiosa información acerca de la subdivisión de la macro cuenca de acuerdo con las subcuencas más importantes de la MCMC.



Anexo B - 4 Mapa de la red de drenaje, embalses y humedales, y subzonas hidrográficas dentro de la Macro Cuenca Magdalena Cauca, usados como información secundaria (IDEAM 2013; IGAC 2014b, c)

C. Estaciones seleccionadas para las campañas de calibración en la Macro Cuenca Magdalena Cauca

En esta sección se muestran las estaciones seleccionadas en las campañas de calibración de la Macro Cuenca Magdalena Cauca. La tabla a continuación presenta información de cada una de las estaciones dentro del subgrupo escogido para la calibración, la cuales presentaban una regulación natural, sin presencia de embalses u otros elementos que afecten los valores de caudal. También se muestran las estaciones seleccionadas como punto ciego para validación. Finalmente, se da información sobre las estaciones incluidas en cada campaña de calibración.

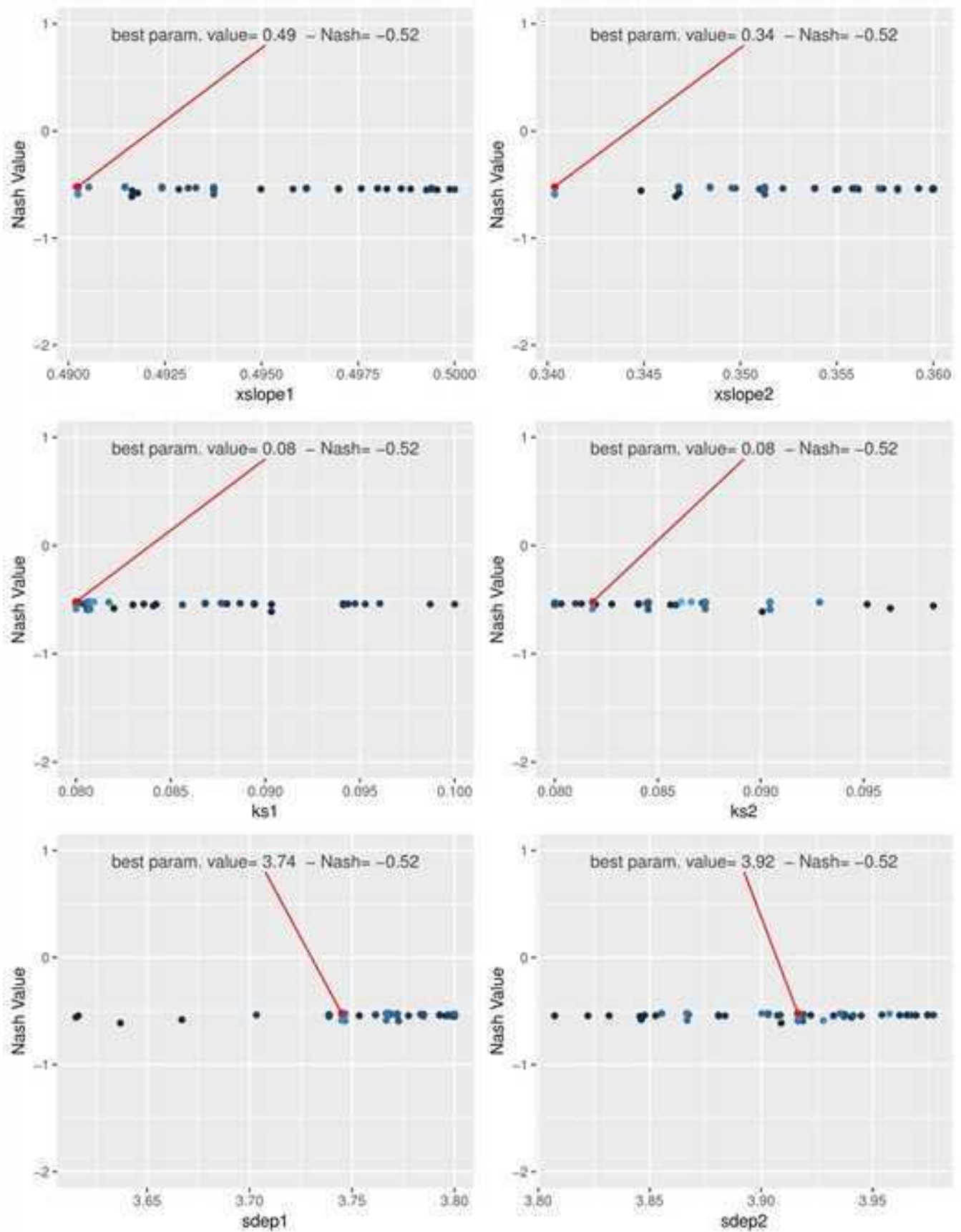
ID	Nombre estación	¿Para proceso de validación?	¿incluido en Campañas? (* para cálculo de Nash Sutcliffe Efficiency, ° para cálculo de bias)															
			1*	1°	2*	2°	3*	3°	4*	4°	5*	5°	6*	6°	7*	7°	8*	8°
1	SAN AGUSTIN	NO	si	si	si	si	si	Si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
2	SALADO BLANCO	NO							si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
3	PERICONGO	NO	si		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
4	PTE GARCES	NO	si	si	si	si	si	Si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
5	PTE RICAURTE	NO	si		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
6	PAICOL	NO							si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
7	VILLALOSADA	NO	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
8	JARDIN EL HDA	NO		si		si		si										
9	SAN ALFONSO	NO	si		si		si											
10	CARRASPOSO	NO							si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
11	PAYANDE	NO	si		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
12	PTE CARRETERA	SI																
13	NUEVA LA	NO	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
14	BOCAS	NO		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
15	SARDINAS LAS	NO	si		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
16	CONDOR EL	NO		si		si		si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
17	GAITANIA	NO	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
18	PIED_COBRE-AUTOMA	NO							si	si	si	si	si	si	si	si	si	si
19	MURALLA LA	NO	si		si		si		si		si		si		si		si	
20	PTE COLACHE	NO							si		si		si		si		si	
21	PTE LOPEZ	NO	si	si	si	si	si	si	si		si		si		si		si	
22	COLORADOS	NO																
23	PTO LIBRE	NO	si		si		si											
24	GUADUERO	NO																
25	GARRUCHA LA	NO	si		si		si		si		si		si		si		si	
26	BODEGA LA	NO							si		si		si		si		si	

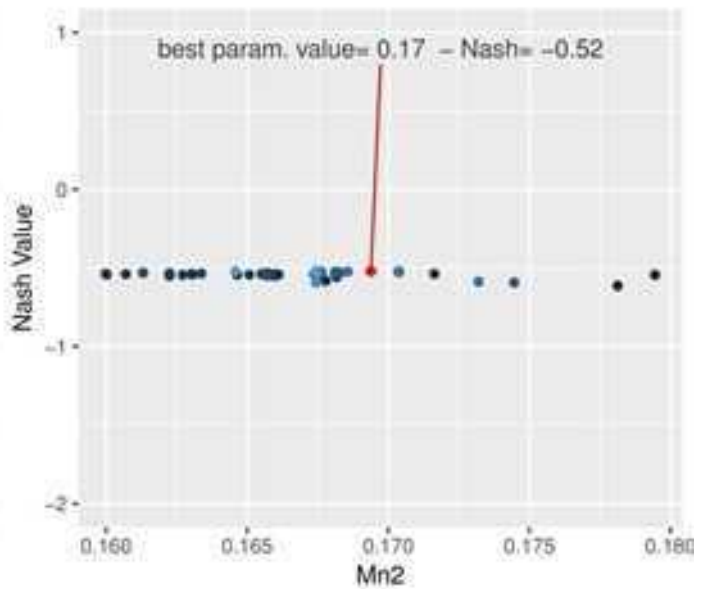
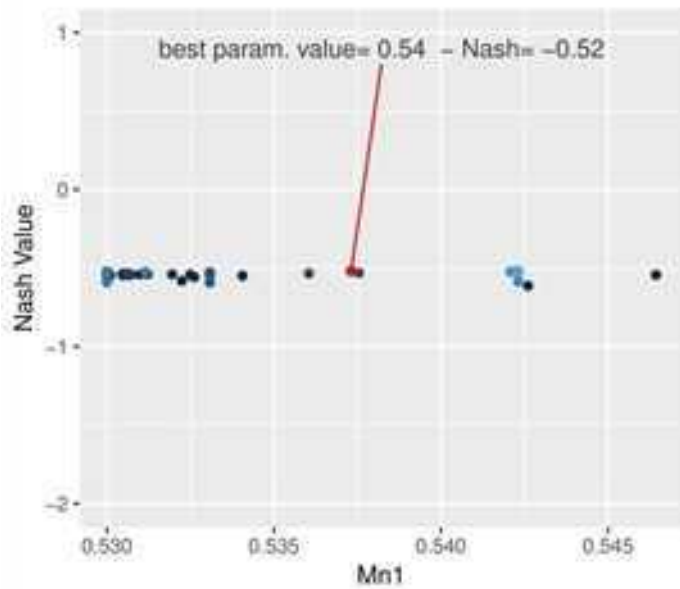
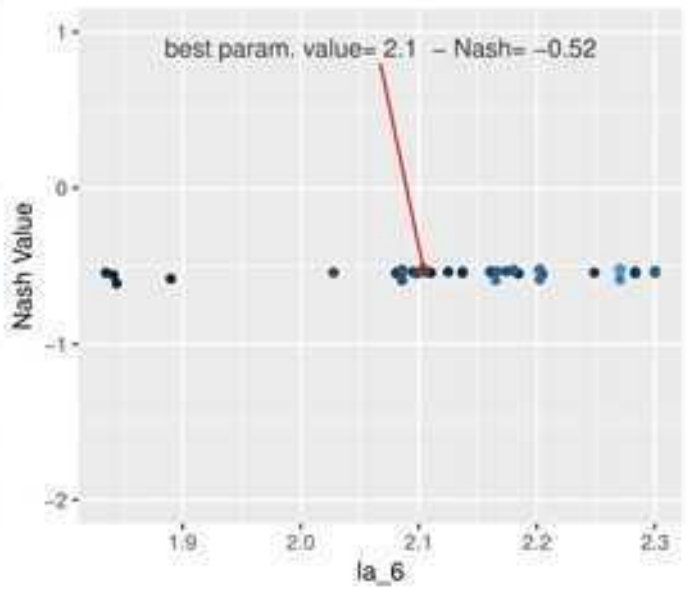
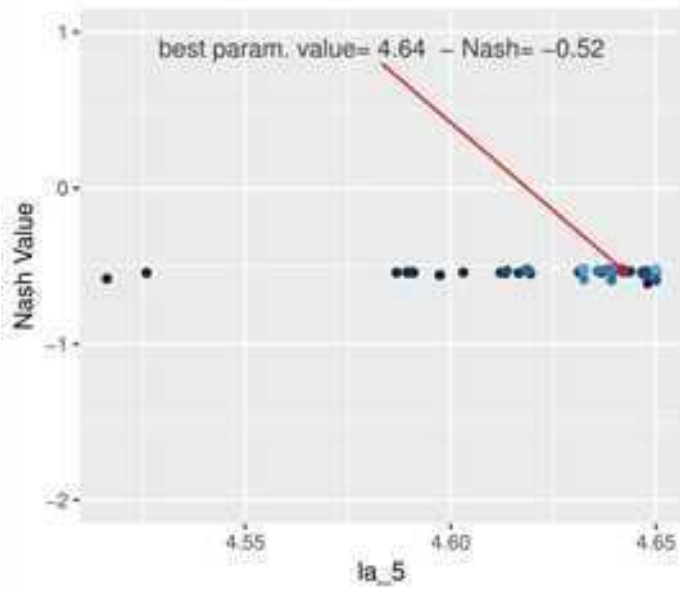
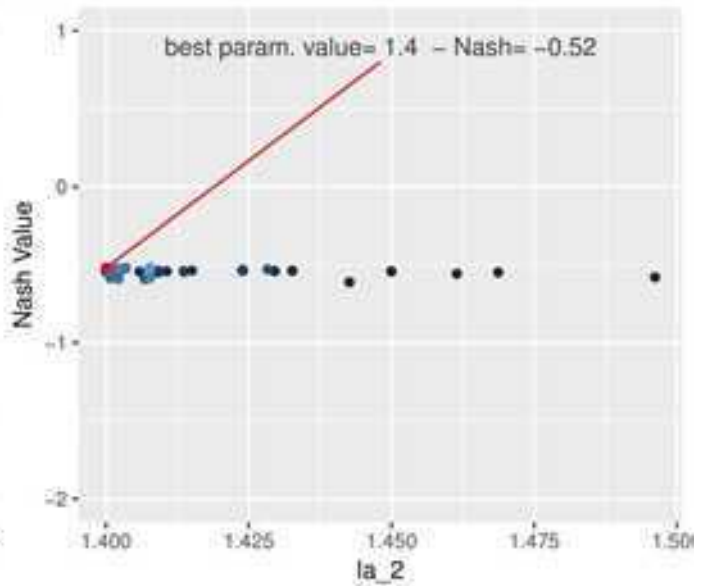
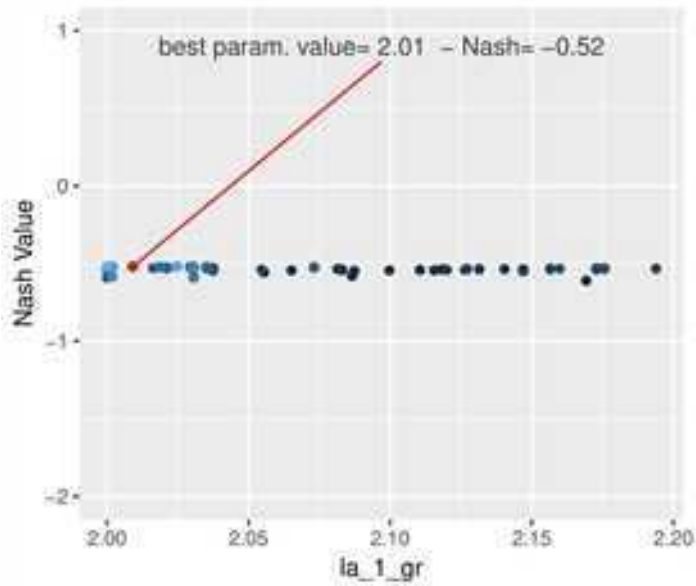
[illegible]

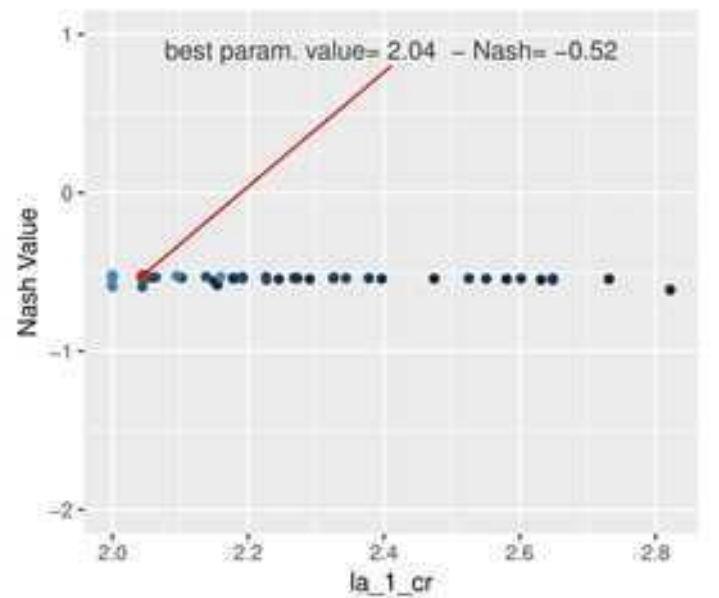
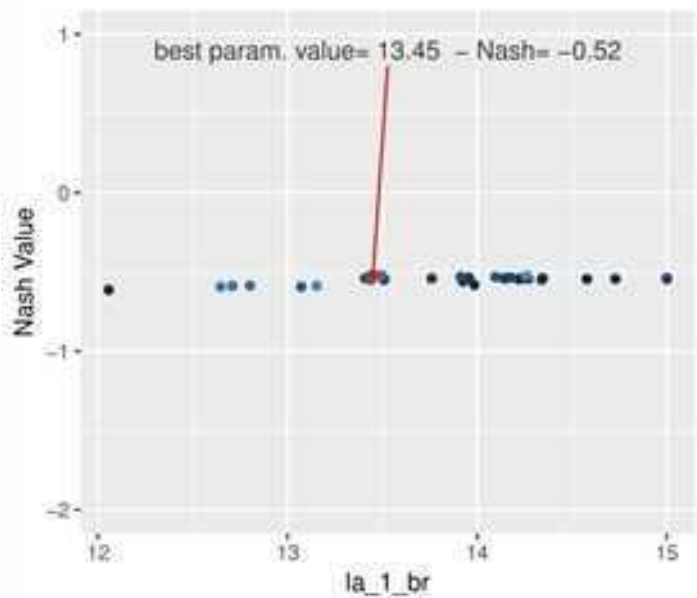
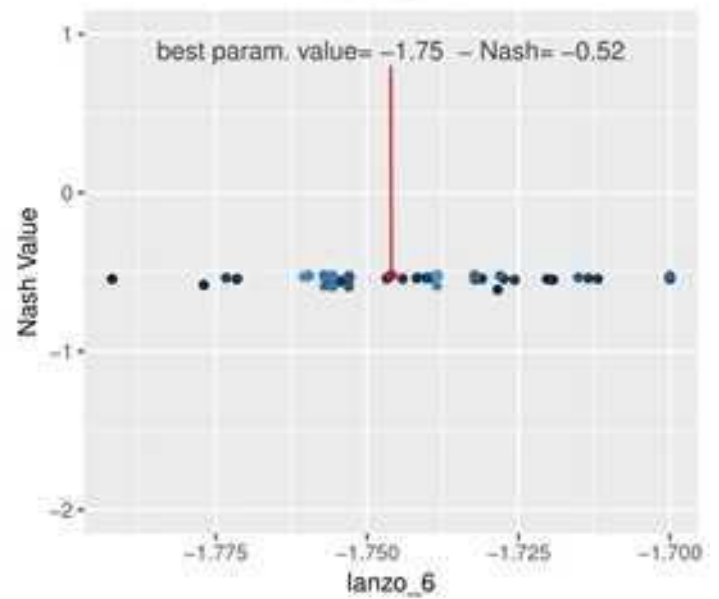
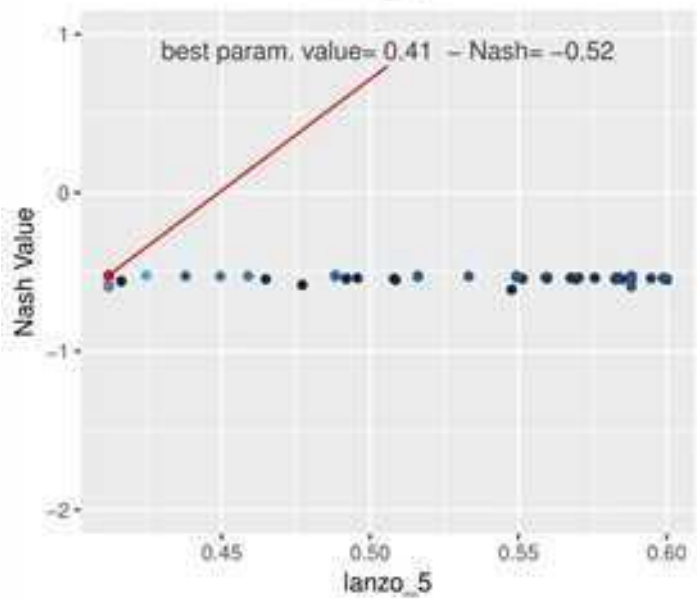
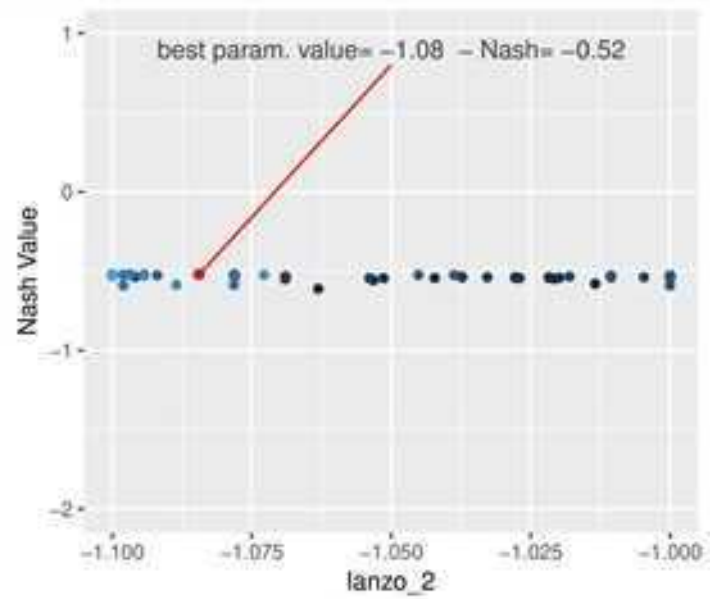
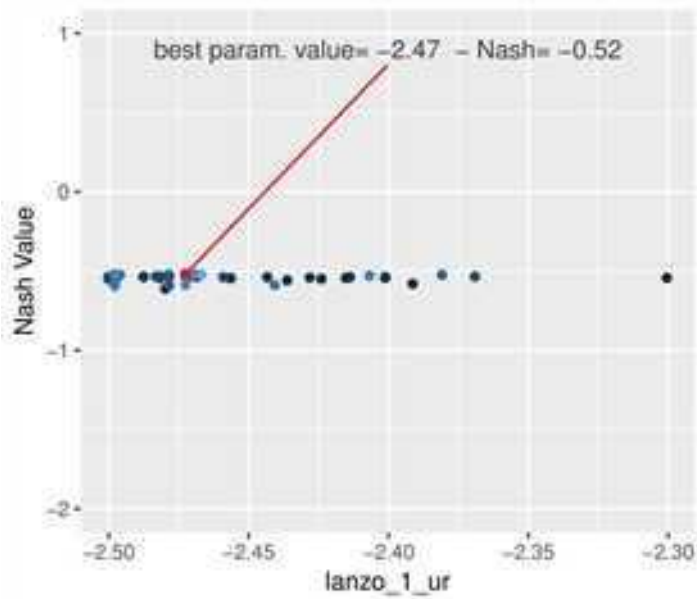
D. Gráficas de dispersión de parámetros del modelo de cuatro GRU para la Cuenca del río Coello

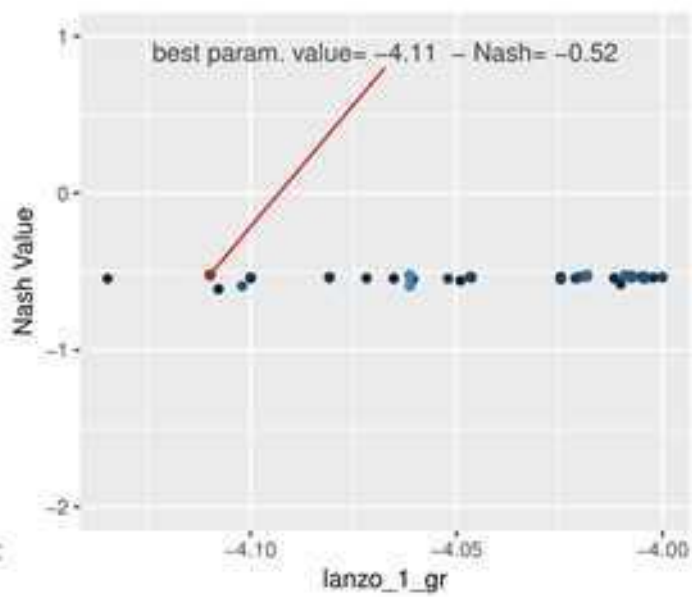
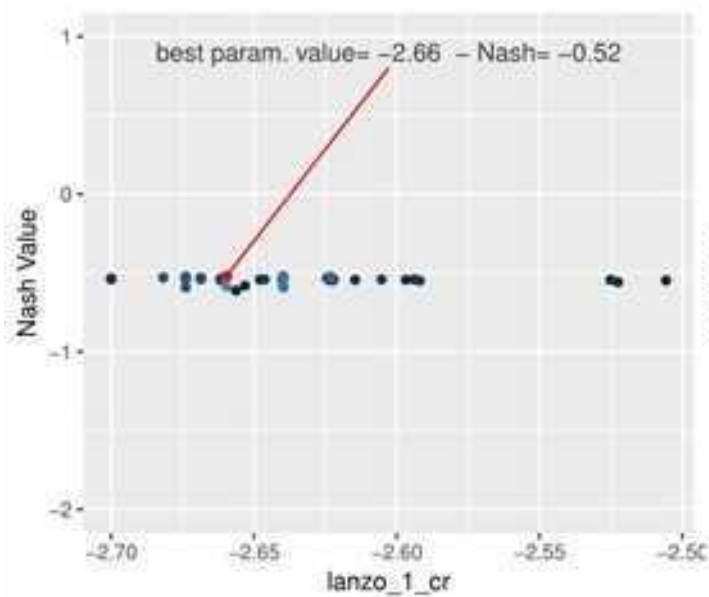
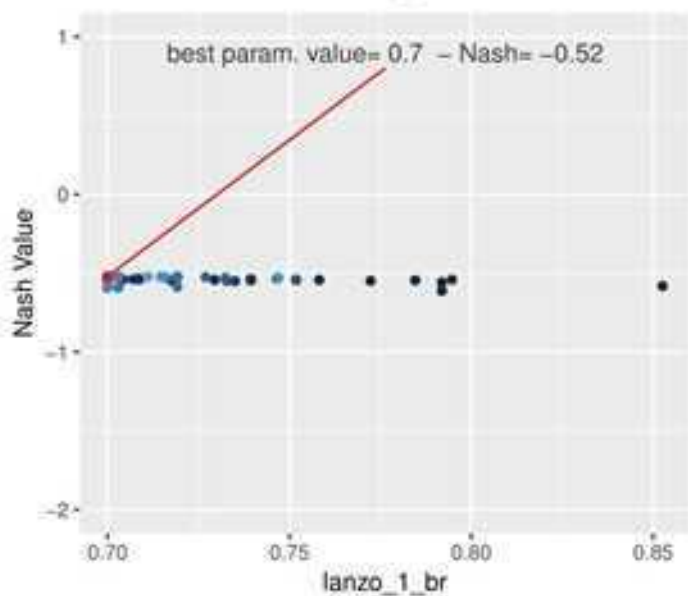
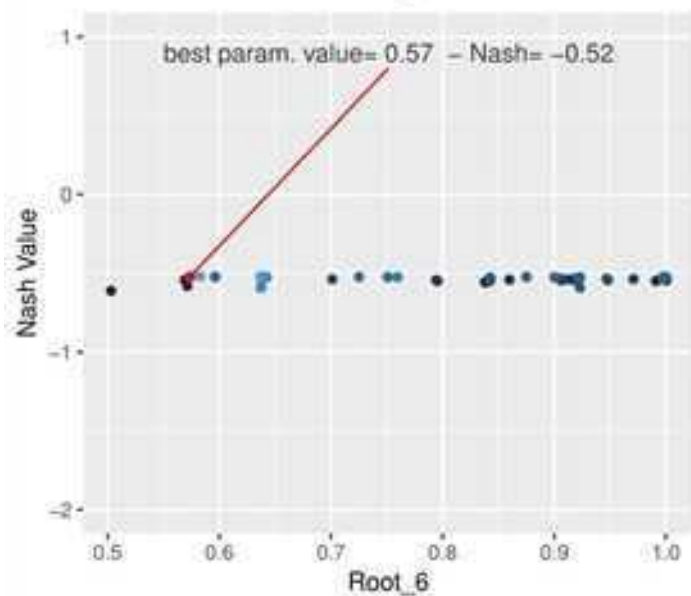
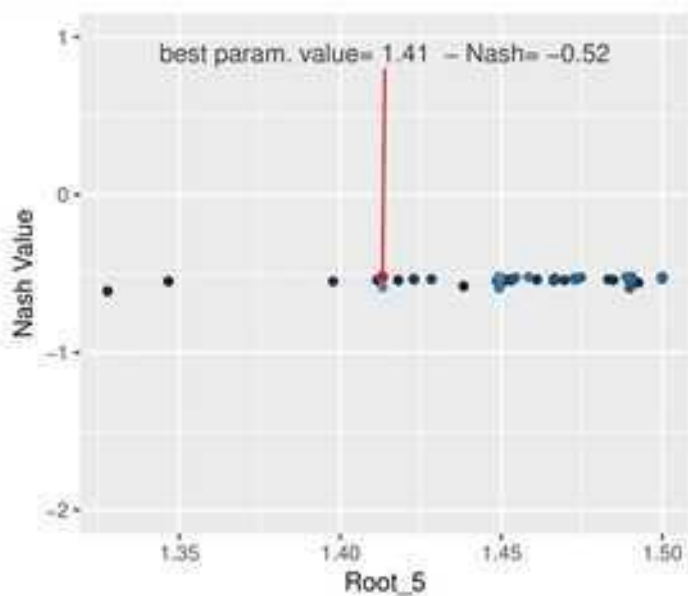
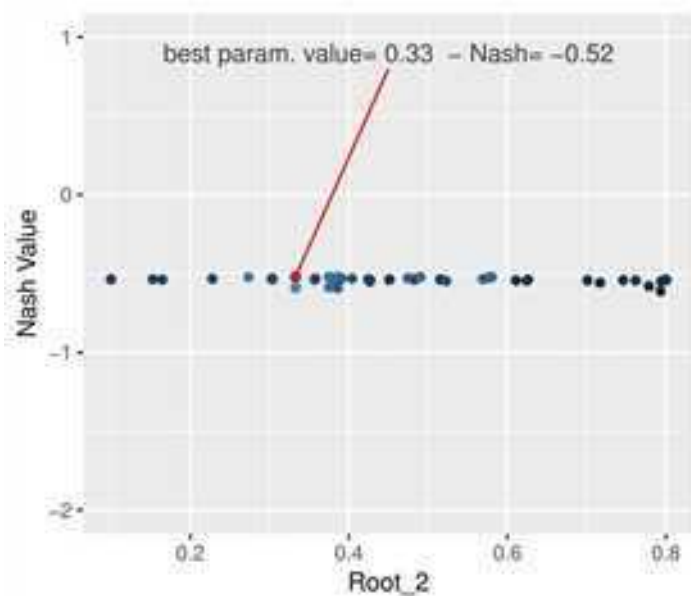
En esta sección se muestran gráficas de dispersión para cada uno de los parámetros incluidos en la calibración del modelo de cuatro GRU, considerado como el más estable en los experimentos realizados en la Cuenca del río Coello.

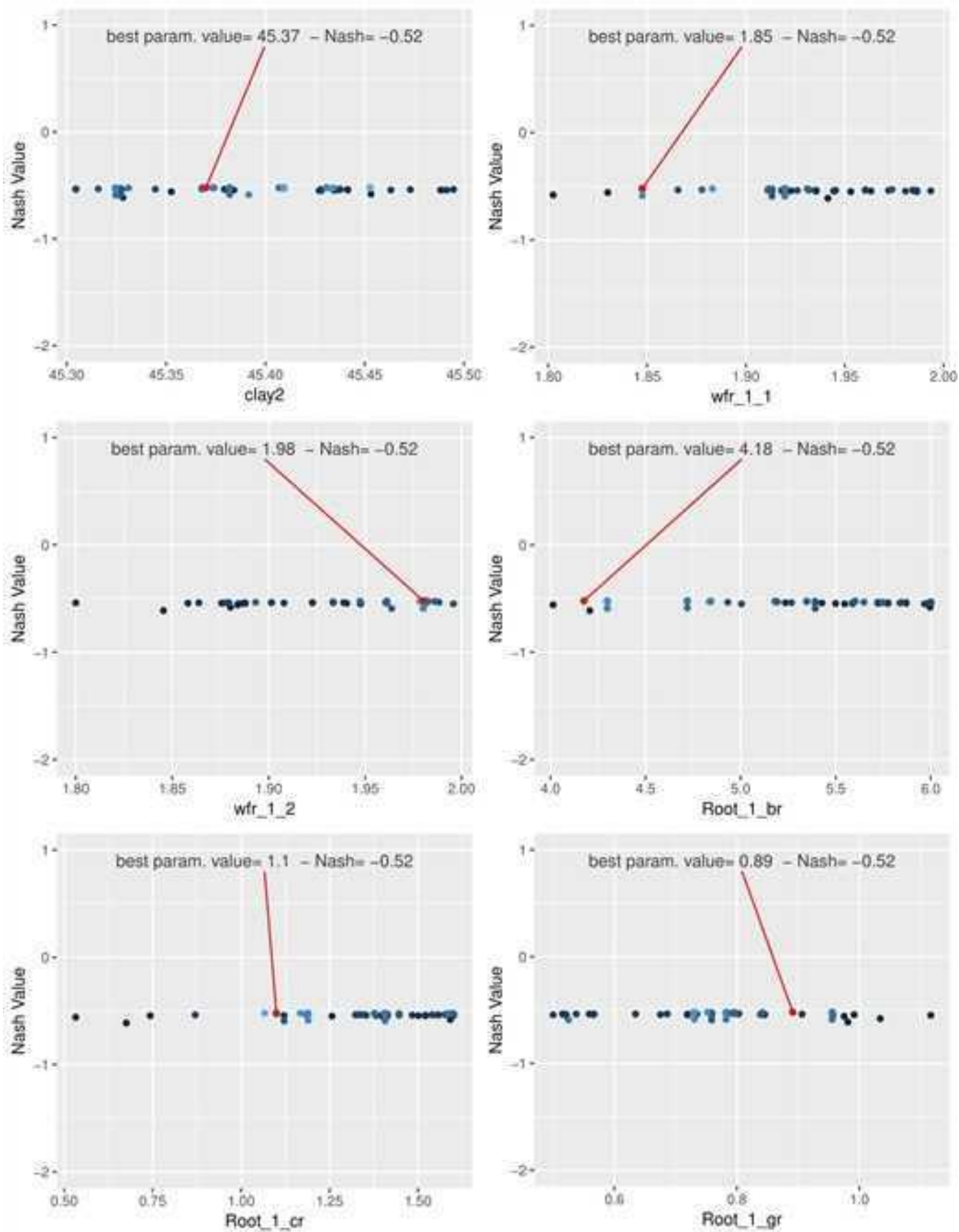
Cabe resaltar la complejidad del modelo, así como la necesidad de incluir una gran cantidad de parámetros para mejorar los resultados de las simulaciones. Esto lleva a problemas de equifinalidad. Si bien muchos de los valores de los parámetros pueden relacionarse a mediciones de campo, el problema persiste debido a la necesidad del modelo de utilizar valores efectivos por celda.

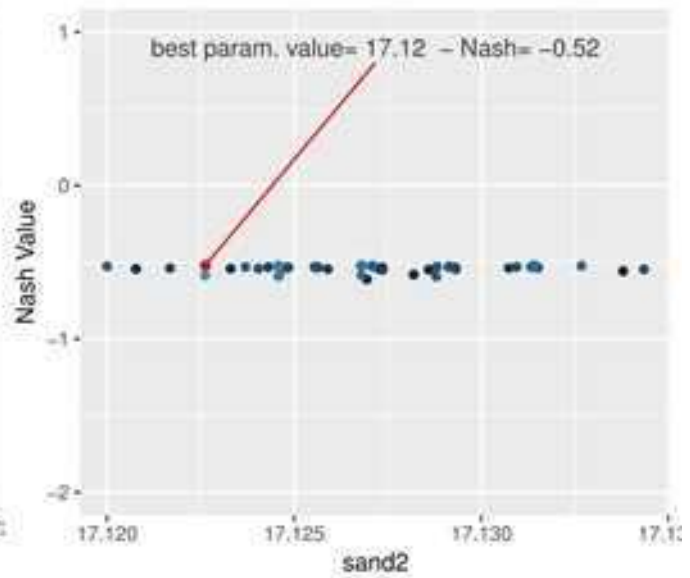
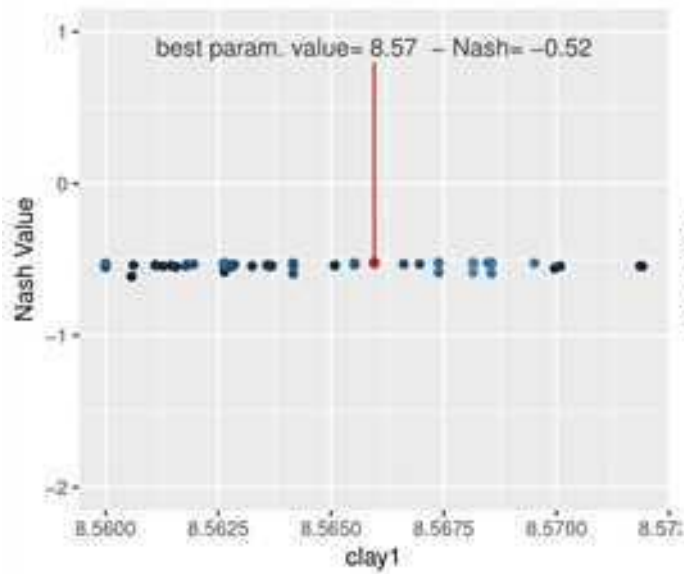
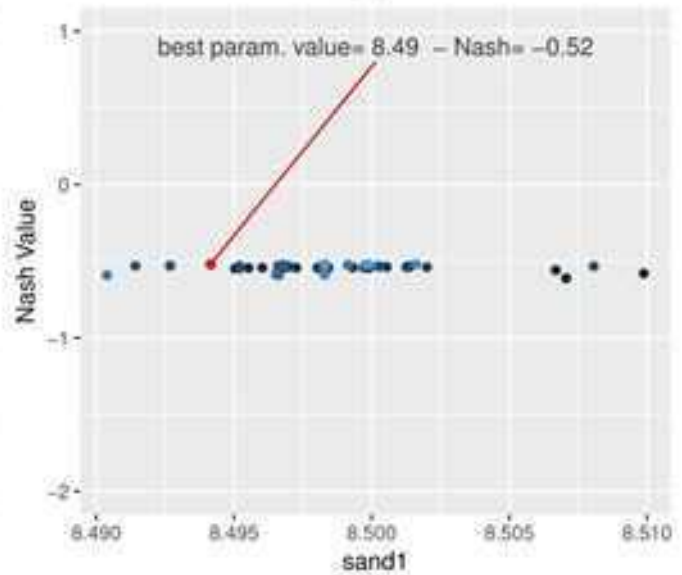
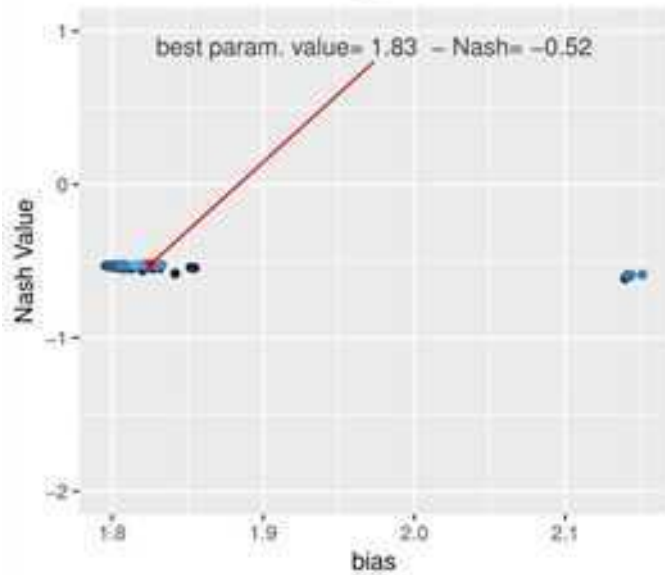
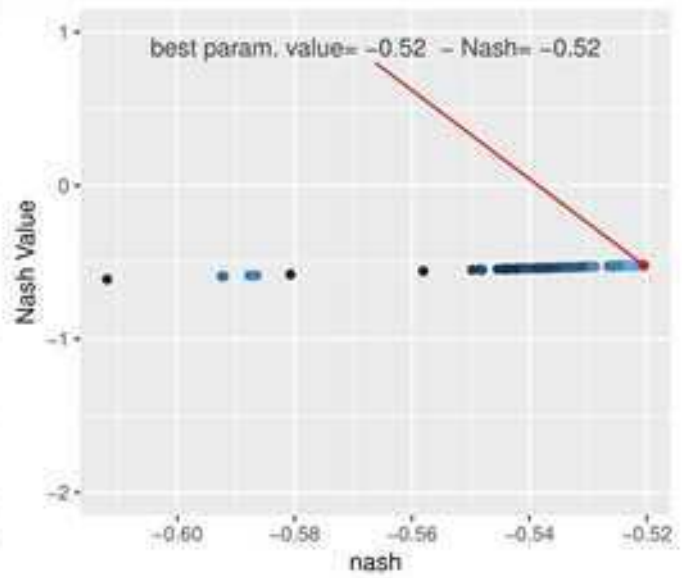
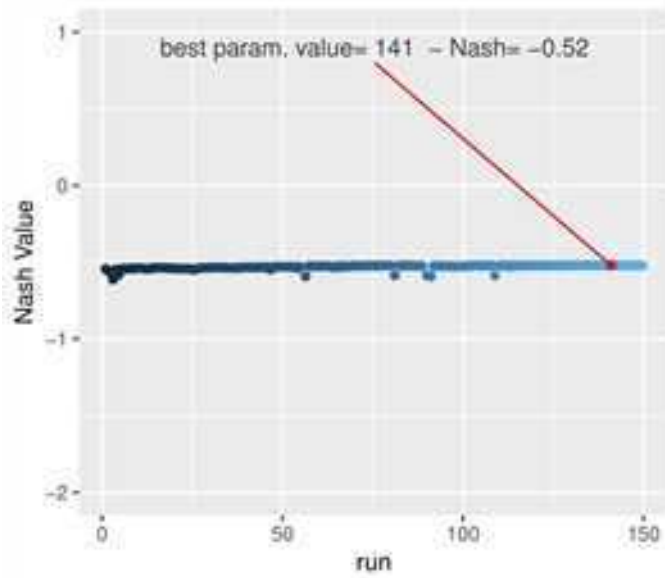


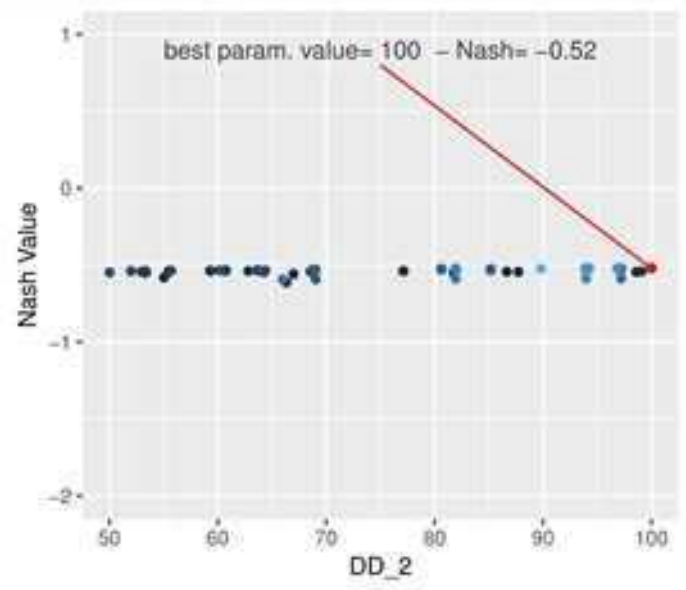
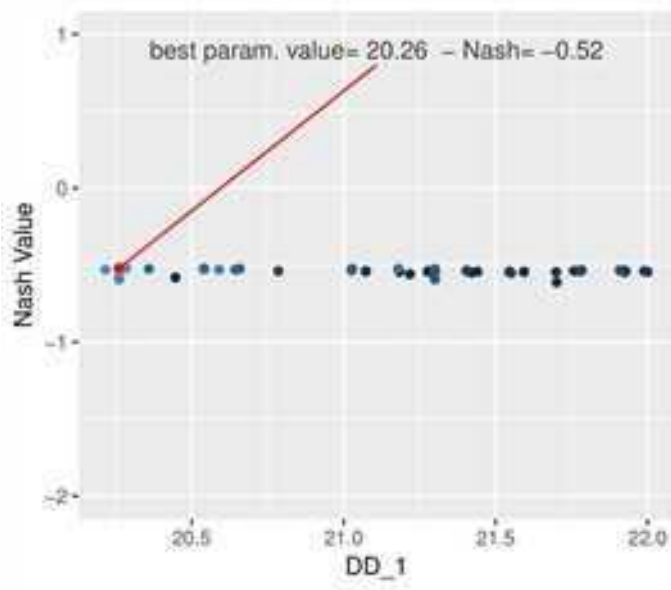






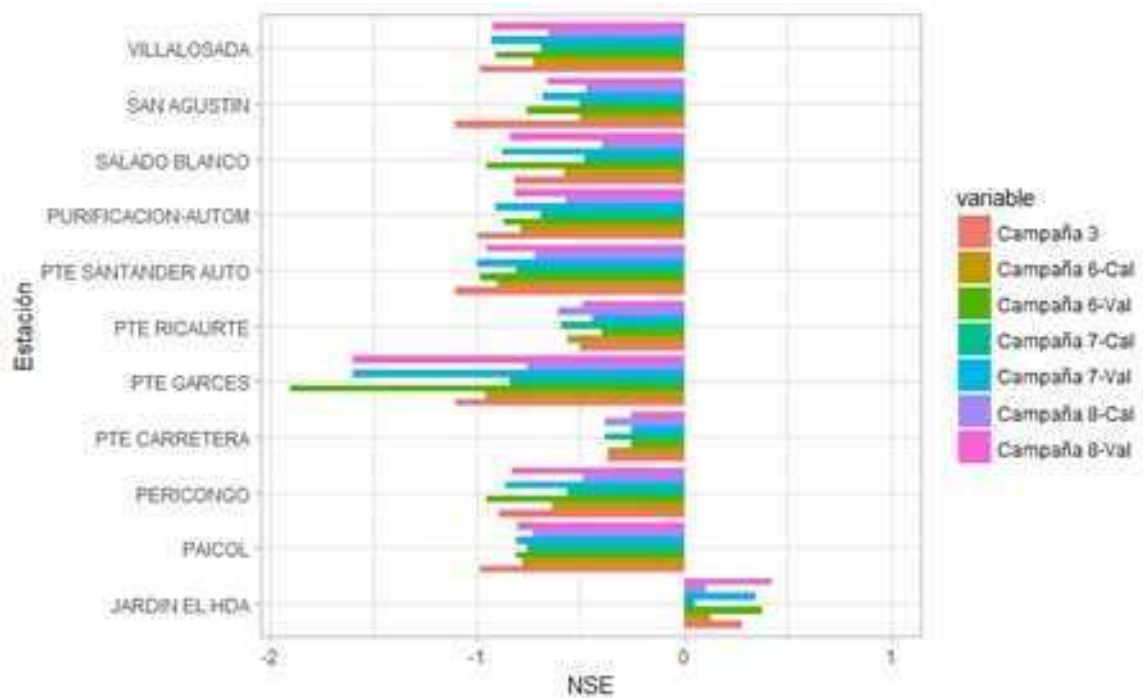




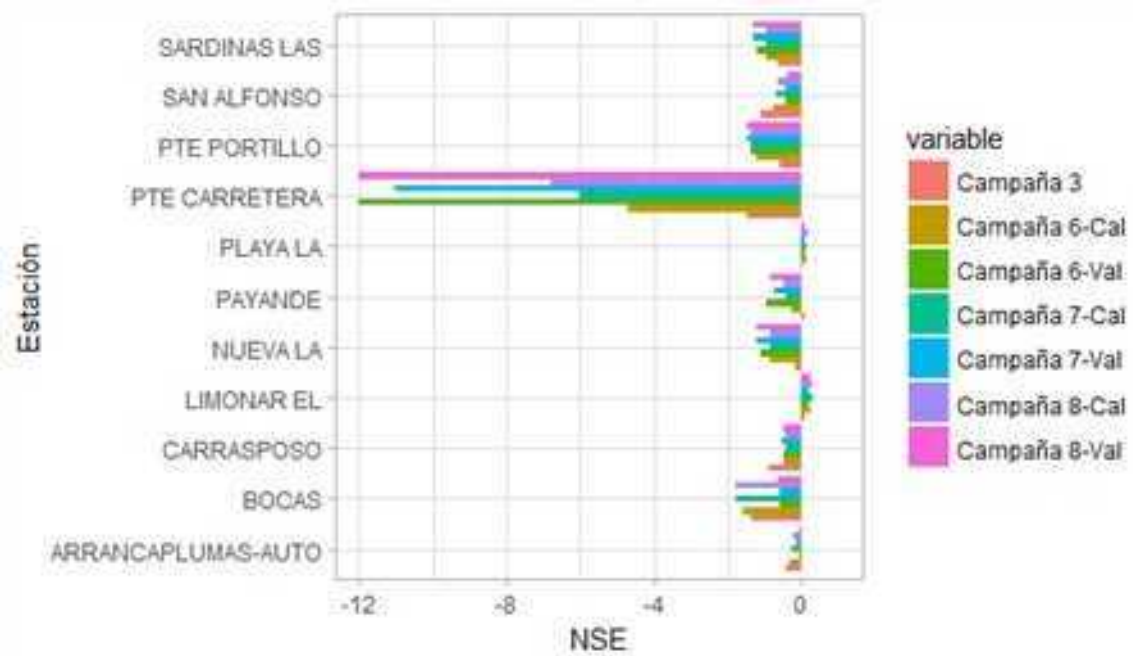


E. Valores de NSE para cada punto de control, por campaña de calibración

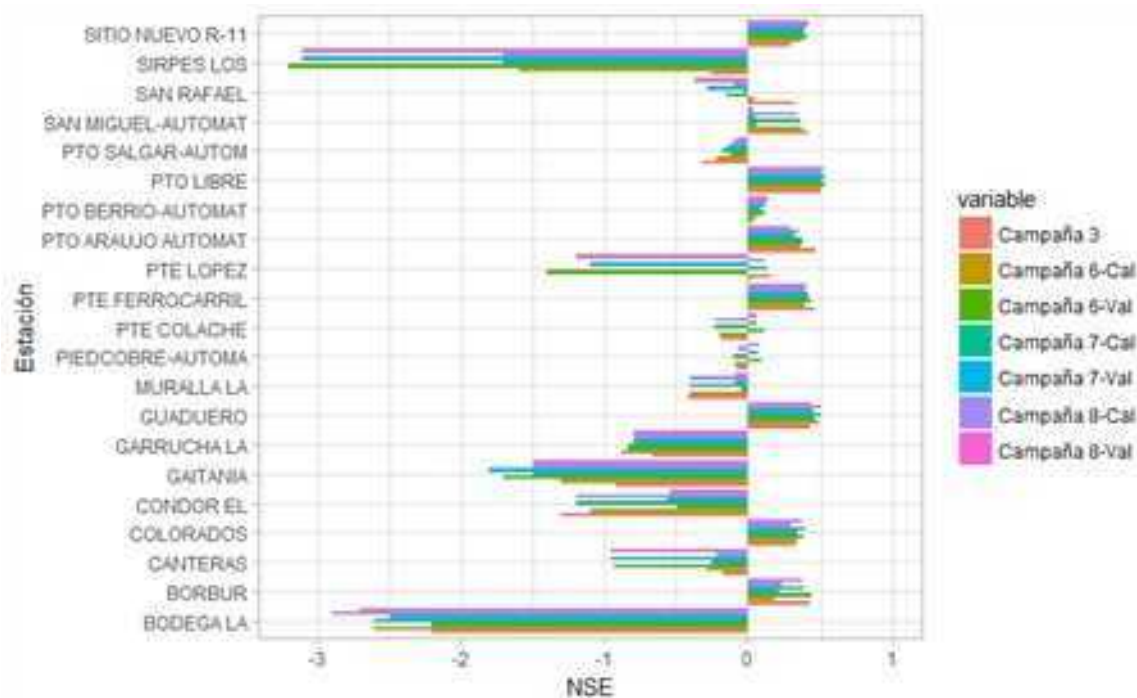
A continuación se muestran los resultados de los valores de NSE por campaña de calibración (campaña de referencia 3 y campañas 6, 7 y 8) y por estación (88 en total). Estos valores fueron utilizados como insumo para los análisis presentados en el numeral 5.2, Calibración del modelo MESH en la Macro Cuenca Magdalena Cauca y se presentan aquí para realizar comparaciones rápidas adicionales por estación, y no grupales, como se hizo en dicho numeral. Las estaciones que se utilizaron dentro del proceso de calibración se presentaron en el Anexo C, y corresponden a un subgrupo de los 88 puntos, cuya regulación es natural.



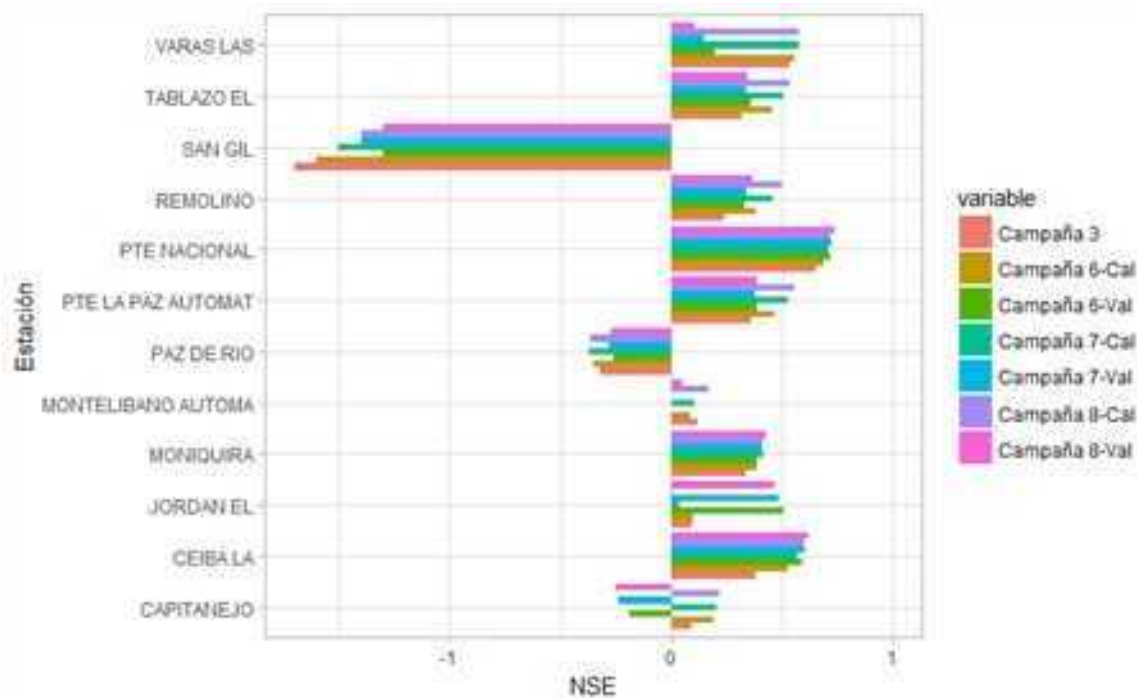
Anexo E - 1. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



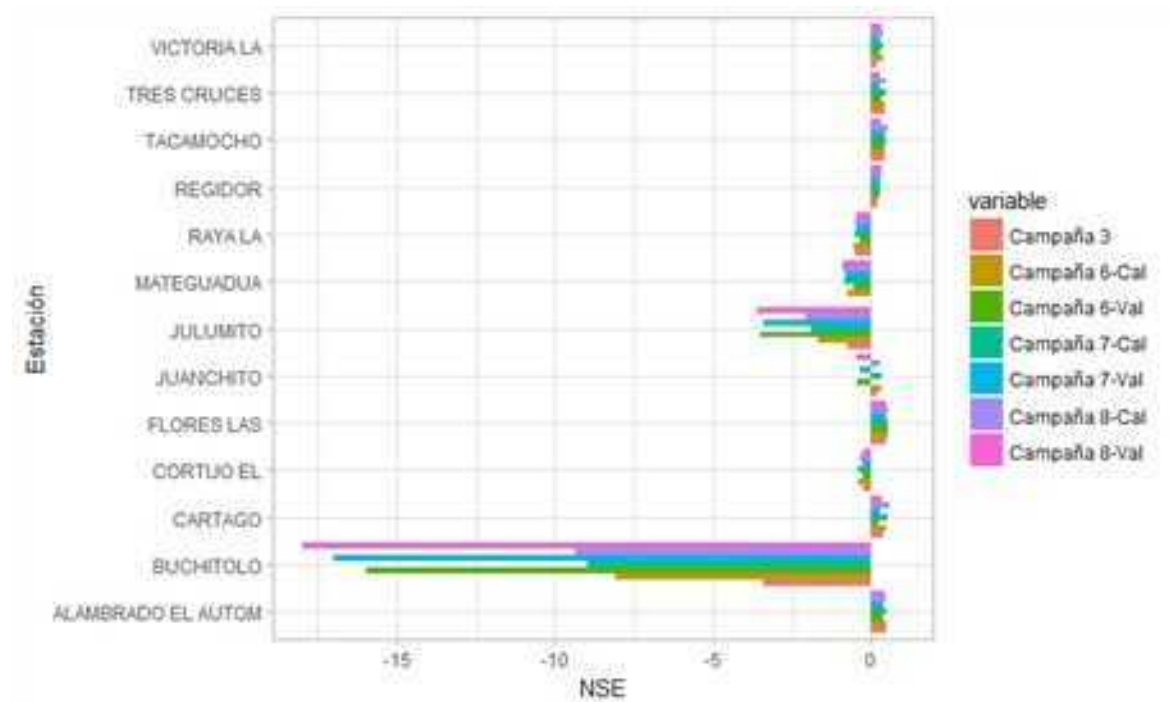
Anexo E - 2. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



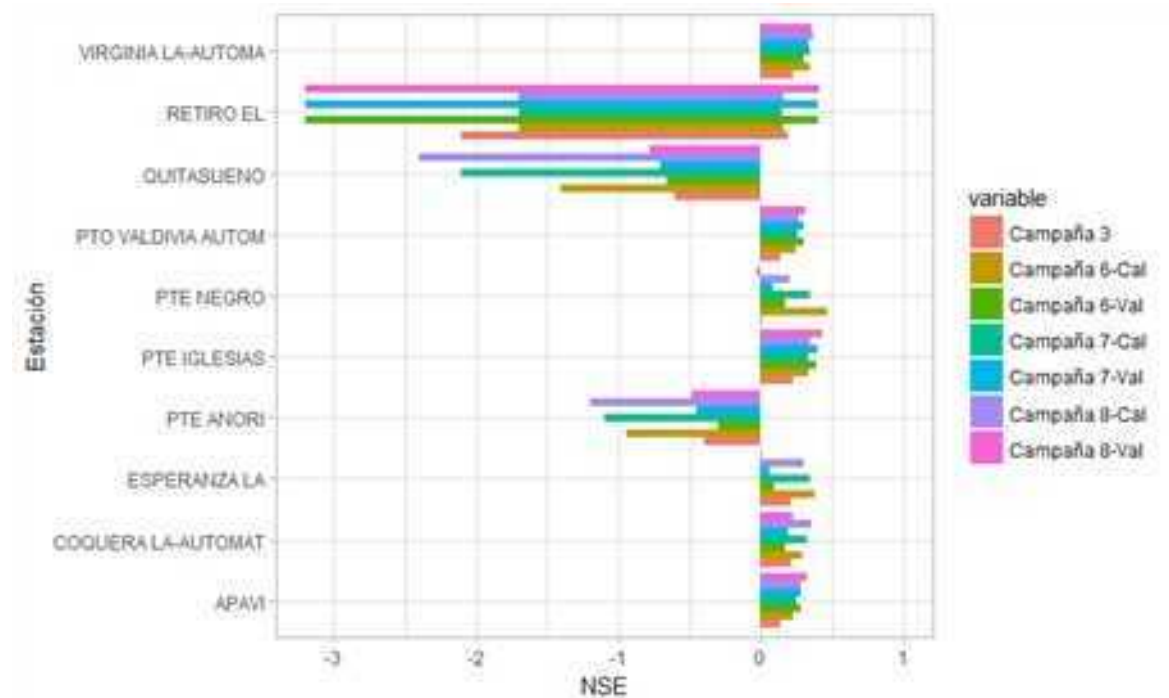
Anexo E - 3. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



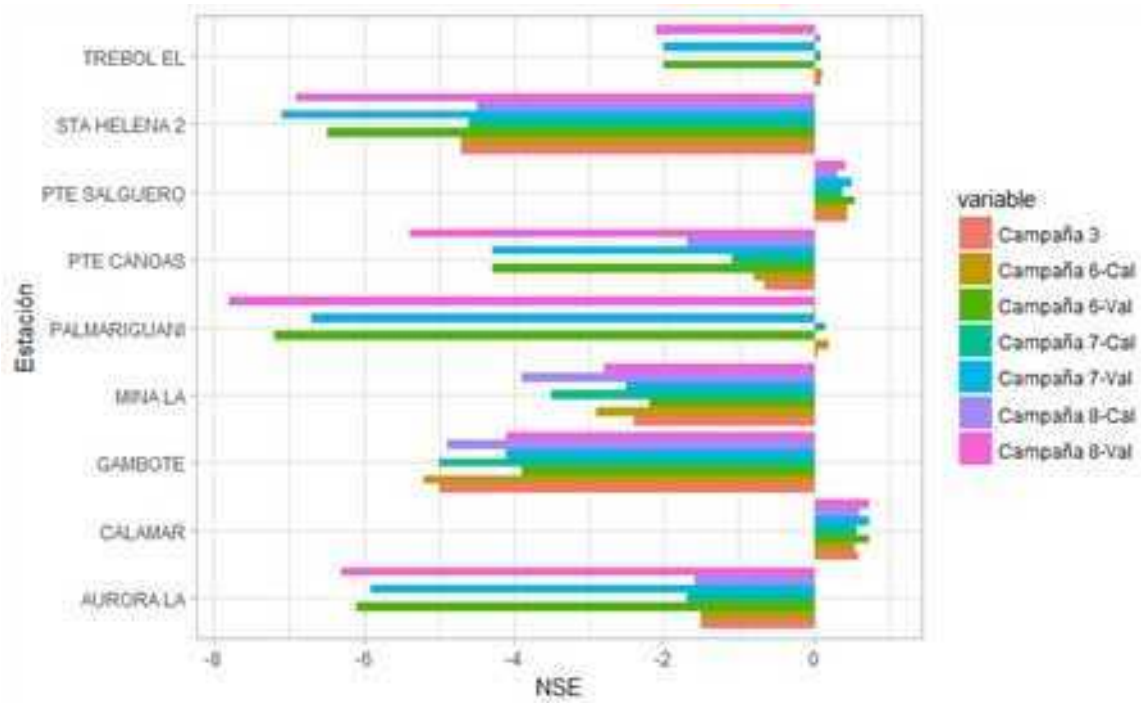
Anexo E - 4. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



Anexo E - 5. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



Anexo E - 6. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.



Anexo E - 7. Resultados de las campañas de calibración sobre la MCMC.

F. Resultados de caudal por estación hidrométrica en la Macro Cuenca Magdalena Cauca, para campaña de calibración 6

En este anexo se muestran los resultados de simulación por estación (punto de control) en la Macro Cuenca, bajo los valores de la campaña de calibración 6. El anexo comienza con un cuadro resumen de los resultados de calibración por campaña y por estación, y continúa mostrando los resultados de caudal por estación tanto para calibración como para validación.

Se incluye dentro del anexo, un subgrupo de 8 puntos de control adicionales que no fueron incluidos en ningún momento dentro de la metodología del trabajo de investigación, debido a problemas de regulación hidráulica (natural, por desviaciones o presencia de ciengas, o artificial, por presencia de embalses) lo que desmejoraba notoriamente los resultados de la comparación.

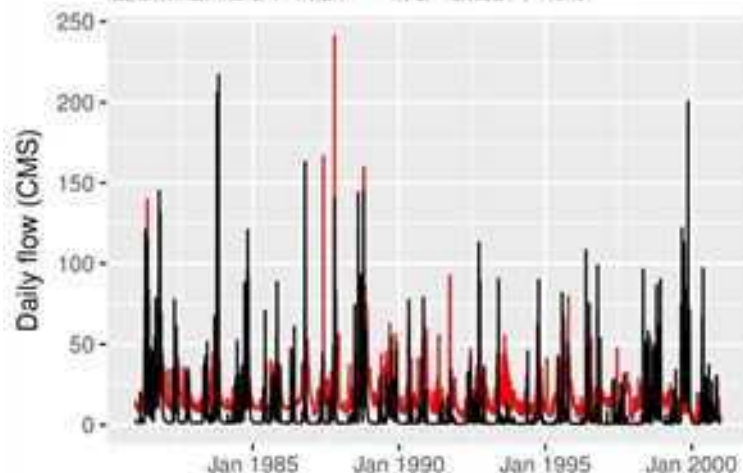
No .	Código	Nombre	Código en anexo	Campaña 3	Campaña 6 - Cal	Campaña 6 - Val	Campaña 7 - Cal	Campaña 7 - Val	Campaña 8 - Cal	Campaña 8 - Val
1	21017020	SAN_AGUSTIN	QOMEAS1	-1.1	-0.5	-0.76	-0.5	-0.68	-0.47	-0.66
2	21017040	SALADO_BLANCO	QOMEAS2	-0.82	-0.58	-0.95	-0.48	-0.88	-0.4	-0.84
3	21027010	PERICONGO	QOMEAS3	-0.89	-0.64	-0.95	-0.56	-0.86	-0.49	-0.83
4	21037010	PTE_GARCES	QOMEAS4	-1.1	-0.96	-1.9	-0.84	-1.6	-0.76	-1.6
5	21057030	PTE_RICAURTE	QOMEAS5	-0.5	-0.56	-0.4	-0.59	-0.44	-0.61	-0.49
6	21057060	PAICOL	QOMEAS6	-0.98	-0.78	-0.81	-0.76	-0.81	-0.73	-0.8
7	21057080	VILLALOSADA	QOMEAS7	-0.98	-0.73	-0.91	-0.69	-0.93	-0.65	-0.92
8	21087070	JARDIN_EL_HDA	QOMEAS8	0.28	0.13	0.38	0.056	0.35	0.11	0.42
9	21097070	PTE_SANTANDER_AUTO	QOMEAS9	-1.1	-0.9	-0.98	-0.81	-1	-0.72	-0.95
10	21137010	PURIFICACION-AUTOM	QOMEAS10	-1	-0.79	-0.87	-0.69	-0.91	-0.57	-0.82
11	21137030	PTE_CARRETERA	QOMEAS11	-0.37	-0.37	-0.25	-0.38	-0.25	-0.38	-0.25
12	21147010	SAN_ALFONSO	QOMEAS12	-1.1	-0.76	-0.42	-0.7	-0.43	-0.64	-0.4
13	21147030	CARRASPOSO	QOMEAS13	-0.9	-0.5	-0.49	-0.46	-0.52	-0.45	-0.49
14	21197030	PLAYA_LA	QOMEAS14	0.0088	0.14	0.1	0.15	0.08	0.17	0.094
15	21197150	LIMONAR_EL	QOMEAS15	0.075	0.25	0.21	0.29	0.2	0.31	0.23
16	21207960	PTE_PORTILLO	QOMEAS16	-0.58	-1.2	-1.4	-1.4	-1.5	-1.4	-1.5
17	21217070	PAYANDE	QOMEAS17	0.07	-0.26	-0.97	-0.44	-0.77	-0.49	-0.86
18	21217120	PTE_CARRETERA	QOMEAS18	-1.5	-4.7	-12	-6	-11	-6.8	-12
19	21237020	ARRANCAPLUMAS-AUTO	QOMEAS19	-0.46	-0.32	-0.092	-0.29	-0.11	-0.21	-0.064
20	21257100	NUEVA_LA	QOMEAS20	-0.19	-0.84	-1.1	-0.84	-1.2	-0.83	-1.2
21	22017010	BOCAS	QOMEAS21	-1.4	-1.6	-0.59	-1.8	-0.61	-1.8	-0.62
22	22017020	SARDINAS_LAS	QOMEAS22	-0.62	-0.95	-1.2	-0.97	-1.3	-0.98	-1.3
23	22027010	CONDOR_EL	QOMEAS23	-1.3	-1.1	-0.49	-1.2	-0.57	-1.2	-0.55
24	22027020	GAITANIA	QOMEAS24	-0.92	-1.3	-1.7	-1.5	-1.8	-1.5	-1.5

25	22057010	PIED_COBRE-AUTOMA	QOMEAS25	-0.082	-0.088	0.095	-0.097	0.074	-0.069	0.088
26	22057060	MURALLA_LA	QOMEAS26	-0.42	-0.4	-0.047	-0.41	-0.089	-0.4	-0.086
27	22057070	PTE_COLACHE	QOMEAS27	-0.19	-0.2	0.11	-0.23	0.061	-0.23	0.062
28	23017030	PTE_LOPEZ	QOMEAS28	0.014	0.16	-1.4	0.14	-1.1	0.12	-1.2
29	23037010	PTO_SALGAR-AUTOM	QOMEAS29	-0.32	-0.22	-0.12	-0.18	-0.14	-0.11	-0.083
30	23057140	SAN_MIGUEL-AUTOMAT	QOMEAS30	0.42	0.37	0.059	0.36	0.053	0.34	0.043
31	23067020	COLORADOS	QOMEAS31	0.33	0.34	0.39	0.34	0.4	0.3	0.38
32	23067040	PTO_LIBRE	QOMEAS32	0.51	0.52	0.54	0.52	0.54	0.52	0.53
33	23067050	GUADUERO	QOMEAS33	0.43	0.49	0.46	0.51	0.45	0.51	0.44
34	23087180	SIRPES_LOS	QOMEAS34	-0.25	-1.6	-3.2	-1.7	-3.1	-1.7	-3.1
35	23087190	GARRUCHA_LA	QOMEAS35	-0.67	-0.88	-0.84	-0.83	-0.8	-0.79	-0.79
36	23087210	CANTERAS	QOMEAS36	-0.18	-0.29	-0.94	-0.25	-0.96	-0.22	-0.96
37	23097030	PTO_BERRIO-AUTOMAT	QOMEAS37	0.039	0.06	0.11	0.082	0.11	0.13	0.15
38	23107020	BODEGA_LA	QOMEAS38	-2.2	-2.6	-2.2	-2.6	-2.5	-2.9	-2.7
39	23127010	BORBUR	QOMEAS39	0.43	0.18	0.44	0.21	0.39	0.23	0.38
40	23127020	PTO_ARAUJO_AUTOMAT	QOMEAS40	0.47	0.36	0.37	0.38	0.32	0.35	0.29
41	23147020	PTE_FERROCARRIL	QOMEAS41	0.46	0.4	0.44	0.42	0.42	0.4	0.41
42	23187280	SITIO_NUEVO_R-11	QOMEAS42	0.3	0.37	0.41	0.39	0.4	0.42	0.42
43	23197370	SAN_RAFAEL	QOMEAS43	0.32	0.038	-0.16	-0.024	-0.29	-0.097	-0.37
44	24017590	PTE_NACIONAL	QOMEAS44	0.66	0.69	0.72	0.71	0.73	0.72	0.74
45	24017600	MONQUIRA	QOMEAS45	0.34	0.39	0.39	0.42	0.41	0.42	0.43
46	24017640	CEIBA_LA	QOMEAS46	0.38	0.53	0.59	0.57	0.61	0.6	0.62
47	24027010	SAN_GIL	QOMEAS47	-1.7	-1.6	-1.3	-1.5	-1.4	-1.4	-1.3

48	24037360	JORDAN_EL	QOMEAS48	0.093	0.1	0.51	0.04	0.49	0.013	0.47
49	24037390	CAPITANEJO	QOMEAS49	0.096	0.19	-0.19	0.21	-0.24	0.22	-0.25
50	24037510	PAZ_DE_RIO	QOMEAS50	-0.32	-0.35	-0.26	-0.37	-0.28	-0.36	-0.27
51	24047020	REMOLINO	QOMEAS51	0.24	0.38	0.33	0.46	0.34	0.5	0.37
52	24067010	TABLAZO_EL	QOMEAS52	0.32	0.46	0.36	0.51	0.34	0.54	0.35
53	24067030	PTE_LA_PAZ_AUT OMAT	QOMEAS53	0.36	0.47	0.39	0.53	0.38	0.56	0.39
54	25017010	MONTELIBANO_A UTOMA	QOMEAS54	0.12	0.085	0.0031	0.11	0.0029	0.17	0.052
55	25027200	VARAS_LAS	QOMEAS55	0.54	0.56	0.2	0.58	0.15	0.58	0.11
56	25027270	FLORES_LAS	QOMEAS56	0.46	0.52	0.52	0.52	0.49	0.5	0.49
57	25027320	SAN_ROQUE	QOMEAS57	-130	-130	-150	-130	-160	-140	-170
58	25027330	PENONCITO	QOMEAS58	0.089	0.16	0.39	0.19	0.34	0.26	0.35
59	25027360	ARMENIA	QOMEAS59	-16	-17	-24	-16	-26	-16	-26
60	25027370	STA_ANA	QOMEAS60	-140	-140	-200	-140	-210	-160	-220
61	25027410	REGIDOR	QOMEAS61	0.19	0.24	0.27	0.26	0.25	0.32	0.31
62	25027490	AGUADAS_LAS	QOMEAS62	-7	-7.2	-6.3	-7	-6.7	-7	-6.7
63	25027530	BARBOSA	QOMEAS63	-1.6	-1.8	-1.1	-1.6	-1.2	-1.5	-1
64	25027640	TRES_CRUCES	QOMEAS64	0.42	0.44	0.31	0.45	0.26	0.45	0.26
65	25027680	MAGANGUE- ESPERANZA	QOMEAS65	-11	-12	-7.5	-11	-8	-11	-8
66	25027910	RAYA_LA	QOMEAS66	-0.53	-0.56	-0.35	-0.51	-0.45	-0.51	-0.45
67	25027930	COYONGAL	QOMEAS67	-1.9	-2.1	-1.4	-2	-1.5	-1.8	-1.4
68	25027940	TACAMOCHO	QOMEAS68	0.41	0.44	0.44	0.47	0.4	0.5	0.33
69	26017020	JULUMITO	QOMEAS69	-0.74	-1.7	-3.5	-1.9	-3.4	-2.1	-3.6
70	26027090	CORTIJO_EL	QOMEAS70	-0.28	-0.42	-0.25	-0.4	-0.29	-0.39	-0.28
71	26067010	JUANCHITO	QOMEAS71	0.17	0.33	-0.45	0.3	-0.36	0.25	-0.46
72	26077060	BUCHITOLO	QOMEAS72	-3.4	-8.1	-16	-9	-17	-9.4	-18
73	26107070	VICTORIA_LA	QOMEAS73	0.19	0.36	0.26	0.36	0.29	0.36	0.31

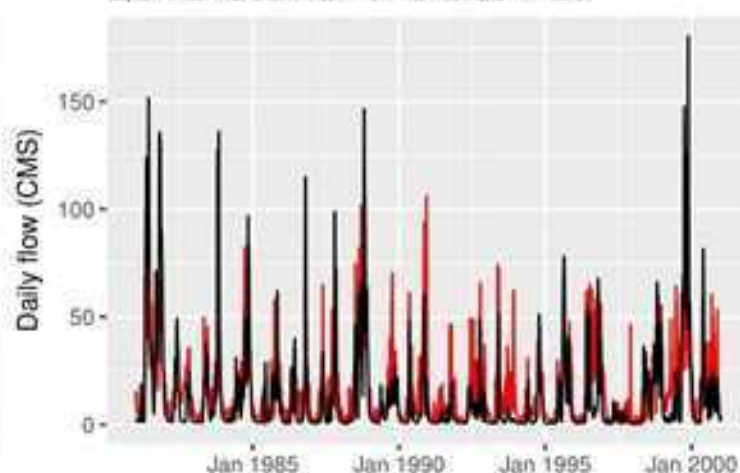
74	26107130	MATEGUADUA	QOMEAS74	0.00081	-0.76	-0.58	-0.84	-0.82	-0.9	-0.91
75	26127010	ALAMBRADO_EL_AUTOM	QOMEAS75	0.45	0.46	0.39	0.49	0.38	0.49	0.4
76	26127040	CARTAGO	QOMEAS76	0.38	0.45	0.24	0.52	0.26	0.55	0.3
77	26147140	PTE_NEGRO	QOMEAS77	0.0052	0.47	0.17	0.34	0.081	0.2	-0.023
78	26157020	RETIRO_EL	QOMEAS78	0.19	0.16	0.4	0.15	0.4	0.16	0.41
79	26177030	VIRGINIA_LA-AUTOMA	QOMEAS79	0.22	0.34	0.3	0.35	0.33	0.37	0.36
80	26187040	QUITASUENO	QOMEAS80	-0.61	-1.4	-0.66	-2.1	-0.71	-2.4	-0.78
81	26207030	PTE_IGLESIAS	QOMEAS81	0.23	0.33	0.39	0.33	0.4	0.34	0.43
82	26237040	PTO_VALDIVIA_AUTOM	QOMEAS82	0.14	0.25	0.3	0.26	0.3	0.27	0.31
83	26247020	COQUERA_LA-AUTOMAT	QOMEAS83	0.21	0.29	0.17	0.32	0.19	0.36	0.23
84	26247030	APAVI	QOMEAS84	0.14	0.23	0.28	0.25	0.28	0.28	0.32
85	27027090	PTE_ANORI	QOMEAS85	-0.4	-0.95	-0.3	-1.1	-0.45	-1.2	-0.49
86	27037010	ESPERANZA_LA	QOMEAS86	0.21	0.38	0.096	0.35	0.061	0.3	0.011
87	27037020	RETIRO_EL	QOMEAS87	-2.1	-1.7	-3.2	-1.7	-3.2	-1.7	-3.2
88	28017110	MINA_LA	QOMEAS88	-2.4	-2.9	-2.2	-3.5	-2.5	-3.9	-2.8
89	28037030	PTE_SALGUERO	QOMEAS89	0.44	0.44	0.54	0.38	0.51	0.31	0.43
90	28037090	PTE_CANOAS	QOMEAS90	-0.66	-0.81	-4.3	-1.1	-4.3	-1.7	-5.4
91	28047010	AURORA_LA	QOMEAS91	-1.5	-1.5	-6.1	-1.7	-5.9	-1.6	-6.3
92	28047050	PALMARIGUANI	QOMEAS92	0.045	0.19	-7.2	0.16	-6.7	0.016	-7.8
93	29037020	CALAMAR	QOMEAS93	0.59	0.55	0.73	0.57	0.73	0.61	0.74
94	29037080	GAMBOTE	QOMEAS94	-5	-5.2	-3.9	-5	-4.1	-4.9	-4.1
95	29037450	STA_HELENA_2	QOMEAS95	-4.7	-4.7	-6.5	-4.6	-7.1	-4.5	-6.9
96	29067010	TREBOL_EL	QOMEAS96	0.098	0.11	-2	0.095	-2	0.09	-2.1

QOMEAS91 NS= -1.5 bias = 50



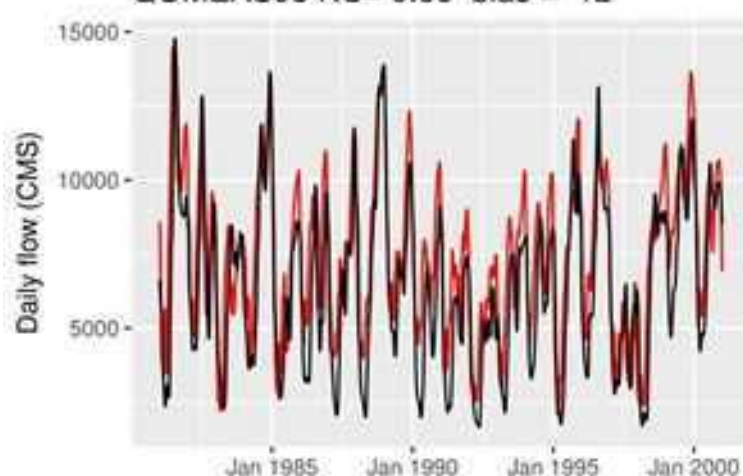
Discharge — Observ. — Simul.

QOMEAS92 NS= 0.19 bias = 20



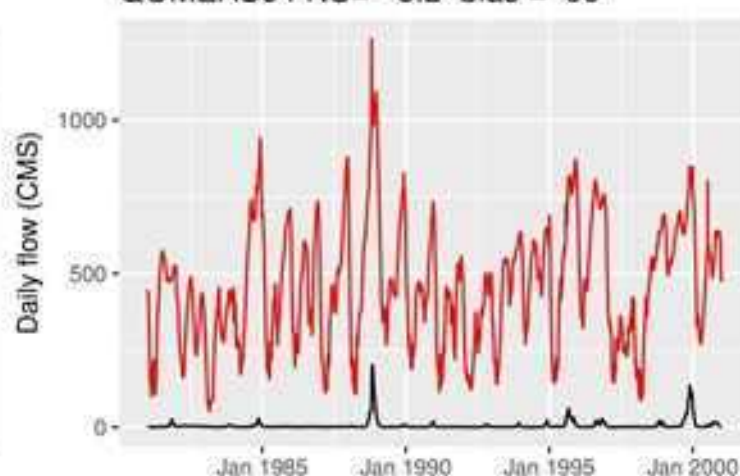
Discharge — Observ. — Simul.

QOMEAS93 NS= 0.55 bias = 12



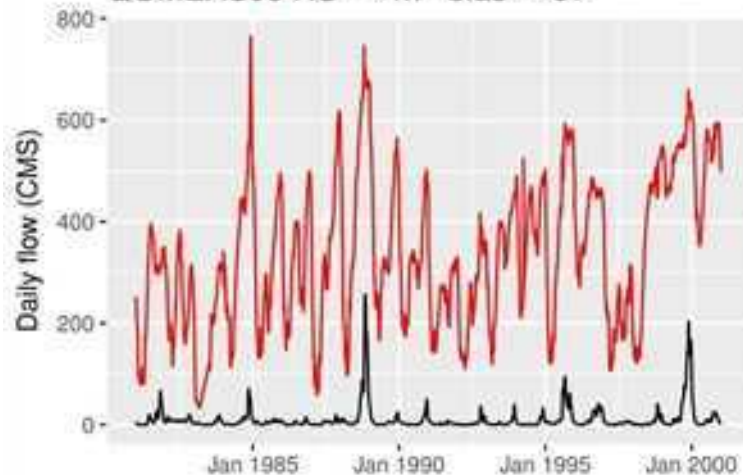
Discharge — Observ. — Simul.

QOMEAS94 NS= -5.2 bias = 99



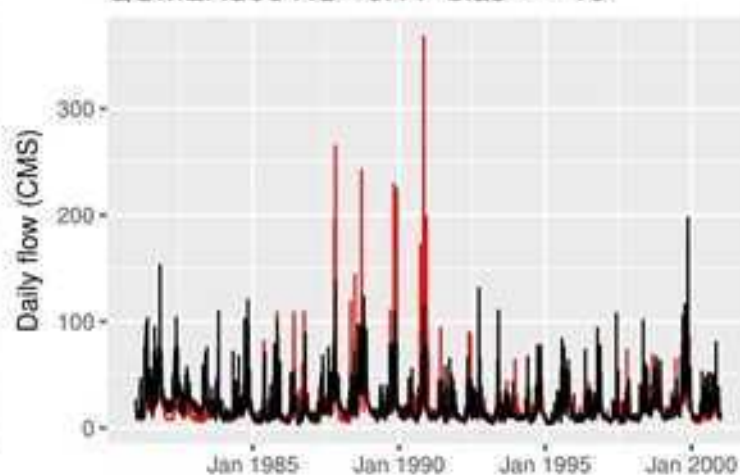
Discharge — Observ. — Simul.

QOMEAS95 NS= -4.7 bias = 97

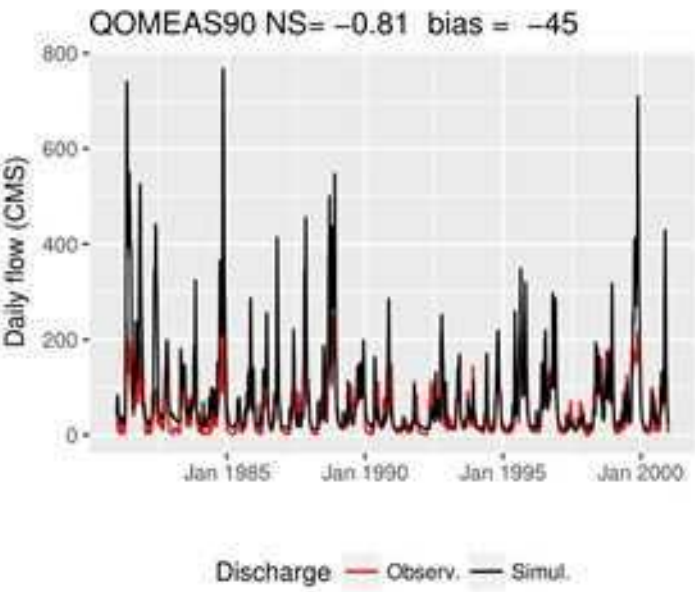
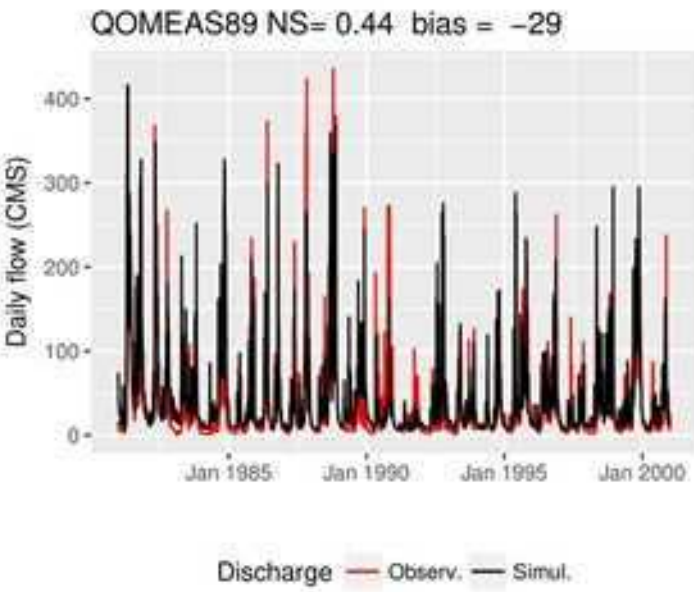
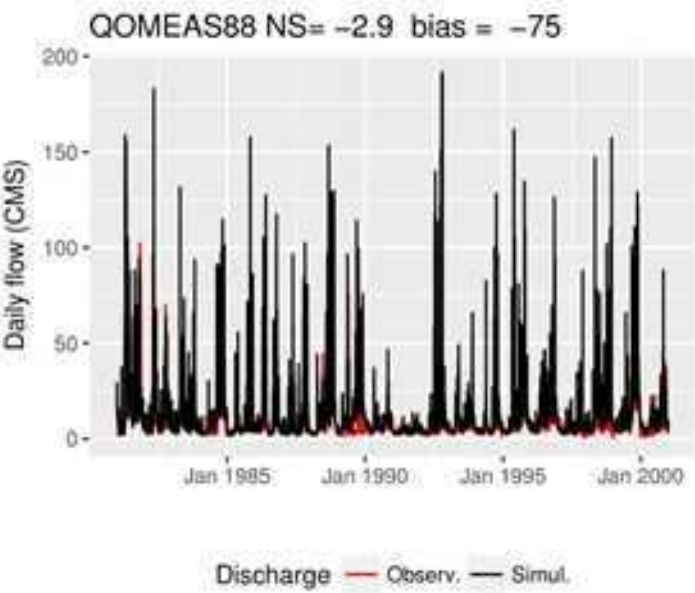
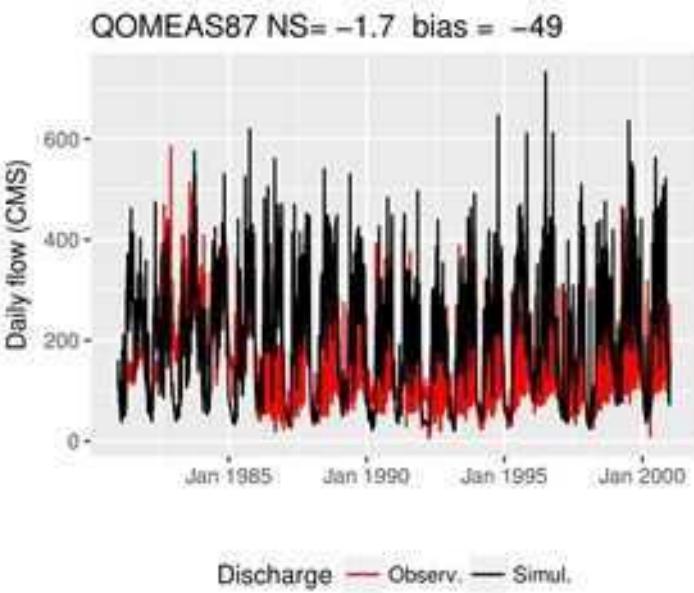
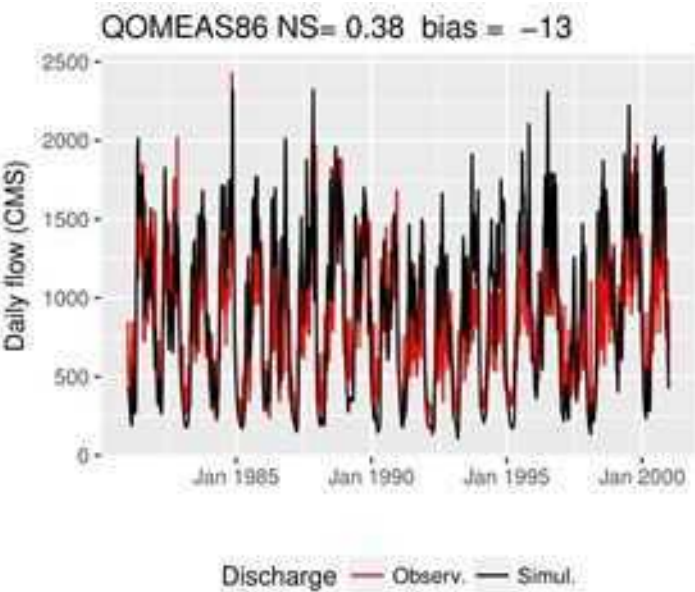
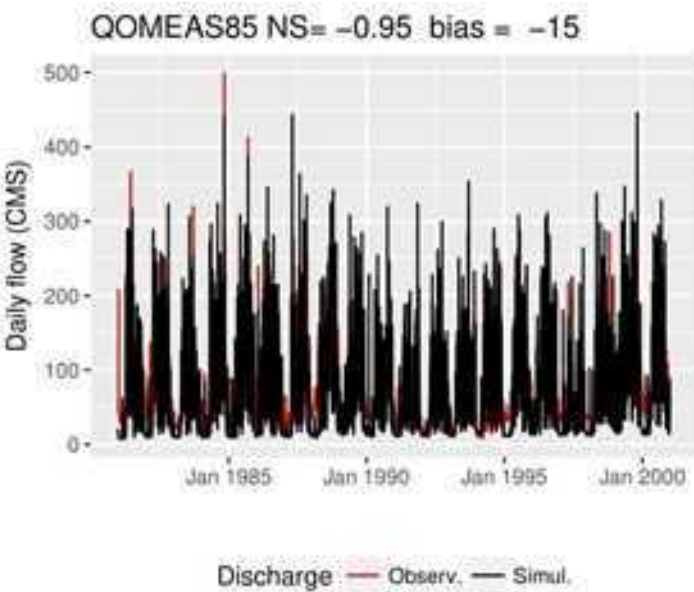


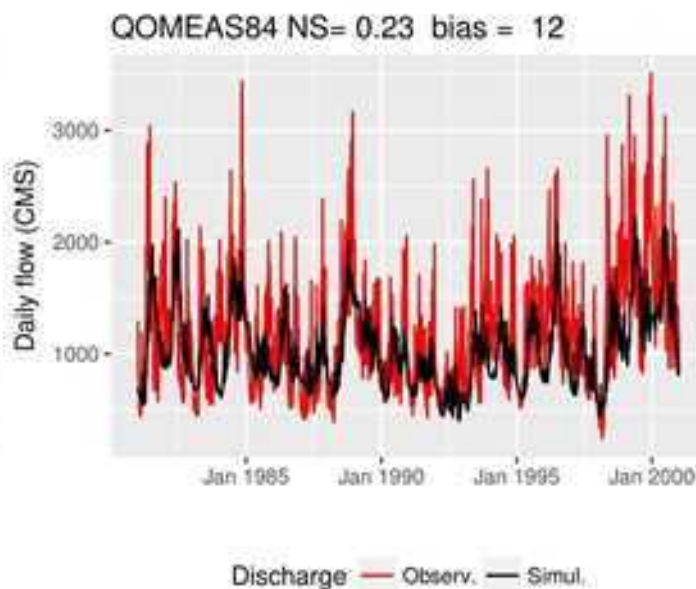
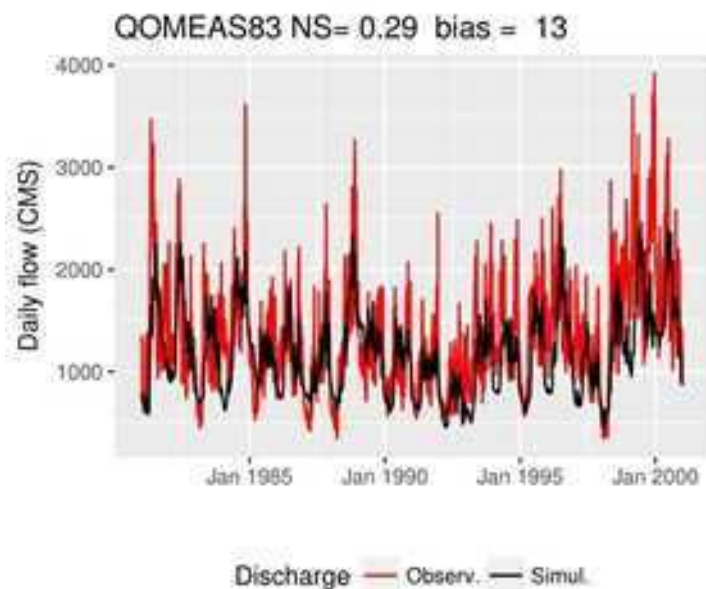
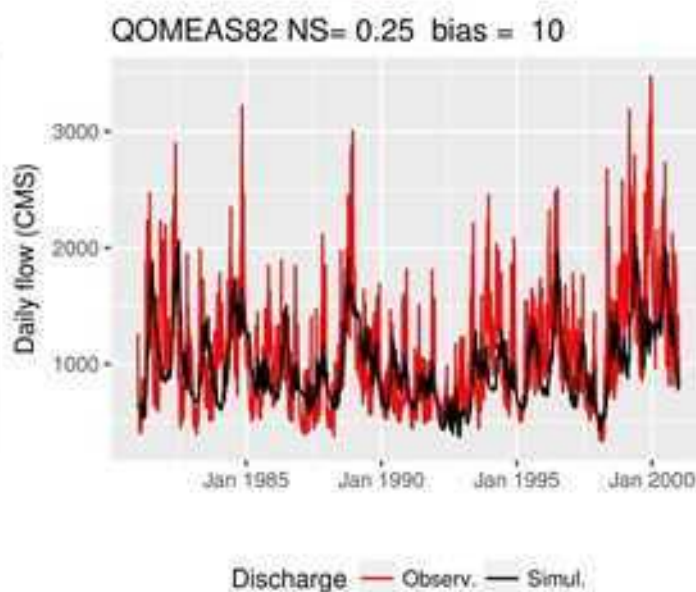
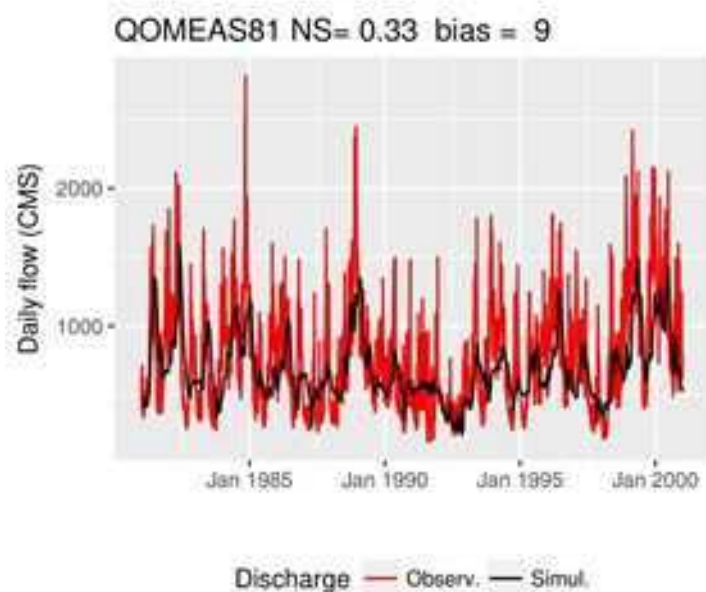
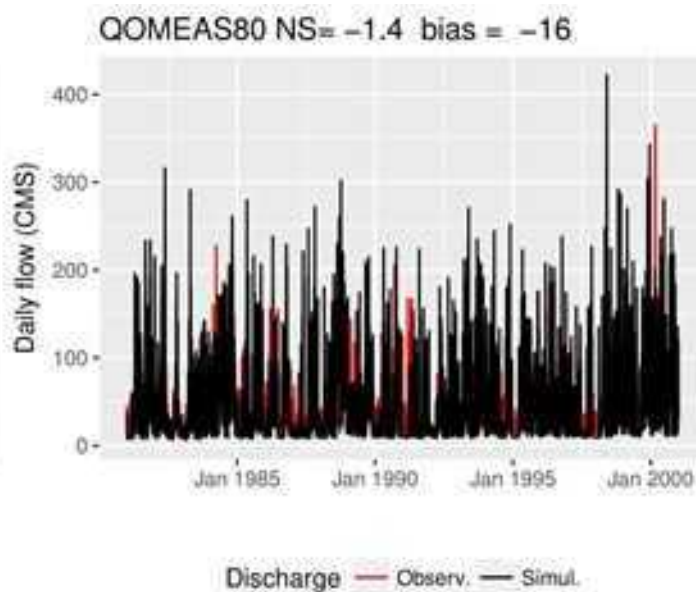
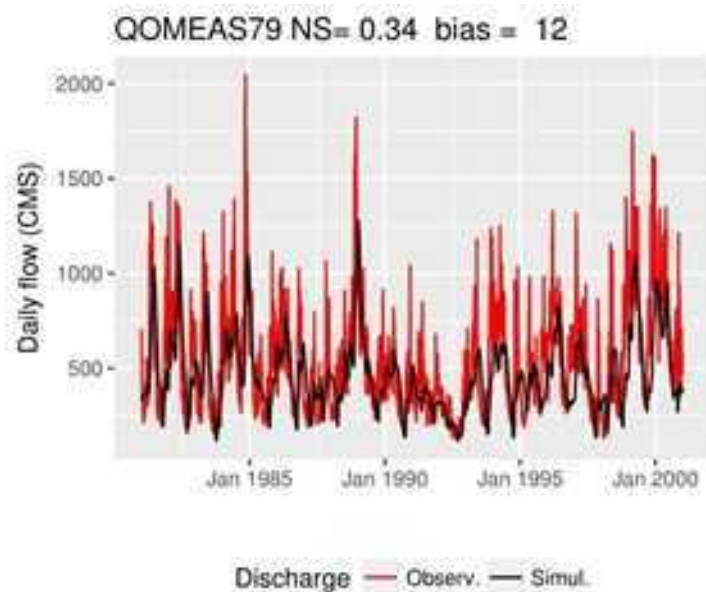
Discharge — Observ. — Simul.

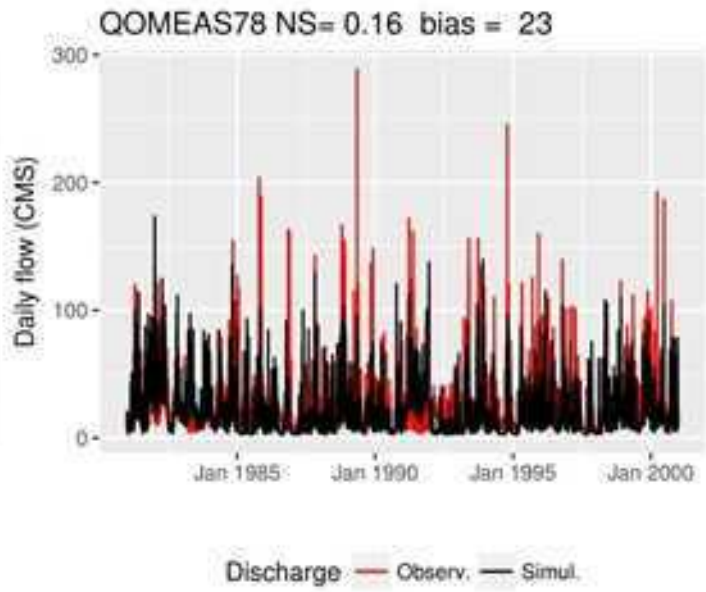
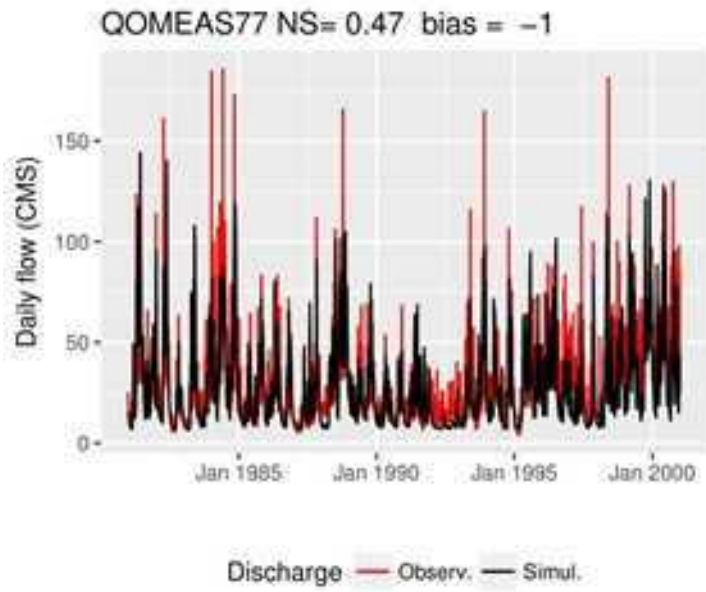
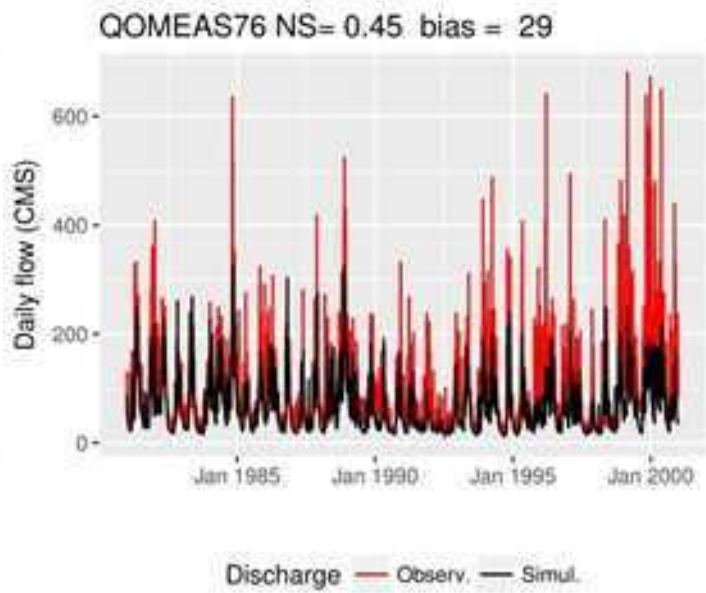
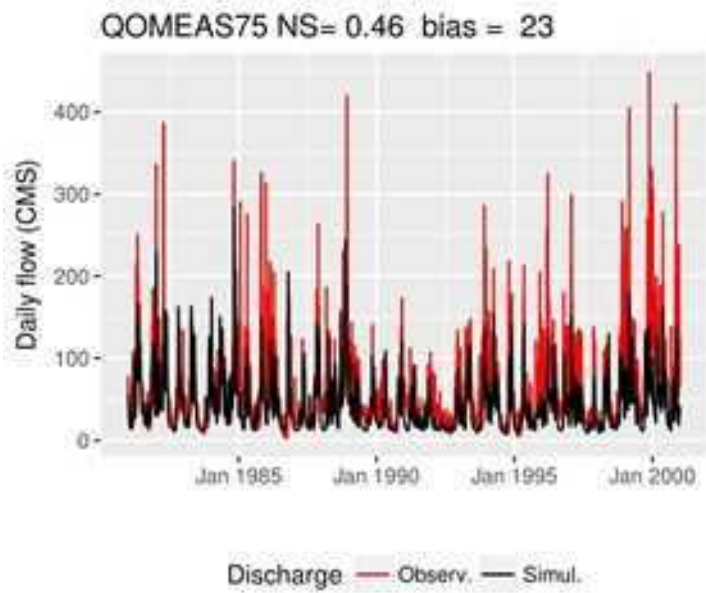
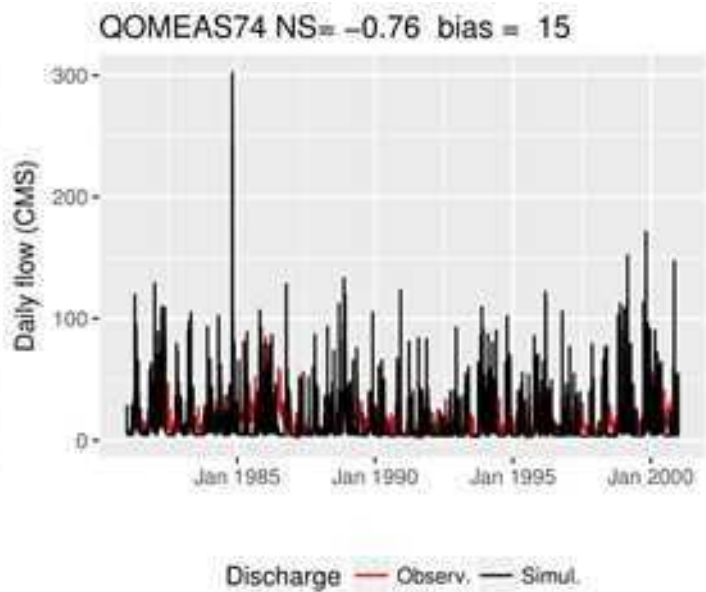
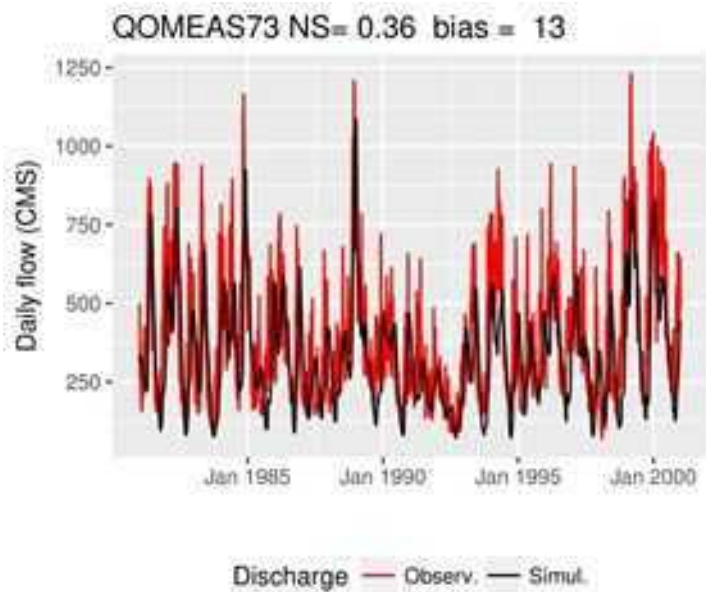
QOMEAS96 NS= 0.11 bias = -10

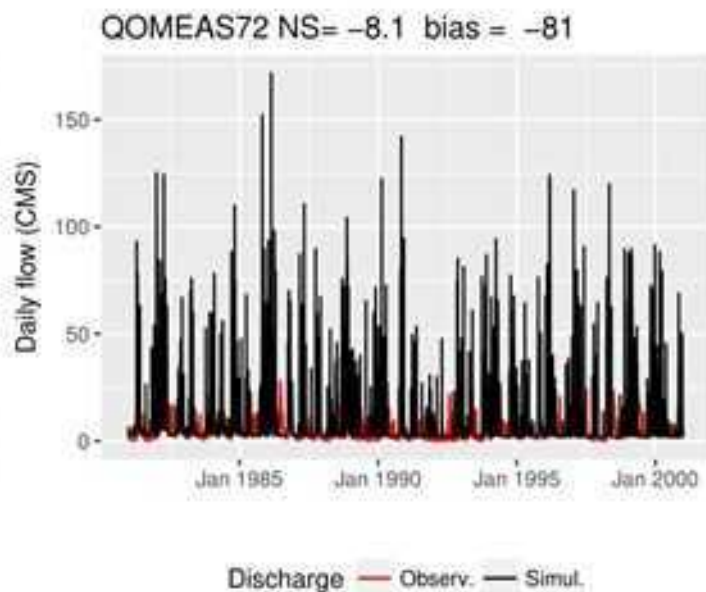
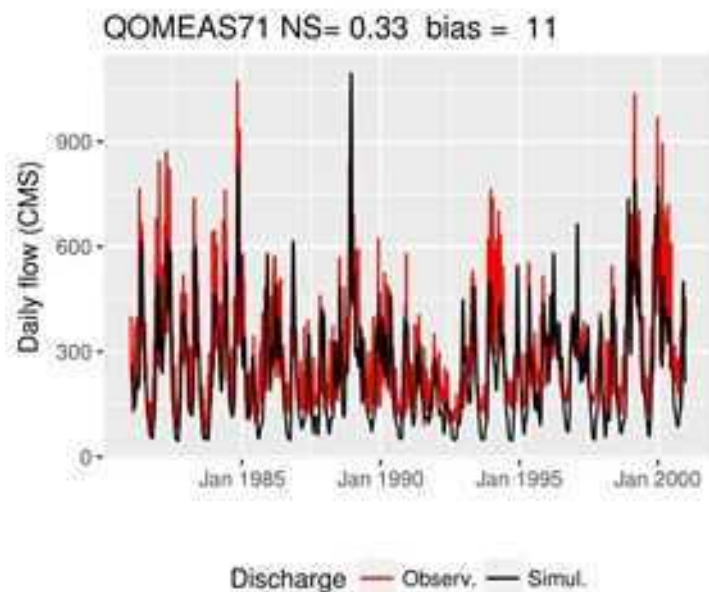
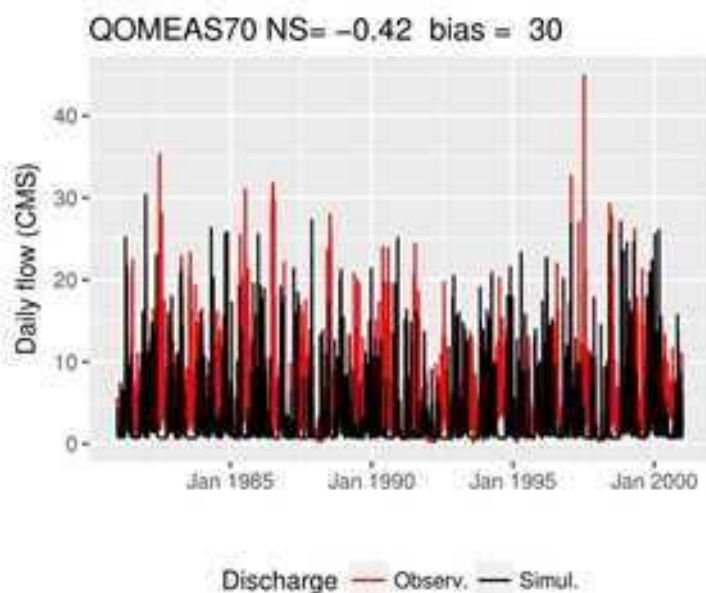
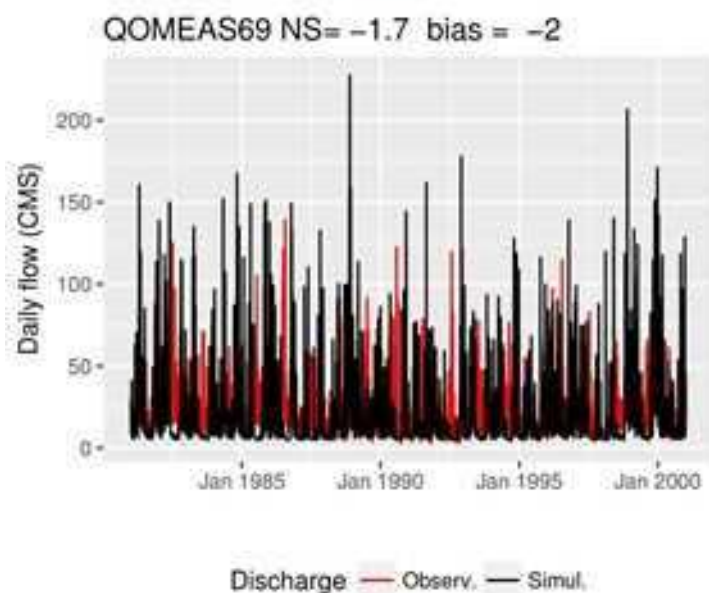
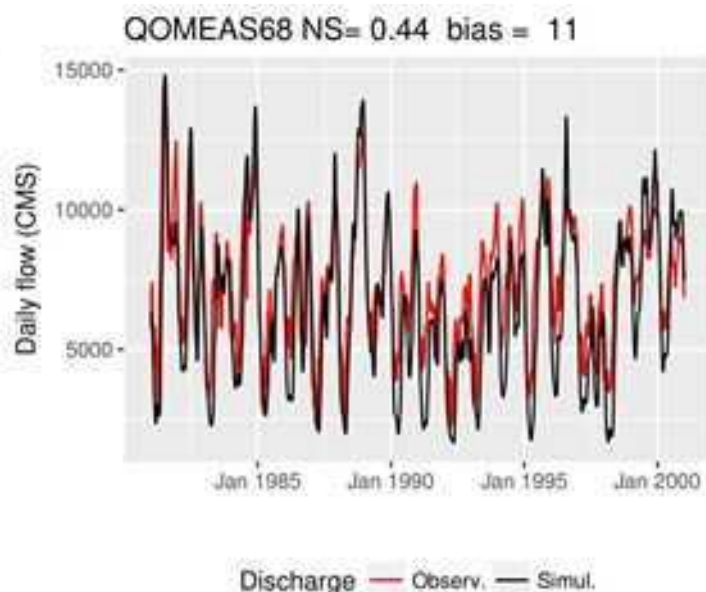
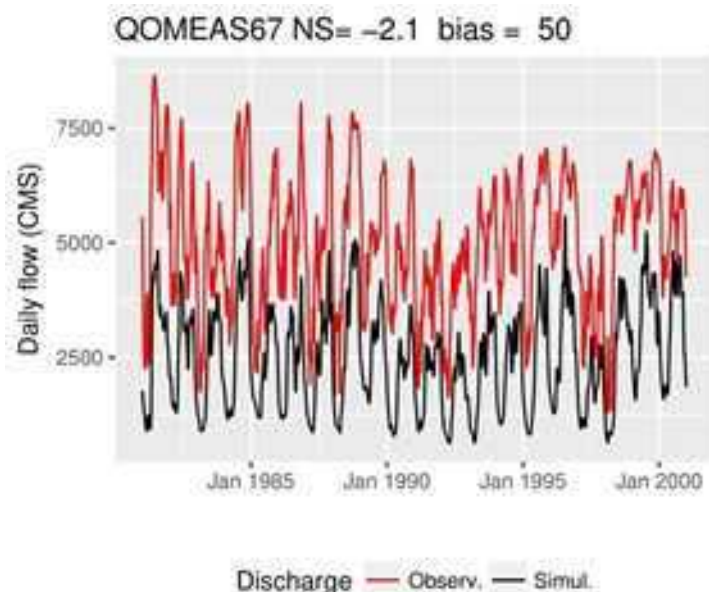


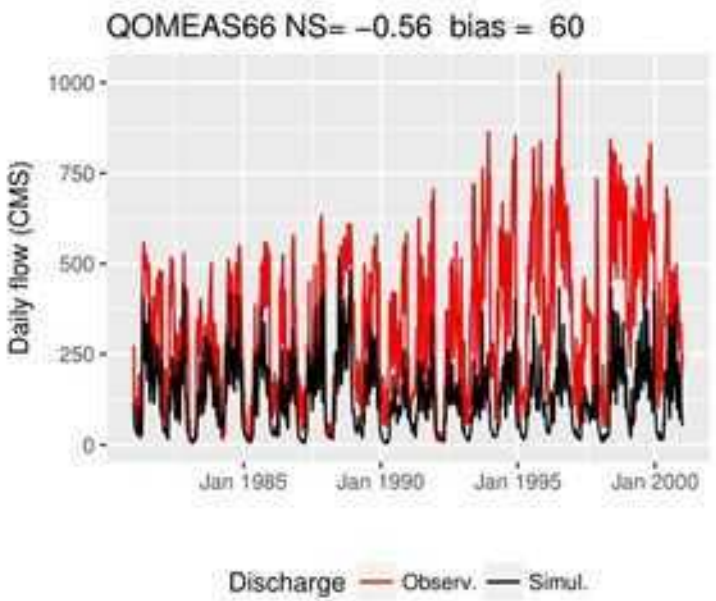
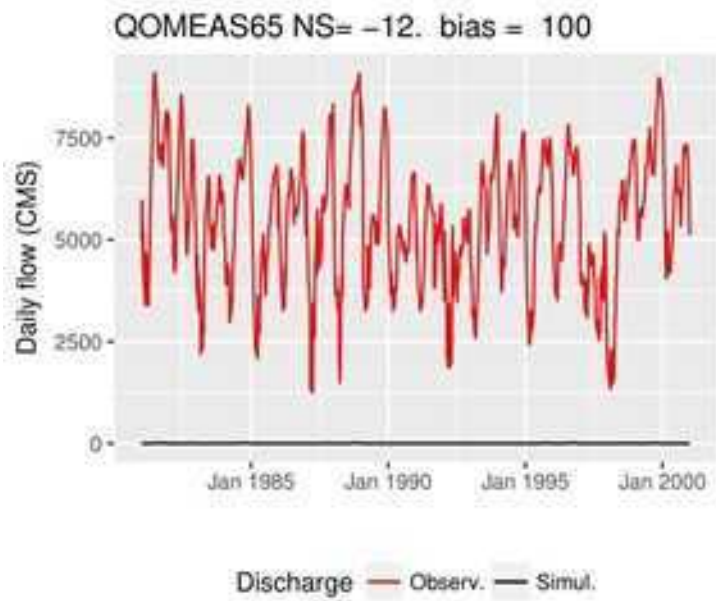
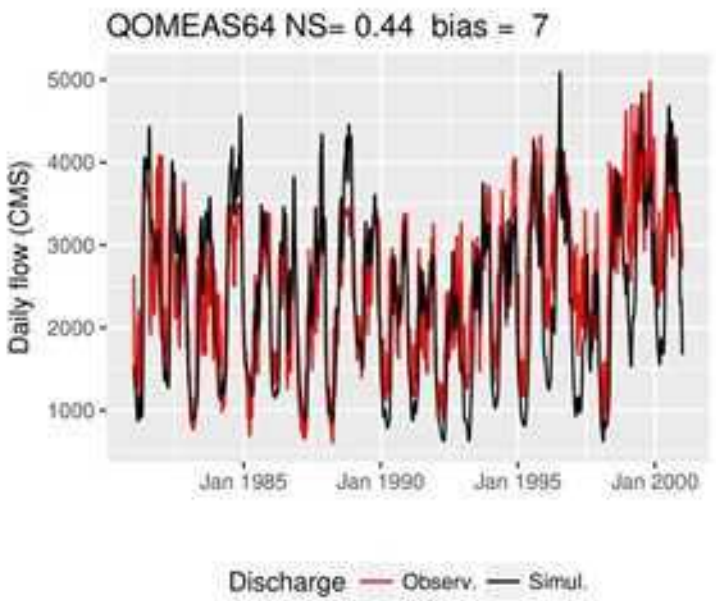
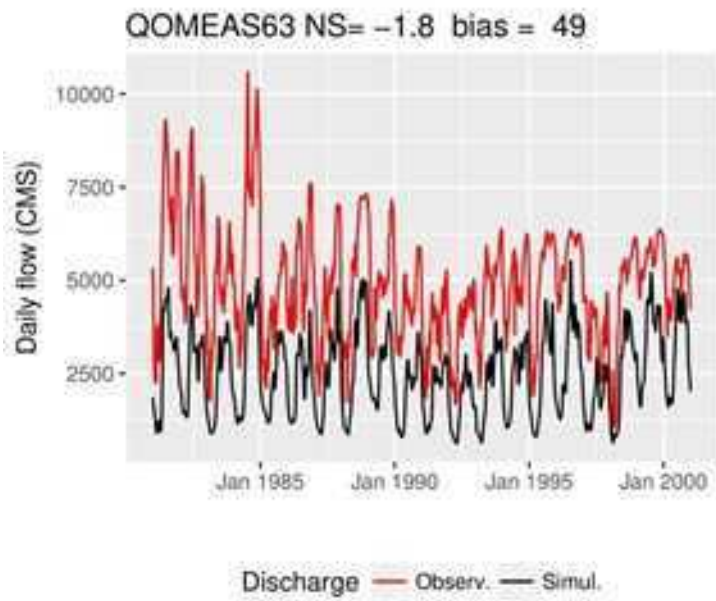
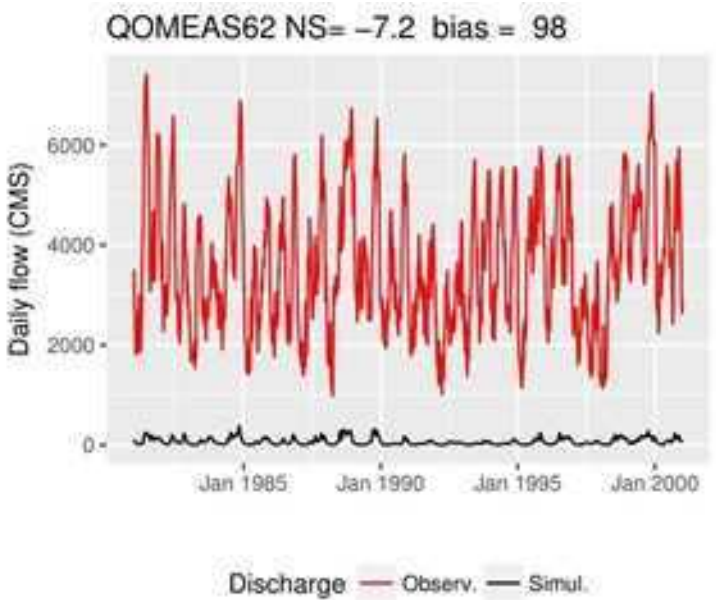
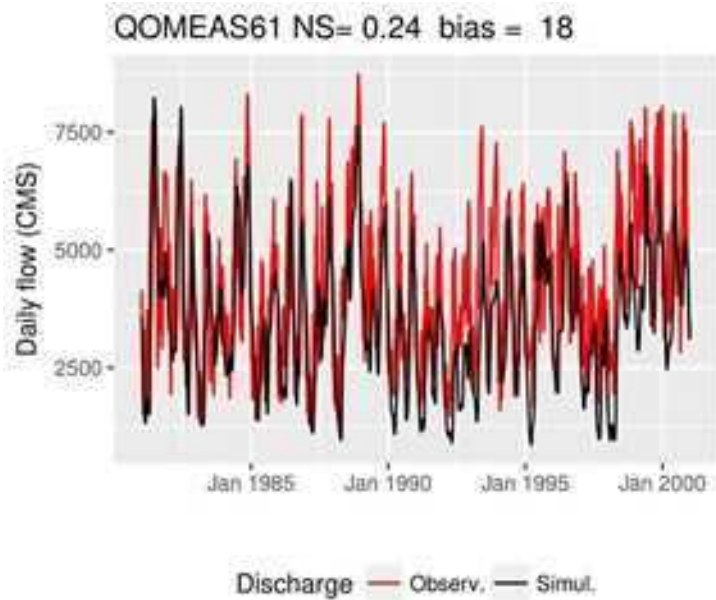
Discharge — Observ. — Simul.

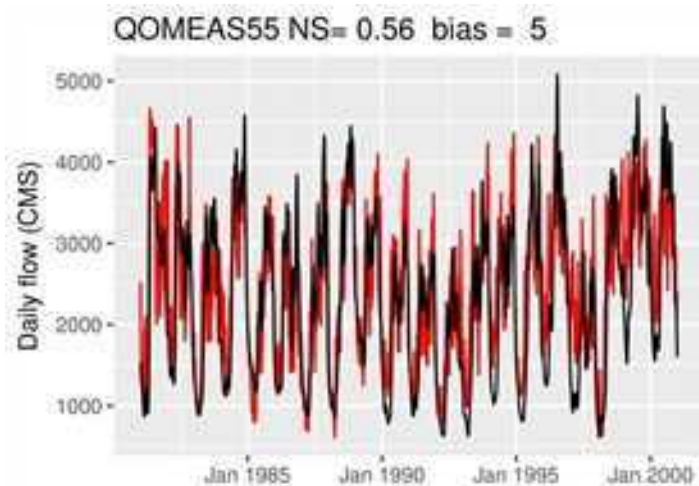




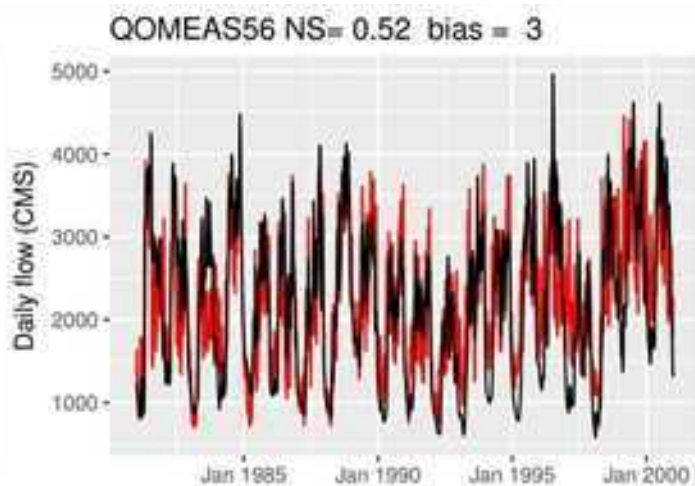




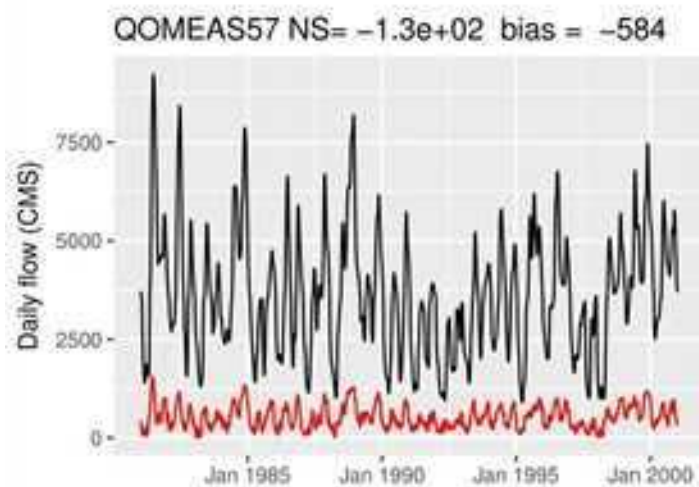




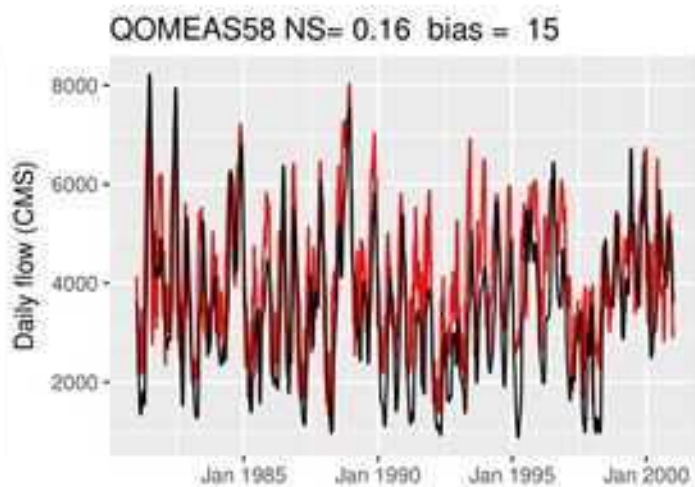
Discharge — Observ. — Simul.



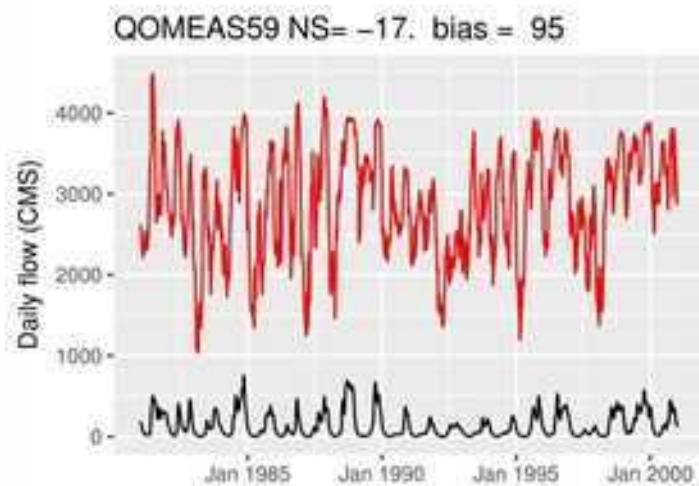
Discharge — Observ. — Simul.



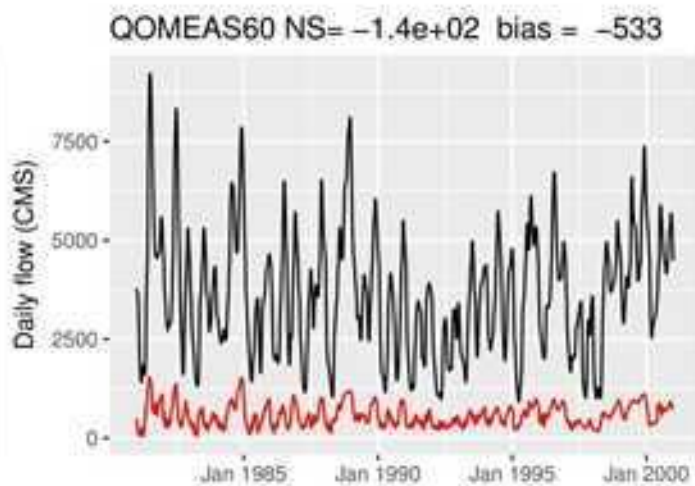
Discharge — Observ. — Simul.



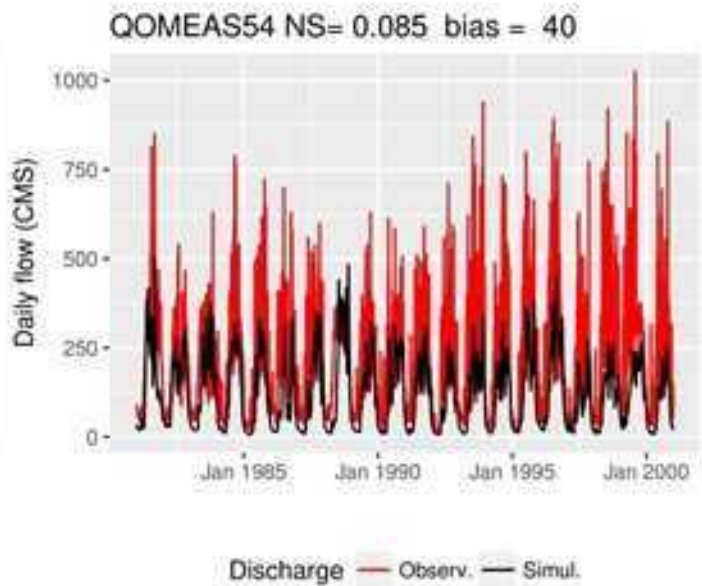
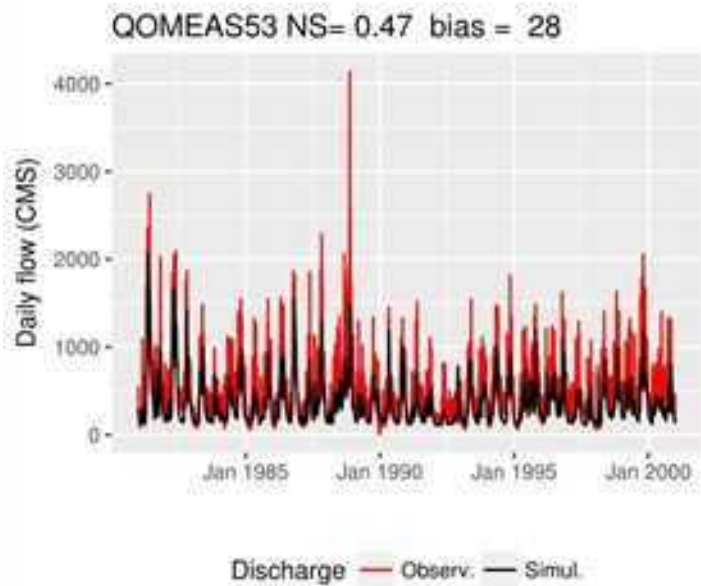
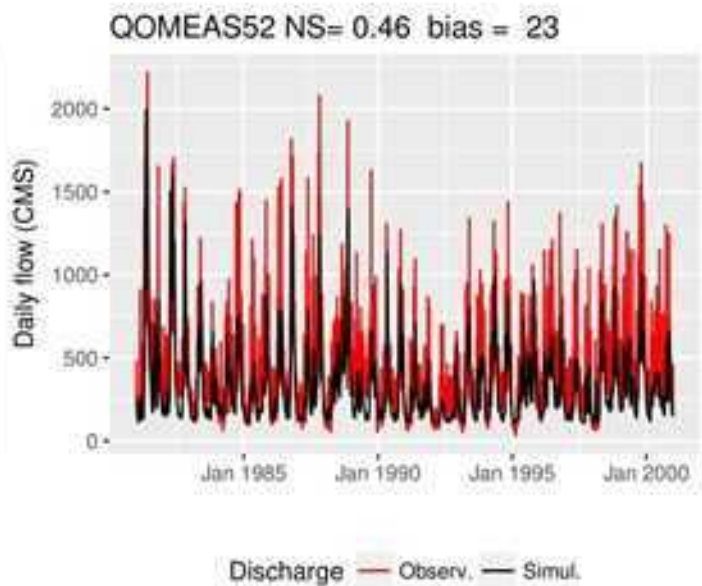
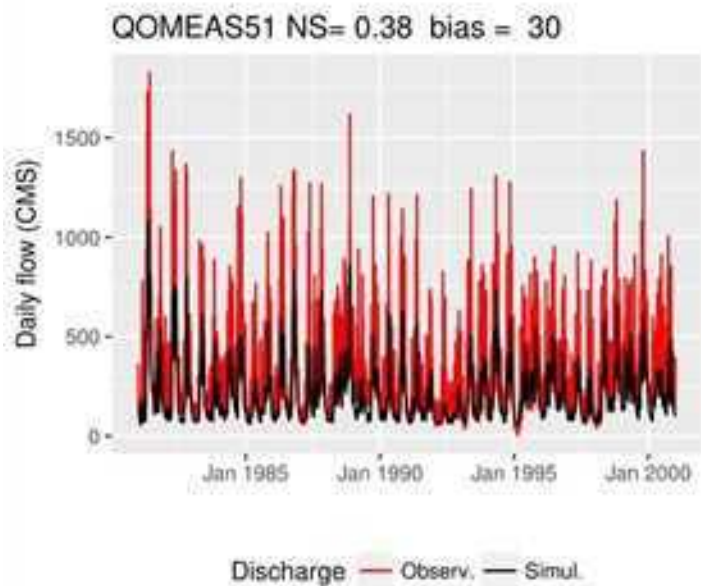
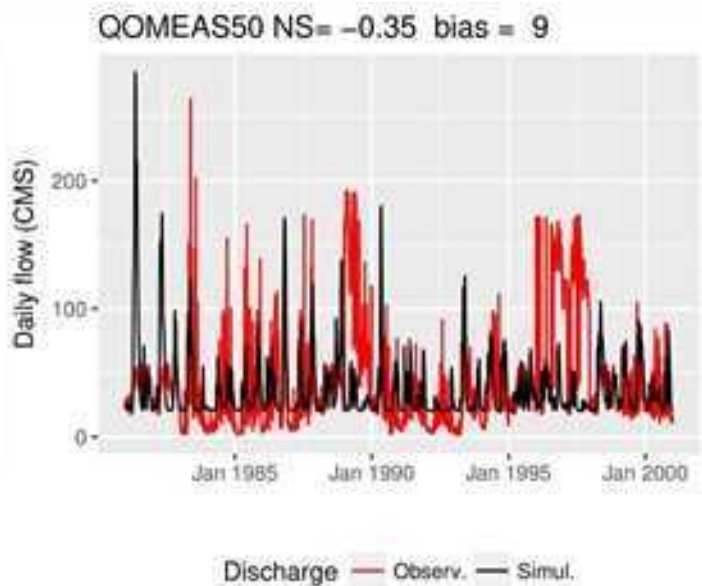
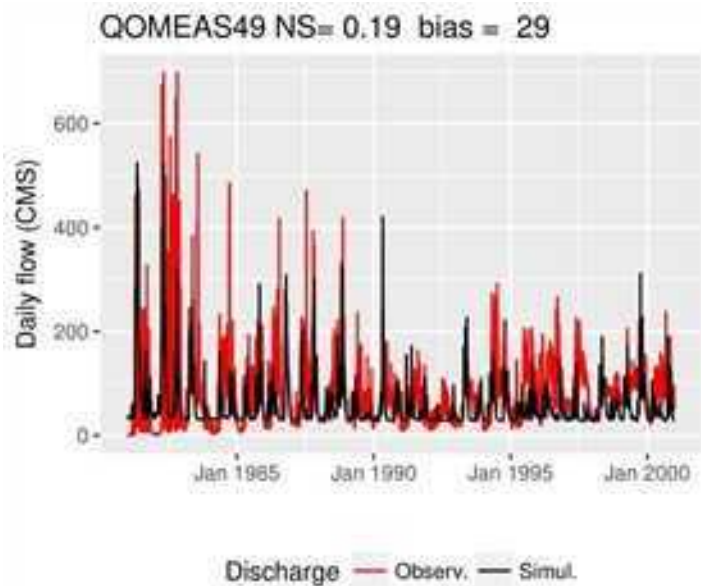
Discharge — Observ. — Simul.

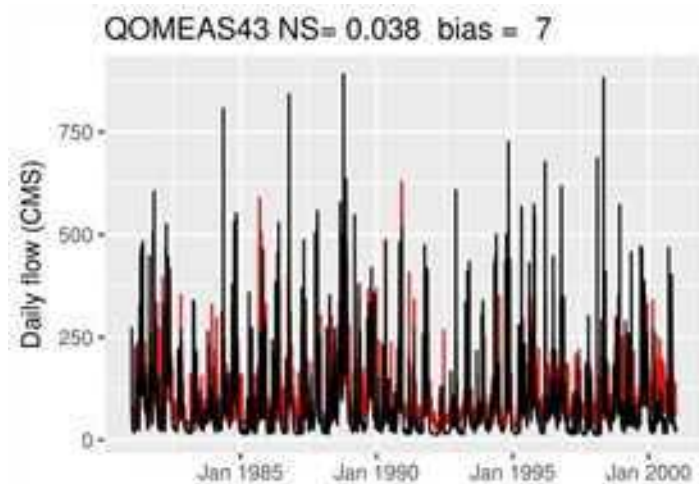


Discharge — Observ. — Simul.

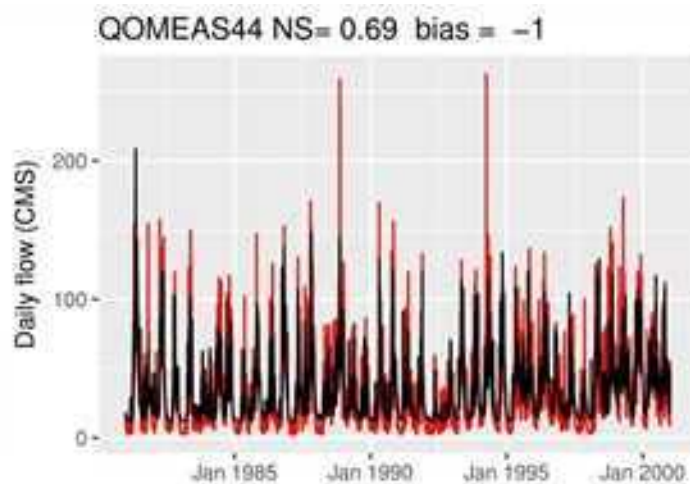


Discharge — Observ. — Simul.

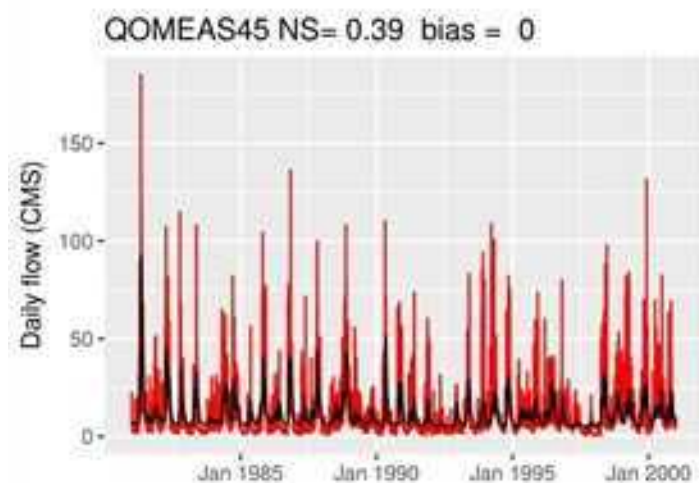




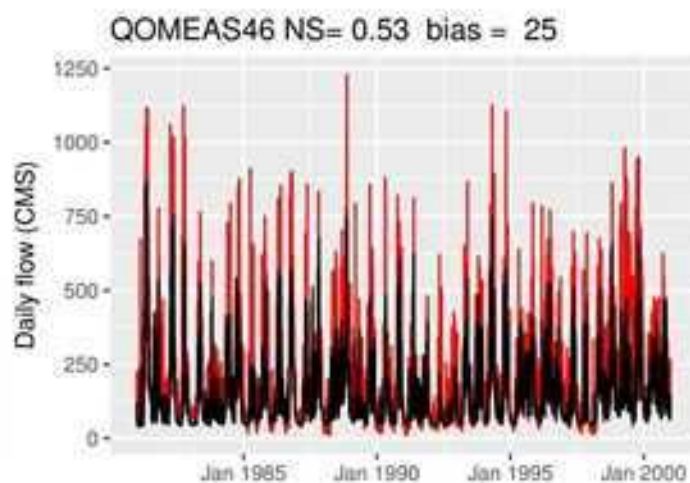
Discharge — Observ. — Simul.



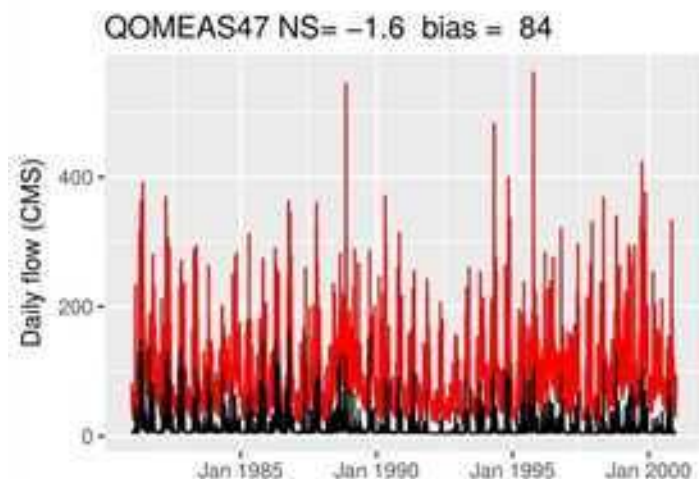
Discharge — Observ. — Simul.



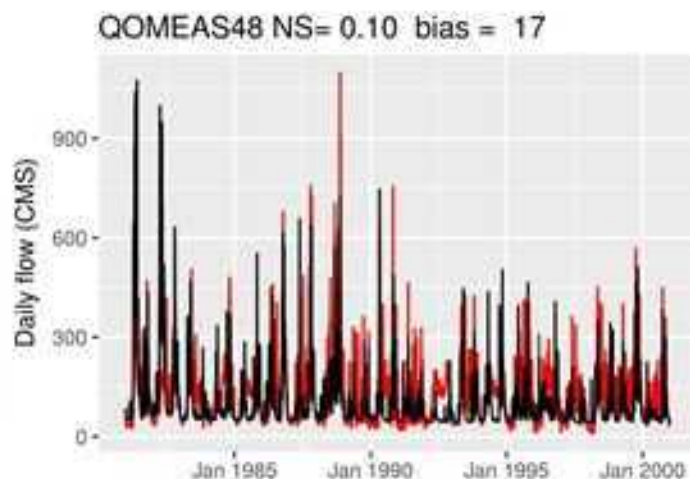
Discharge — Observ. — Simul.



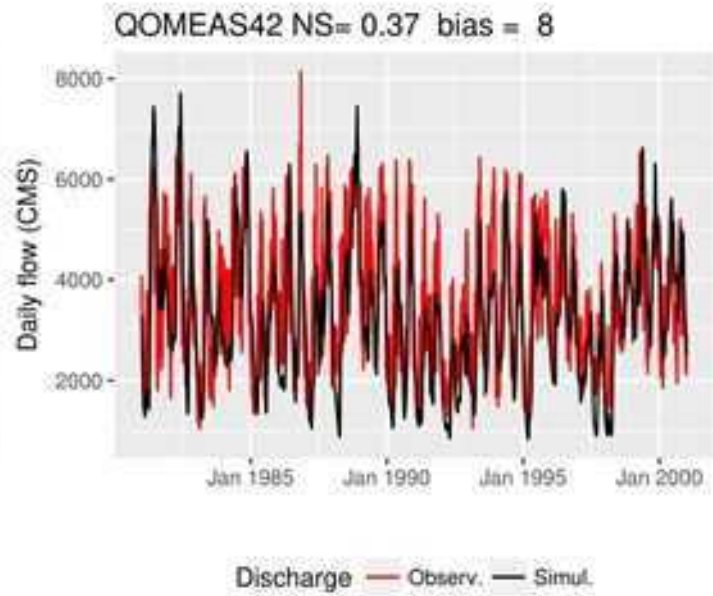
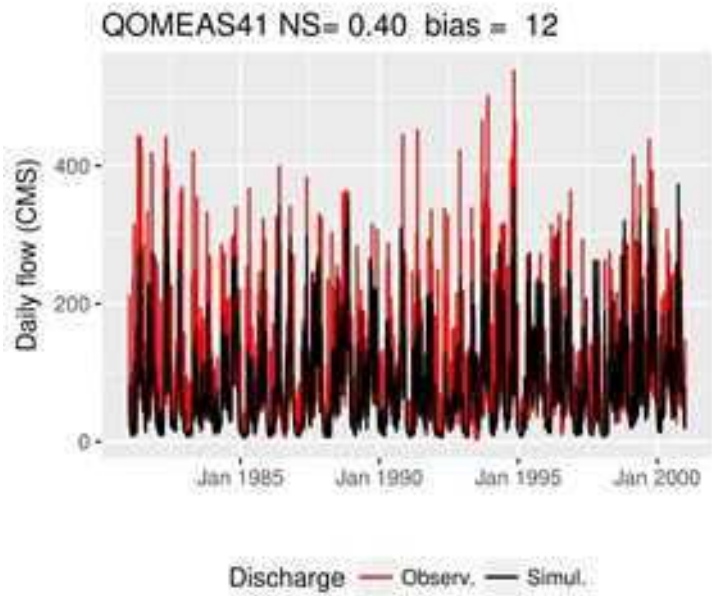
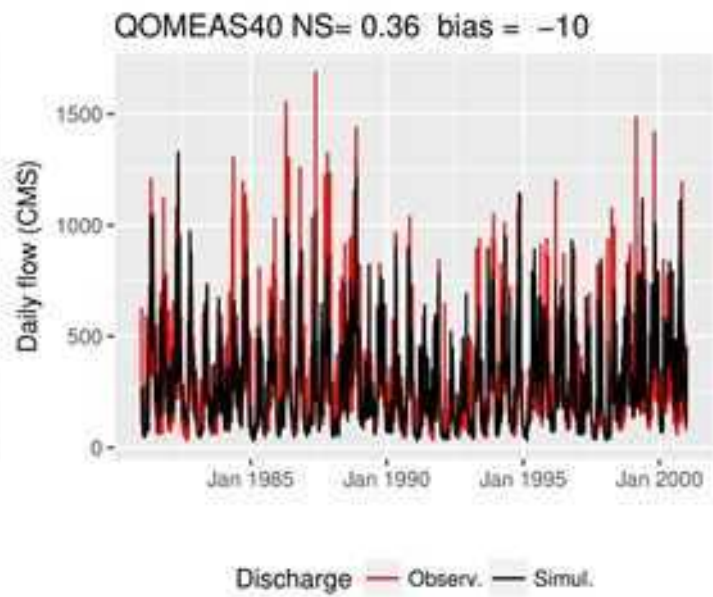
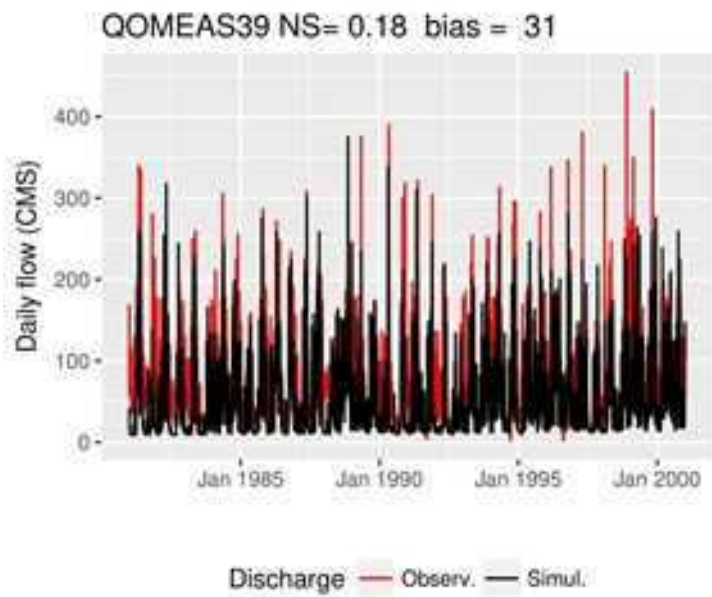
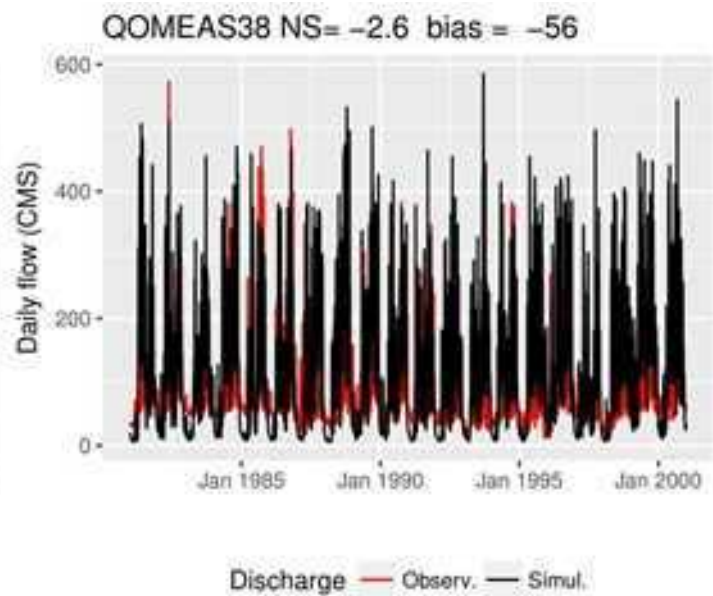
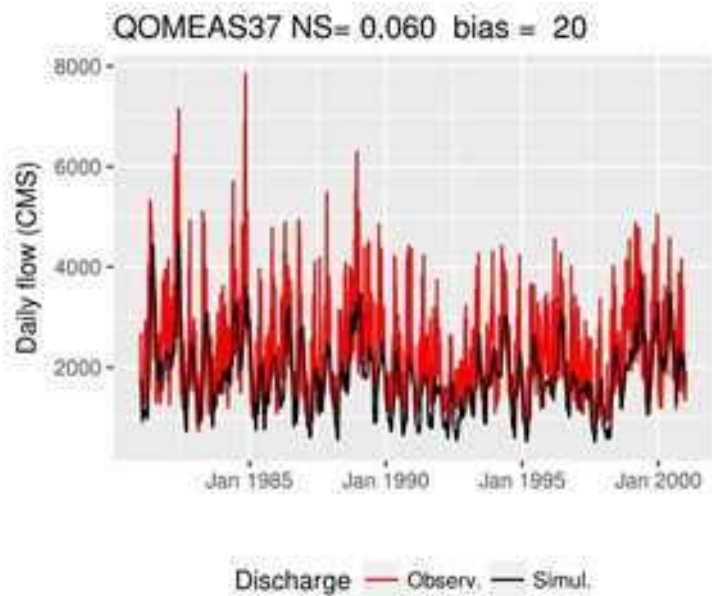
Discharge — Observ. — Simul.

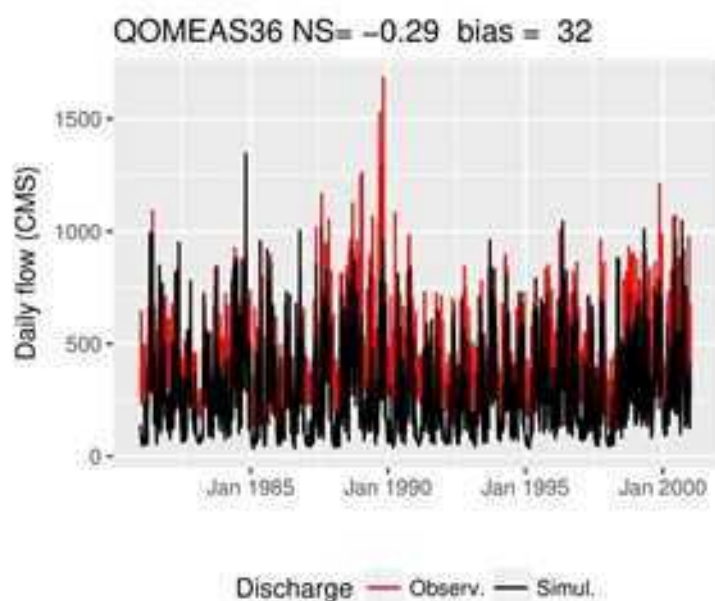
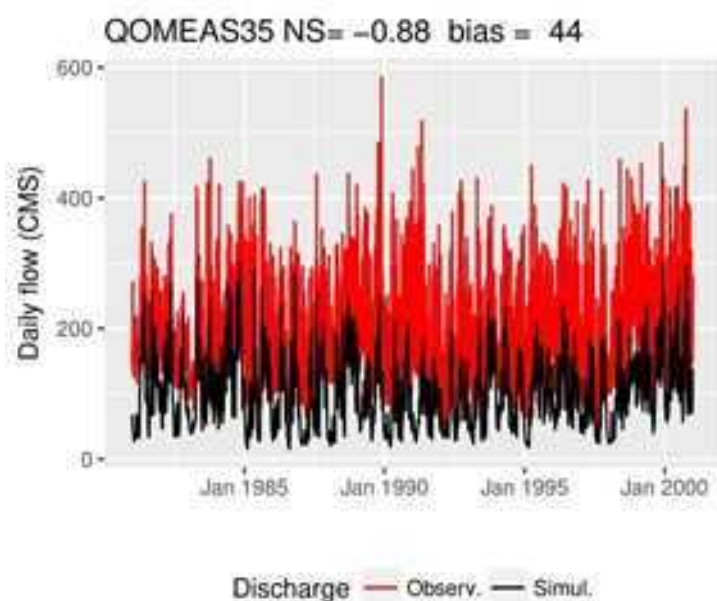
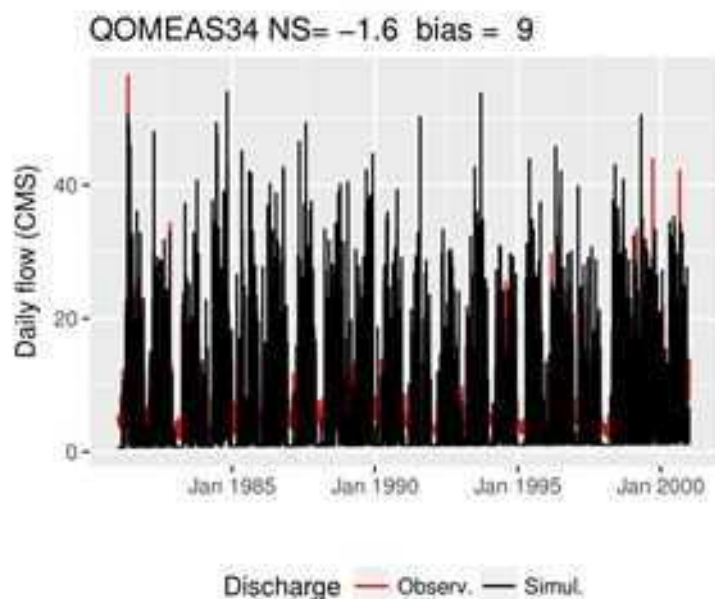
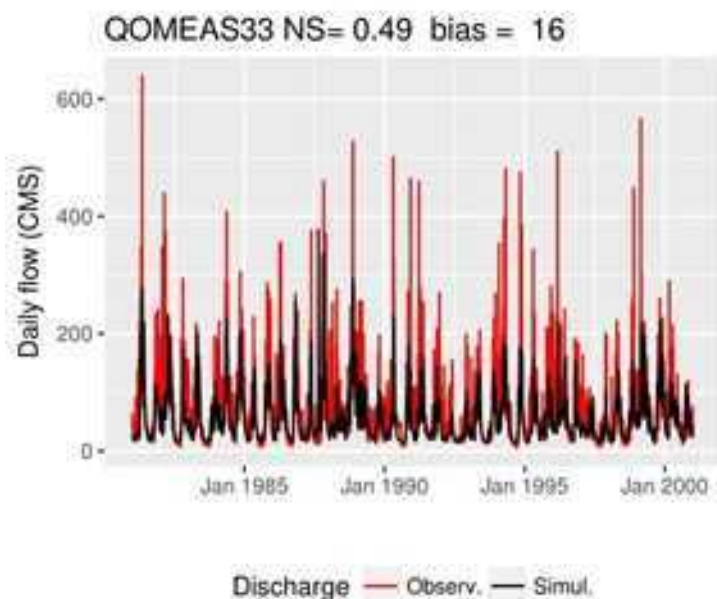
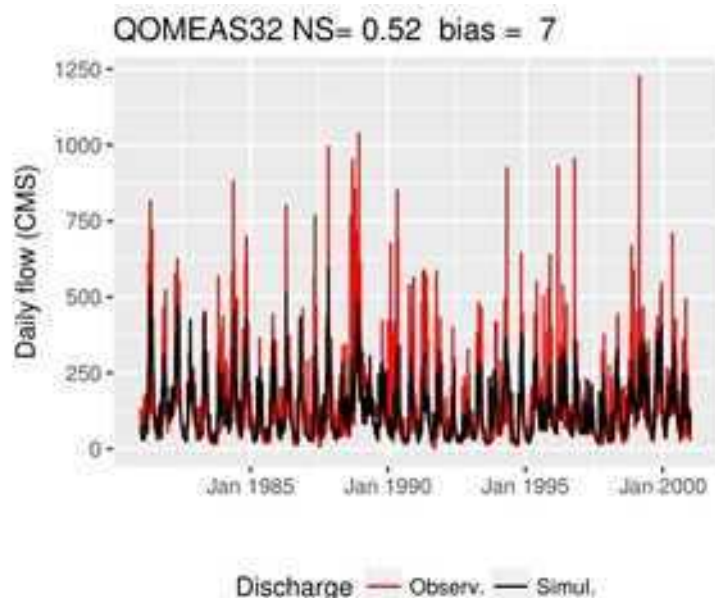
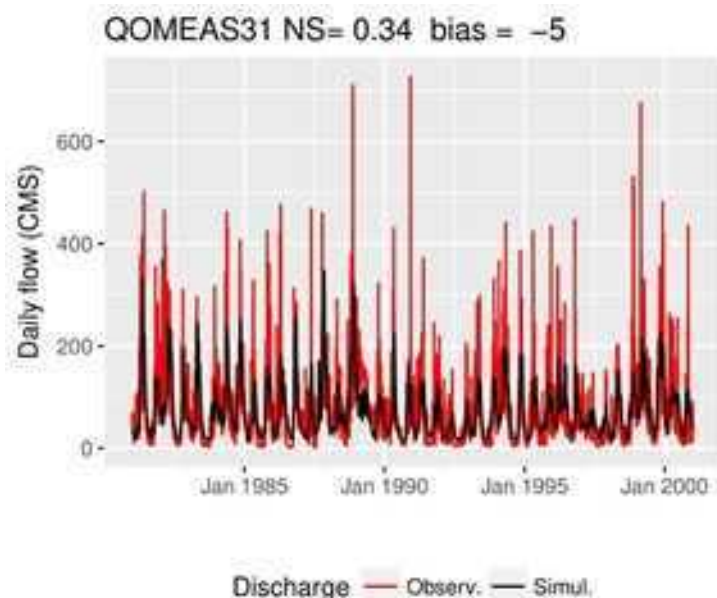


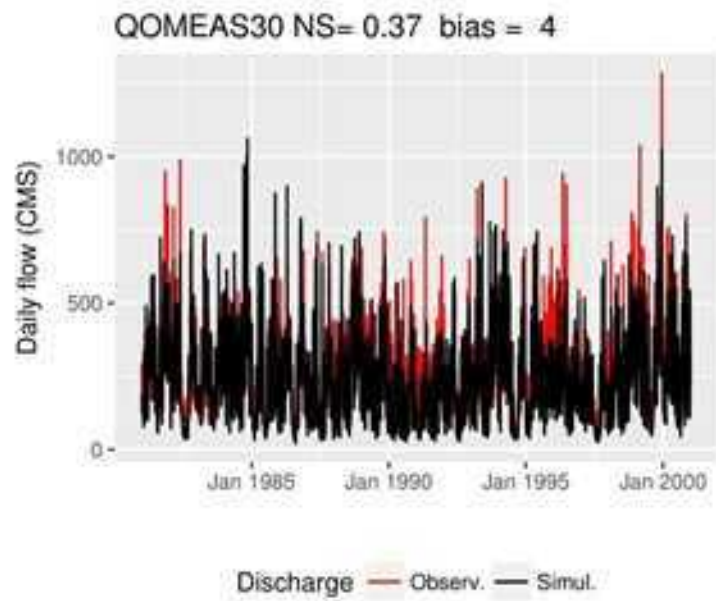
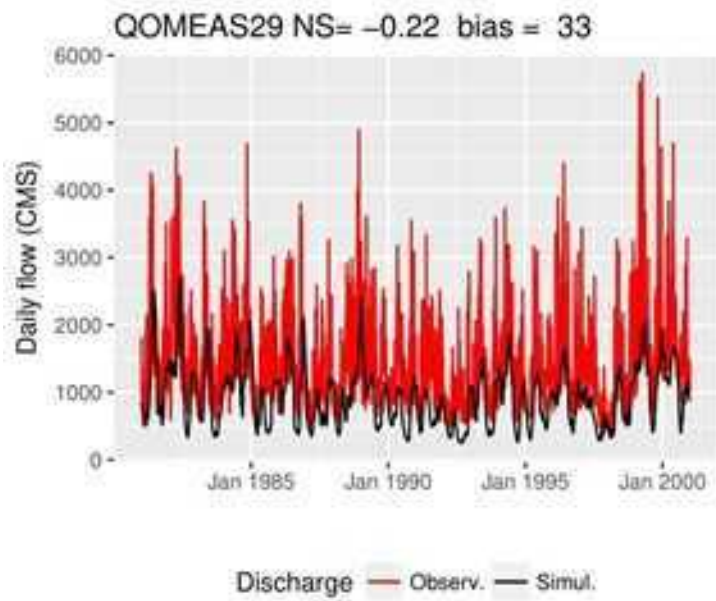
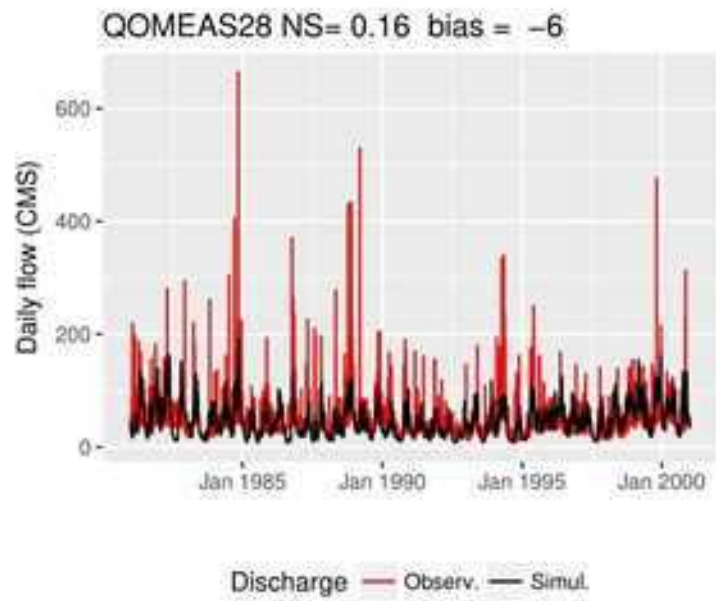
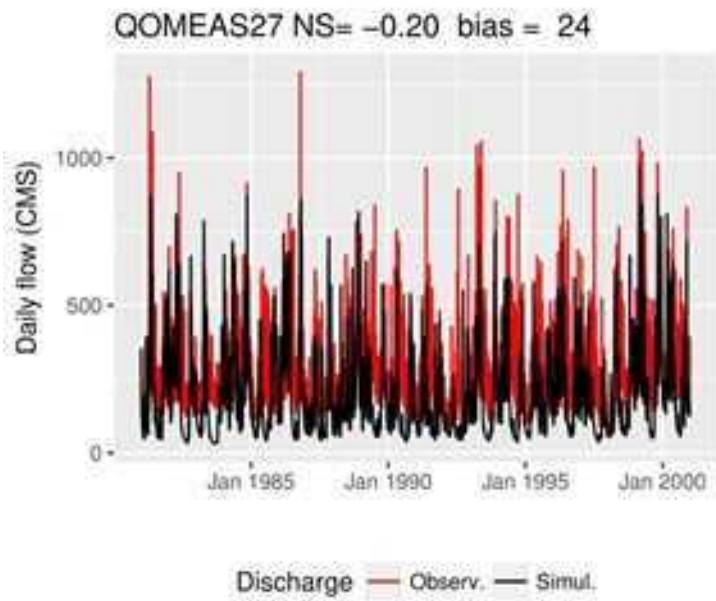
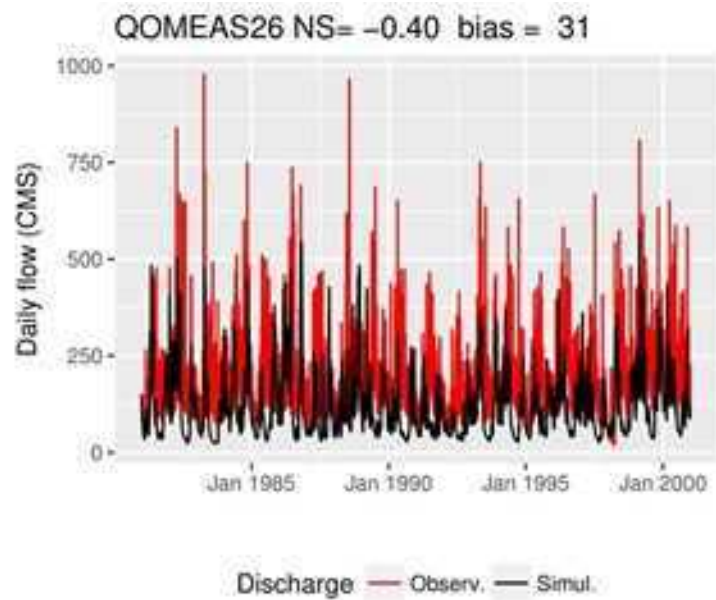
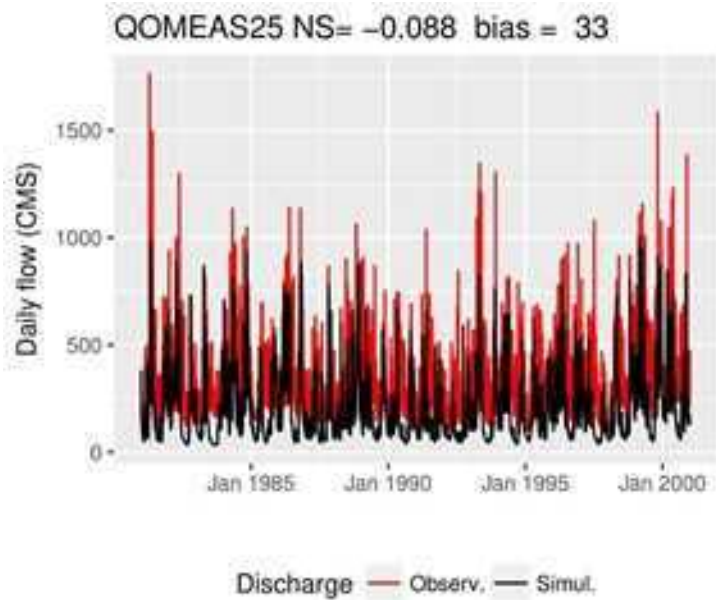
Discharge — Observ. — Simul.

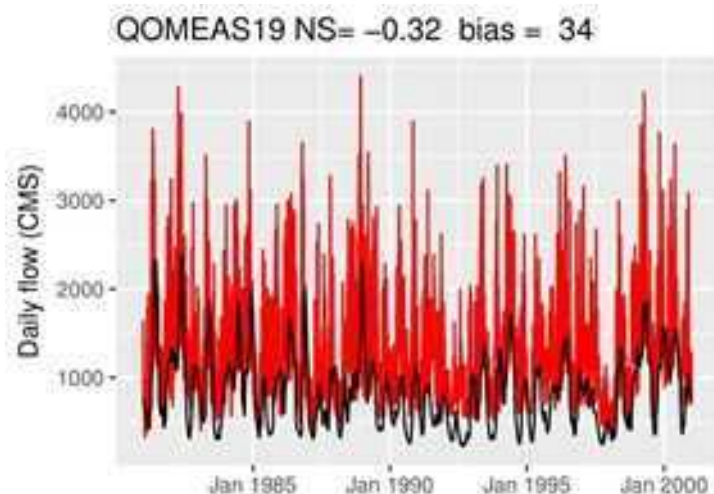


Discharge — Observ. — Simul.

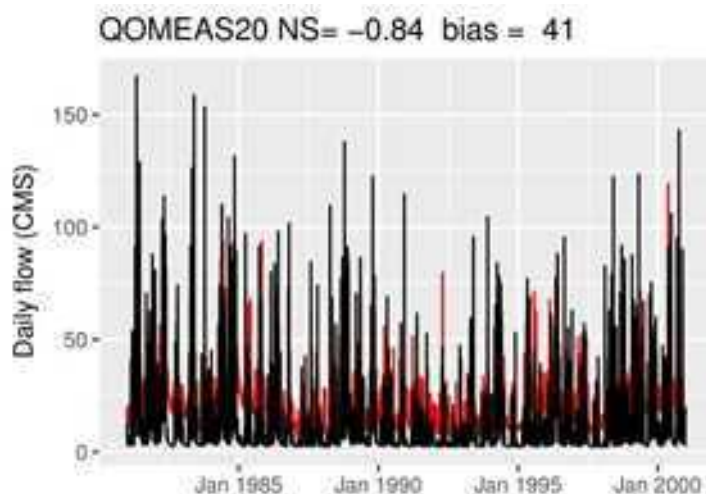




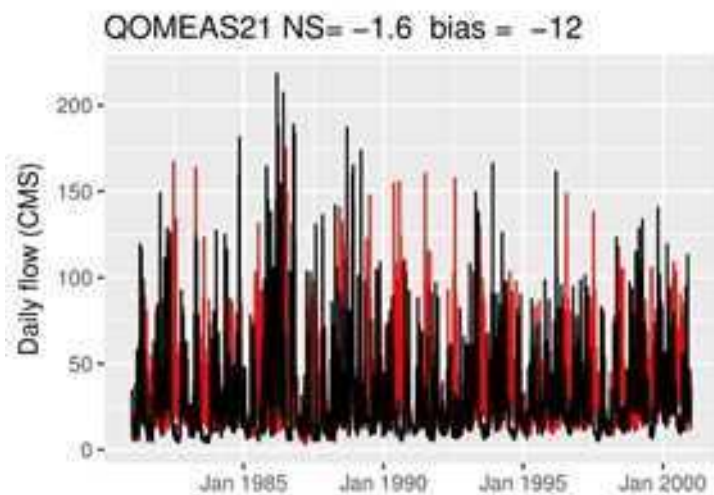




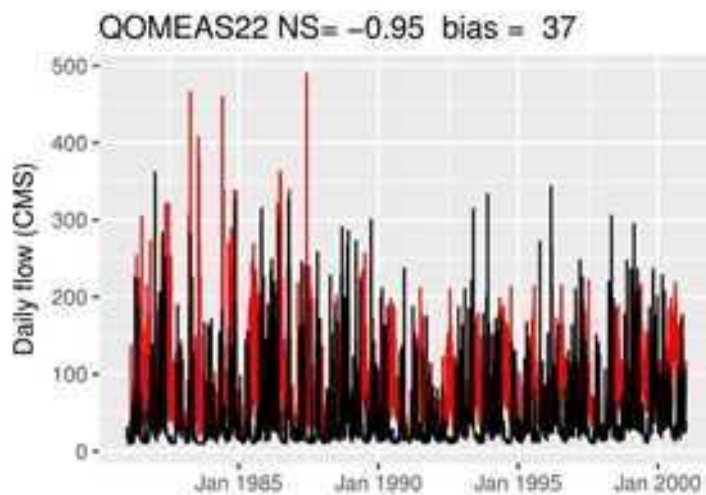
Discharge — Observ. — Simul.



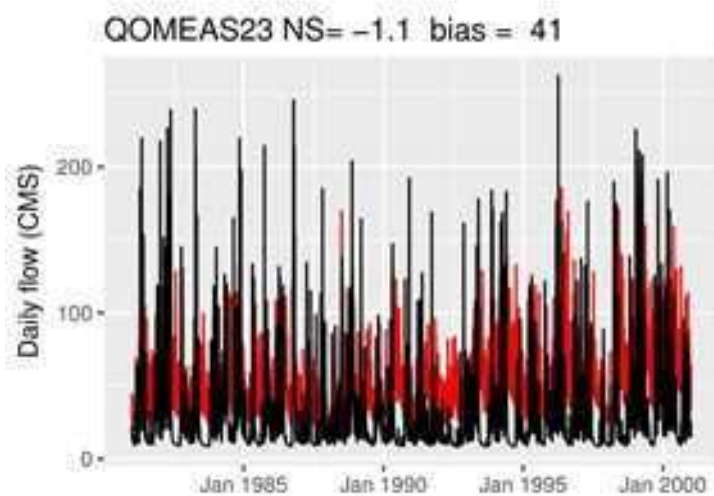
Discharge — Observ. — Simul.



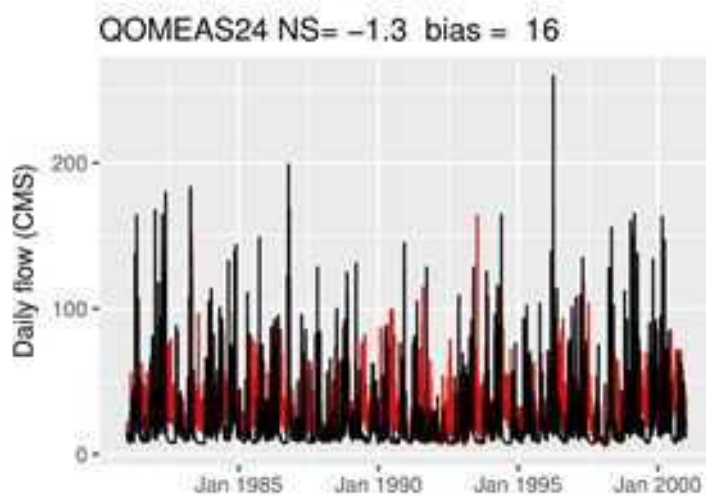
Discharge — Observ. — Simul.



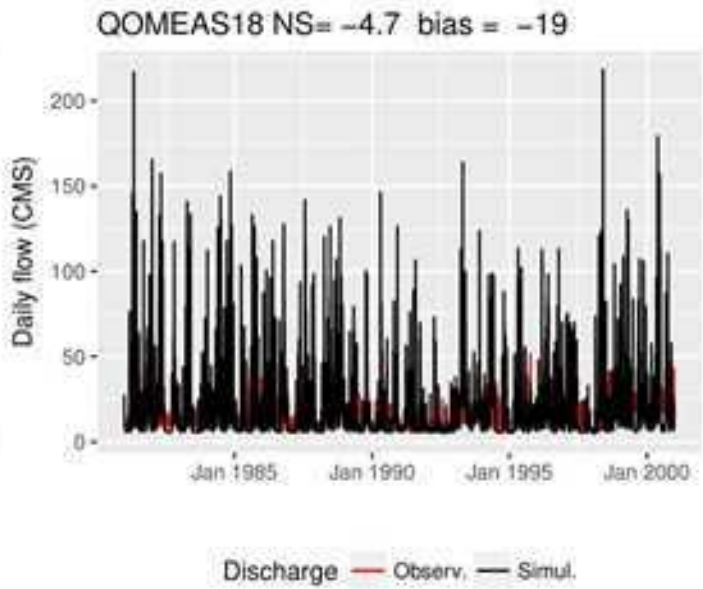
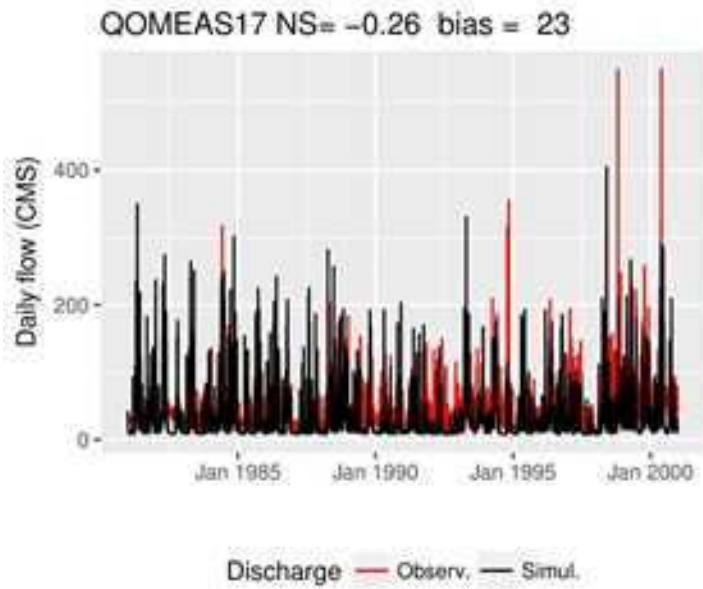
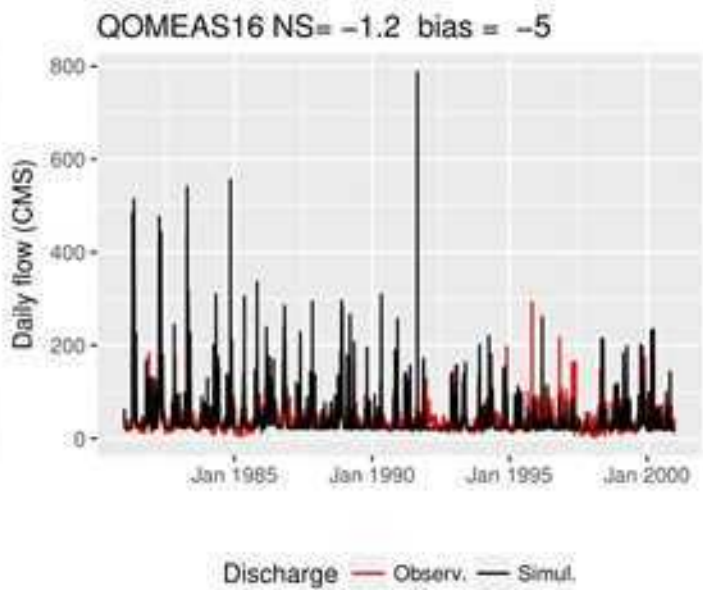
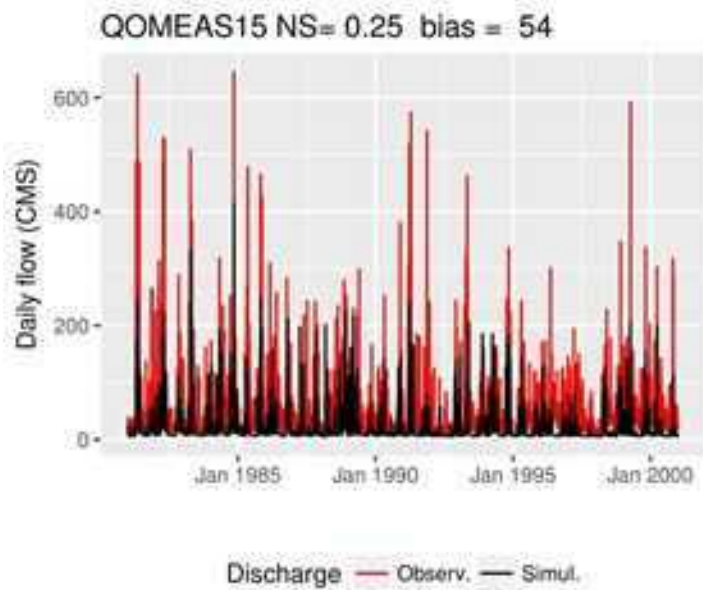
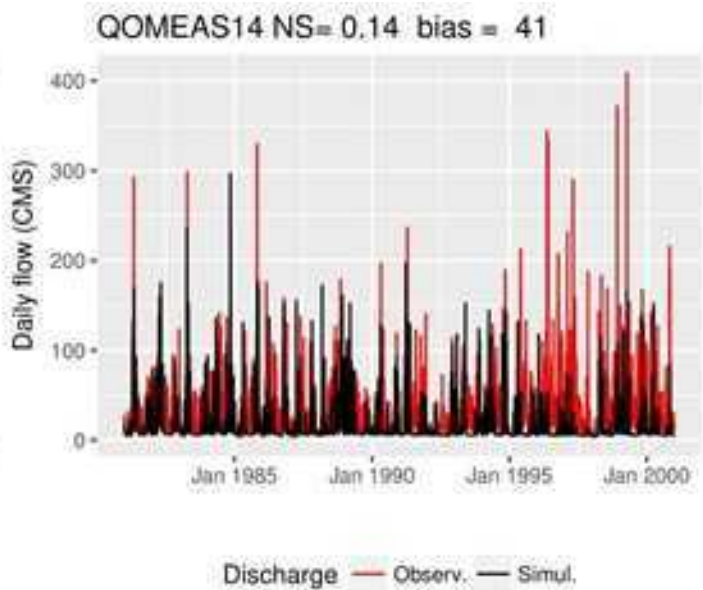
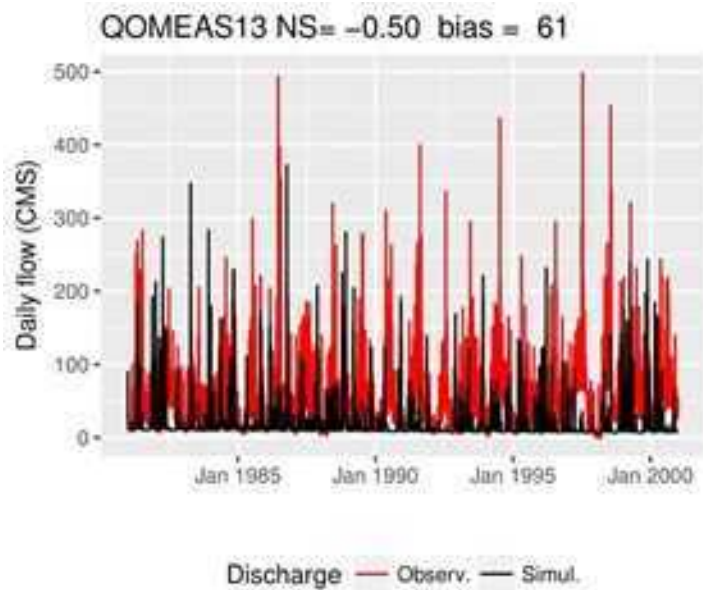
Discharge — Observ. — Simul.

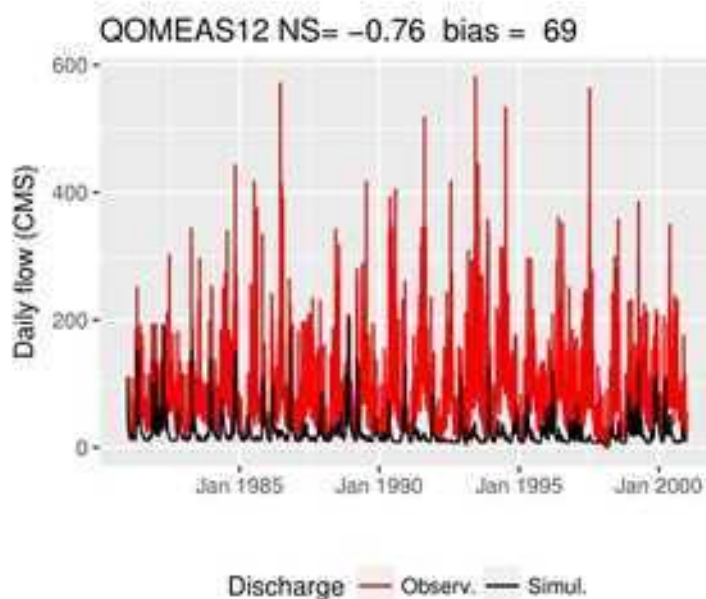
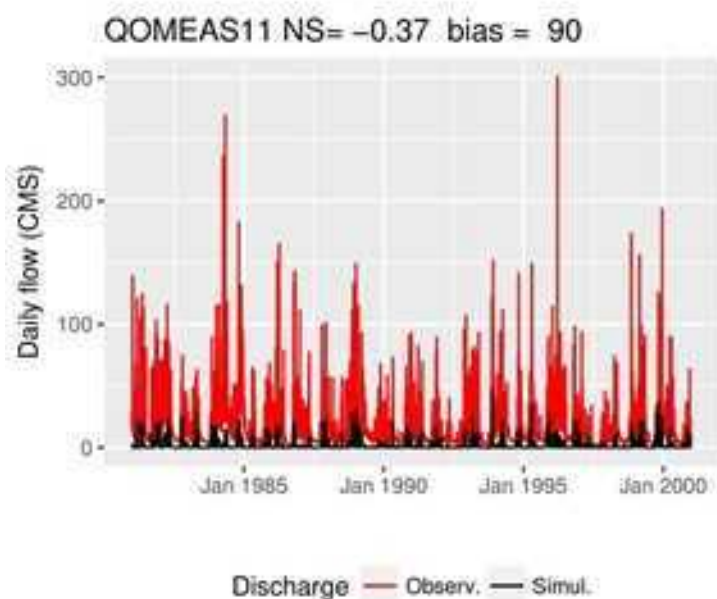
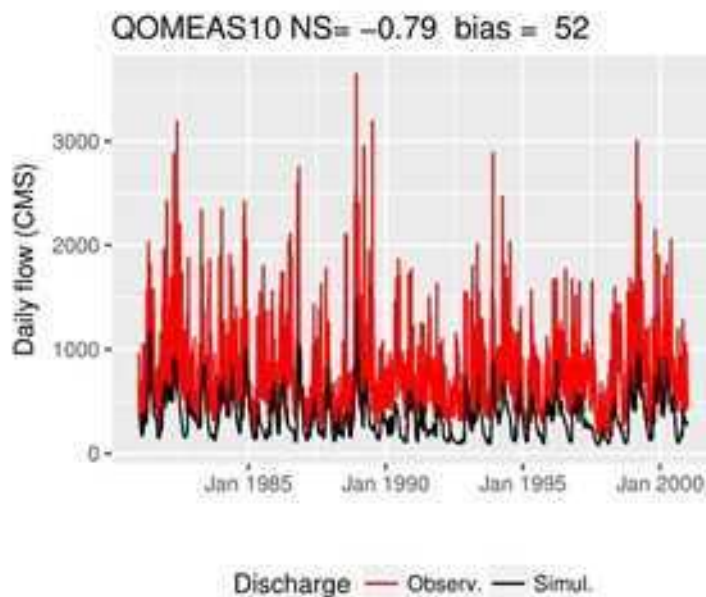
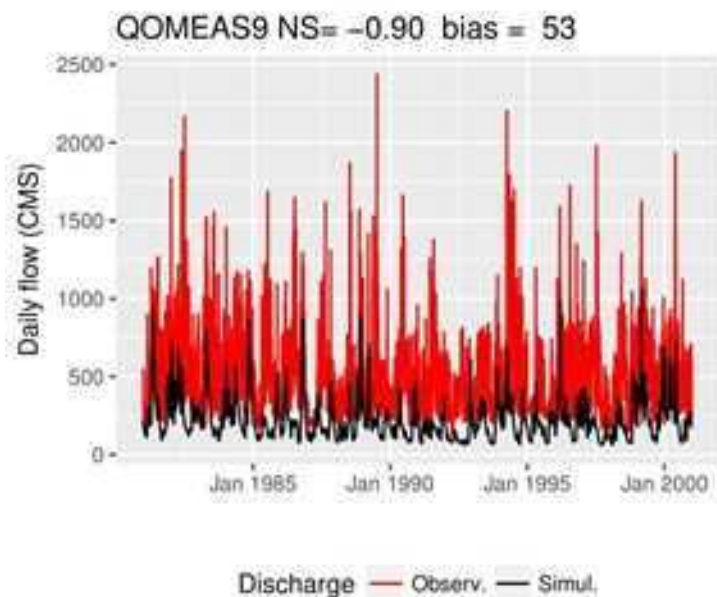
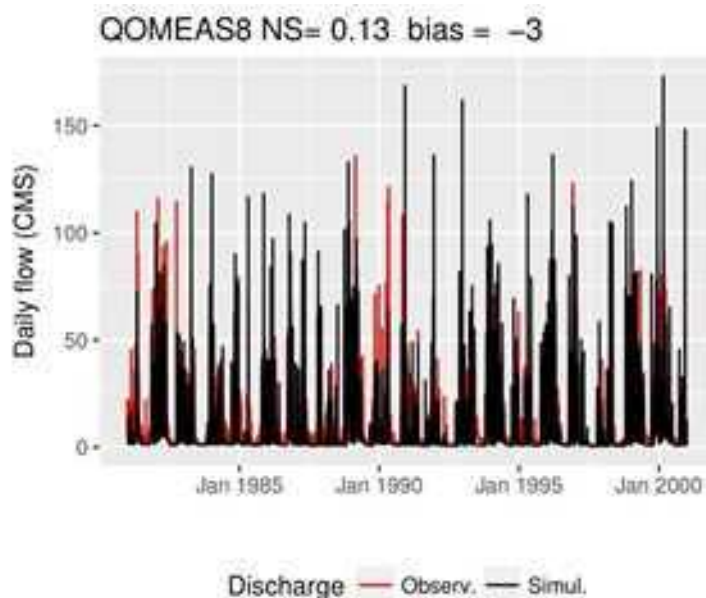
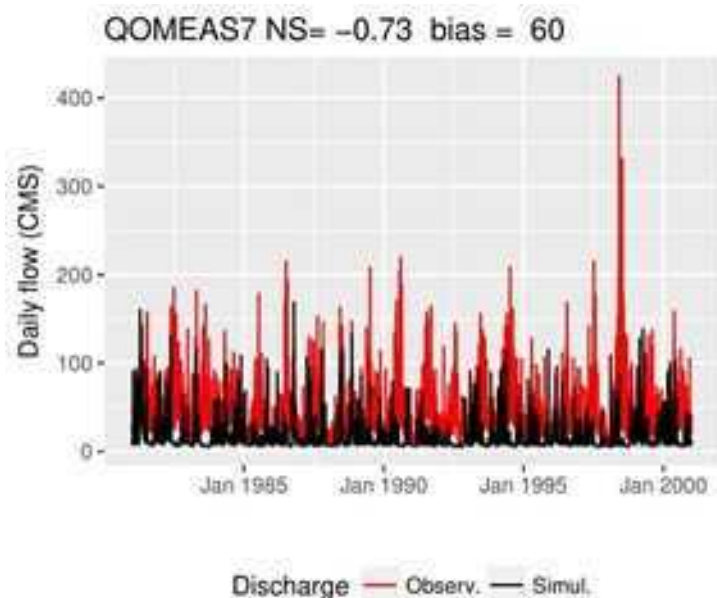


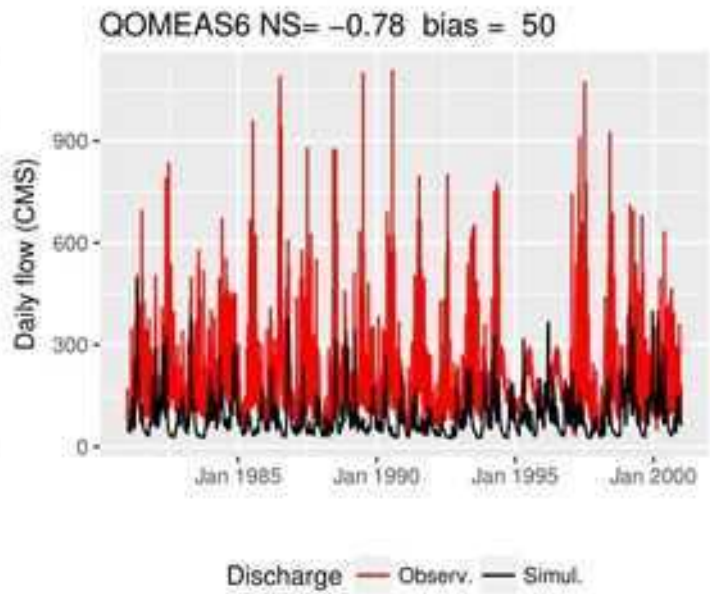
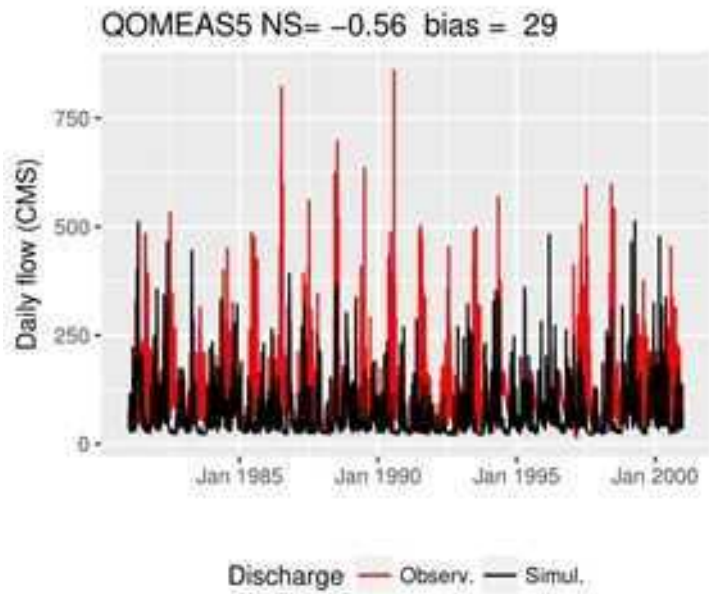
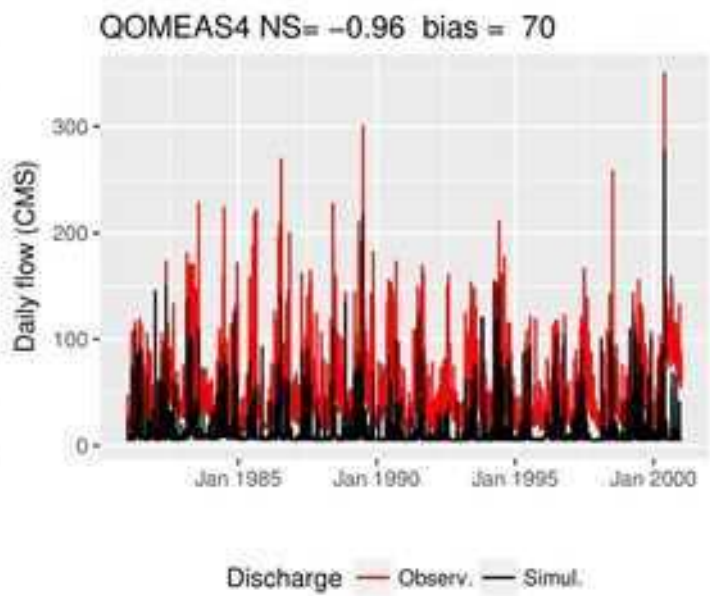
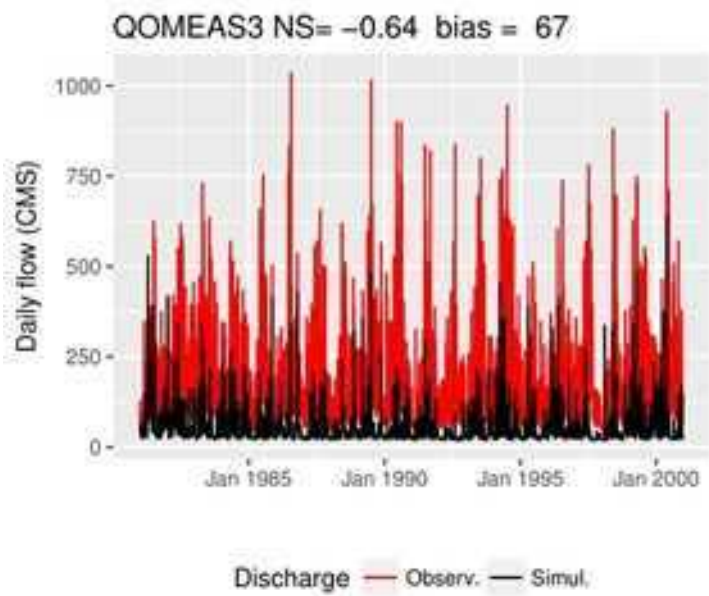
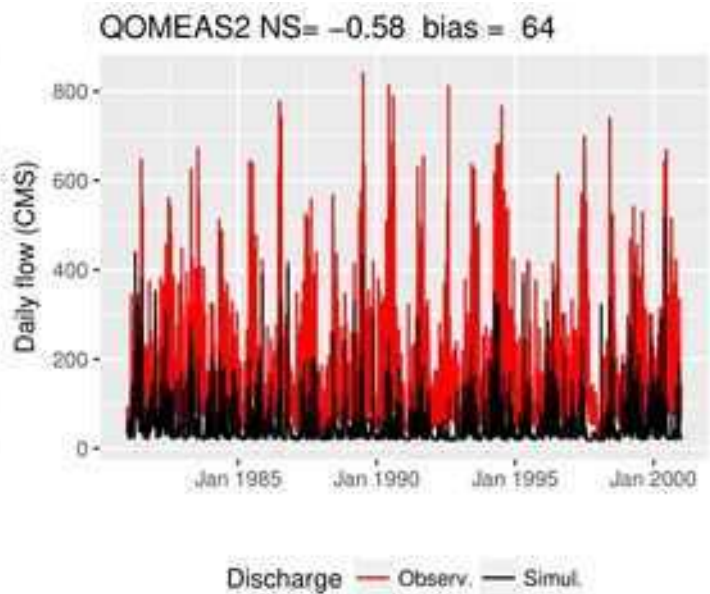
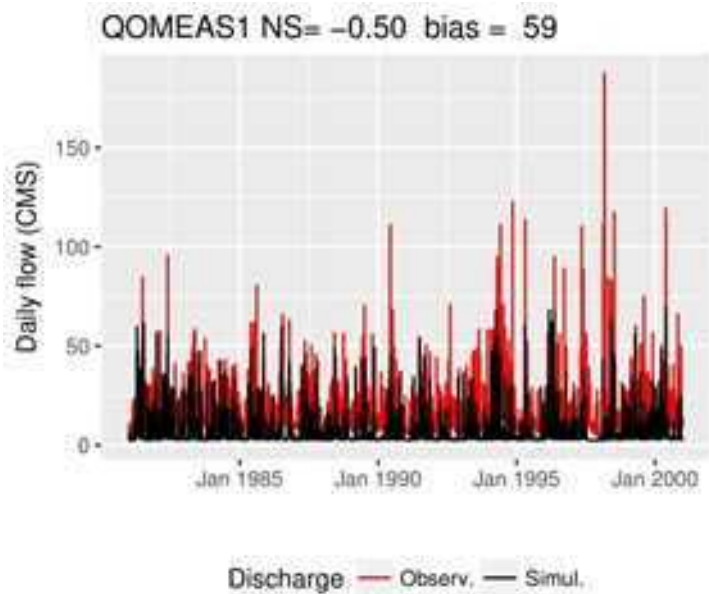
Discharge — Observ. — Simul.



Discharge — Observ. — Simul.







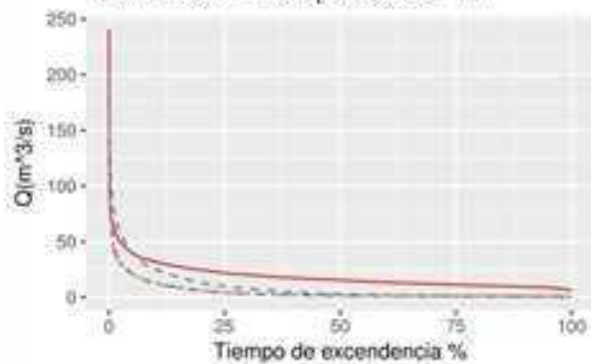
G. Curvas de duración de caudales por estación hidrométrica bajo escenarios de cambio climático y de uso del suelo

Este anexo muestra las curvas de duración de caudales por estación. Estas curvas se comparan con la curva de duración de caudales observados. Para efectos gráficos, se presenta una separación entre resultados sin cambio en el uso del suelo (o cobertura vegetal) y con cambio en el uso del suelo.

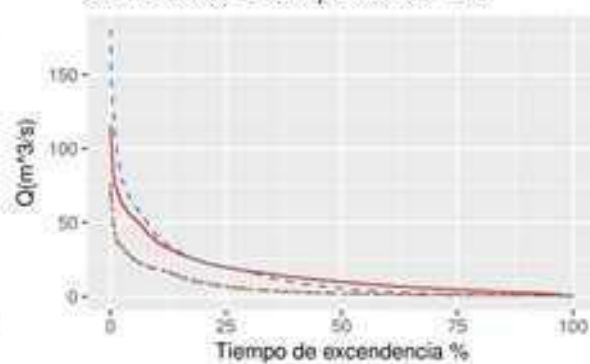
No.	Nombre	Código en anexo	No.	Nombre	Código en anexo	No.	Nombre	Código en anexo
1	SAN_AGUSTIN	QOMEAS1	33	GUADUERO	QOMEAS33	65	MAGANGUE- ESPERANZA	QOMEAS65
2	SALADO_BLANCO	QOMEAS2	34	SIRPES_LOS	QOMEAS34	66	RAYA_LA	QOMEAS66
3	PERICONGO	QOMEAS3	35	GARRUCHA_LA	QOMEAS35	67	COYONGAL	QOMEAS67
4	PTE_GARCES	QOMEAS4	36	CANTERAS	QOMEAS36	68	TACAMOCHO	QOMEAS68
5	PTE_RICAURTE	QOMEAS5	37	PTO_BERRIO-AUTOMAT	QOMEAS37	69	JULUMITO	QOMEAS69
6	PAICOL	QOMEAS6	38	BODEGA_LA	QOMEAS38	70	CORTIJO_EL	QOMEAS70
7	VILLALOSADA	QOMEAS7	39	BORBUR	QOMEAS39	71	JUANCHITO	QOMEAS71
8	JARDIN_EL_HDA	QOMEAS8	40	PTO_ARAUJO_AUTOMA T	QOMEAS40	72	BUCHITOLO	QOMEAS72
9	PTE_SANTANDER_AUT O	QOMEAS9	41	PTE_FERROCARRIL	QOMEAS41	73	VICTORIA_LA	QOMEAS73
10	PURIFICACION-AUTOM	QOMEAS10	42	SITIO_NUEVO_R-11	QOMEAS42	74	MATEGUADUA	QOMEAS74
11	PTE_CARRETERA	QOMEAS11	43	SAN_RAFAEL	QOMEAS43	75	ALAMBRADO_EL_AUTO M	QOMEAS75
12	SAN_ALFONSO	QOMEAS12	44	PTE_NACIONAL	QOMEAS44	76	CARTAGO	QOMEAS76
13	CARRASPOSO	QOMEAS13	45	MONQUIRA	QOMEAS45	77	PTE_NEGRO	QOMEAS77
14	PLAYA_LA	QOMEAS14	46	CEIBA_LA	QOMEAS46	78	RETIRO_EL	QOMEAS78
15	LIMONAR_EL	QOMEAS15	47	SAN_GIL	QOMEAS47	79	VIRGINIA_LA-AUTOMA	QOMEAS79
16	PTE_PORTILLO	QOMEAS16	48	JORDAN_EL	QOMEAS48	80	QUITASUENO	QOMEAS80
17	PAYANDE	QOMEAS17	49	CAPITANEJO	QOMEAS49	81	PTE_IGLESIAS	QOMEAS81
18	PTE_CARRETERA	QOMEAS18	50	PAZ_DE_RIO	QOMEAS50	82	PTO_VALDIVIA_AUTOM	QOMEAS82
19	ARRANCAPLUMAS-AUTO	QOMEAS19	51	REMOLINO	QOMEAS51	83	COQUERA_LA-AUTOMAT	QOMEAS83
20	NUEVA_LA	QOMEAS20	52	TABLAZO_EL	QOMEAS52	84	APAVI	QOMEAS84
21	BOCAS	QOMEAS21	53	PTE_LA_PAZ_AUTOMAT	QOMEAS53	85	PTE_ANORI	QOMEAS85
22	SARDINAS_LAS	QOMEAS22	54	MONTELIBANO_AUTOM	QOMEAS54	86	ESPERANZA_LA	QOMEAS86
23	CONDOR_EL	QOMEAS23	55	VARAS_LAS	QOMEAS55	87	RETIRO_EL	QOMEAS87

24	GAITANIA	QOMEAS24	56	FLORES_LAS	QOMEAS56	88	MINA_LA	QOMEAS88
25	PIED_COBRE-AUTOMA	QOMEAS25	57	SAN_ROQUE	QOMEAS57	89	PTE_SALGUERO	QOMEAS89
26	MURALLA_LA	QOMEAS26	58	PENONCITO	QOMEAS58	90	PTE_CANOAS	QOMEAS90
27	PTE_COLACHE	QOMEAS27	59	ARMENIA	QOMEAS59	91	AURORA_LA	QOMEAS91
28	PTE_LOPEZ	QOMEAS28	60	STA_ANA	QOMEAS60	92	PALMARIGUANI	QOMEAS92
29	PTO_SALGAR-AUTOM	QOMEAS29	61	REGIDOR	QOMEAS61	93	CALAMAR	QOMEAS93
30	SAN_MIGUEL-AUTOMAT	QOMEAS30	62	AGUADAS_LAS	QOMEAS62	94	GAMBOTE	QOMEAS94
31	COLORADOS	QOMEAS31	63	BARBOSA	QOMEAS63	95	STA_HELENA_2	QOMEAS95
32	PTO_LIBRE	QOMEAS32	64	TRES_CRUCES	QOMEAS64	96	TREBOL_EL	QOMEAS96

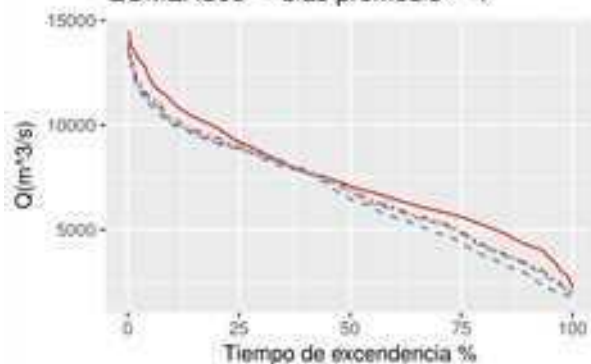
QOMEAS91 – bias promedio = 57



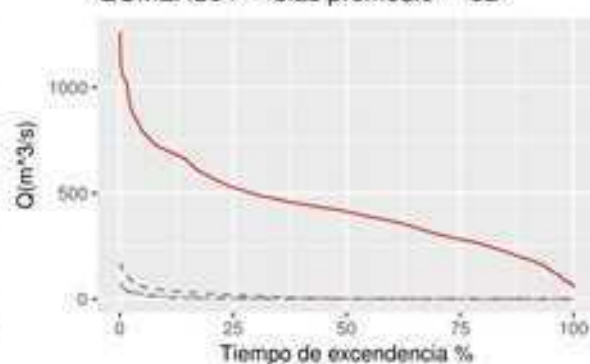
QOMEAS92 – bias promedio = 40



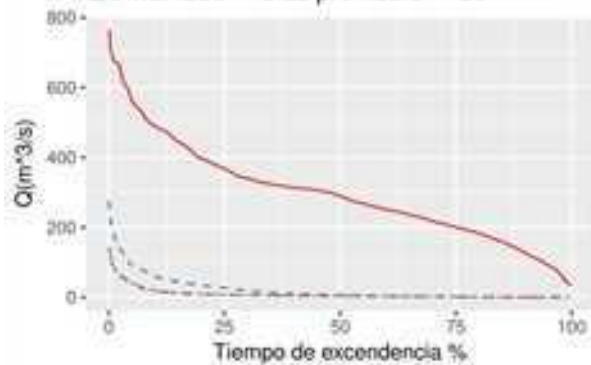
QOMEAS93 – bias promedio = 7



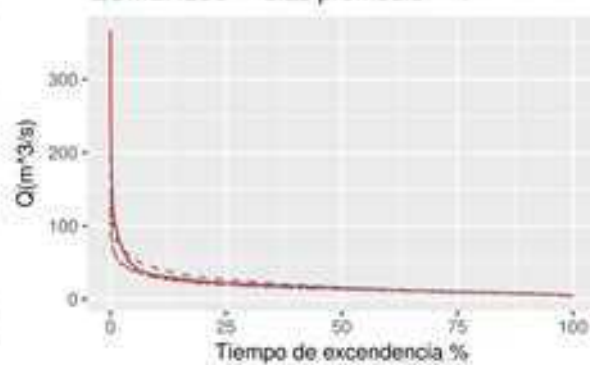
QOMEAS94 – bias promedio = 82

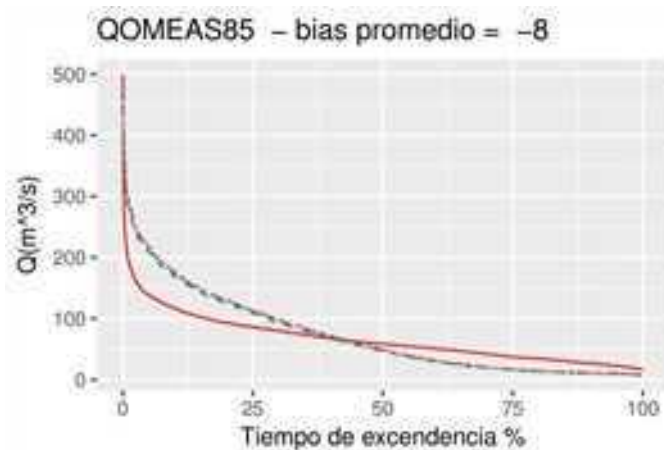


QOMEAS95 – bias promedio = 80

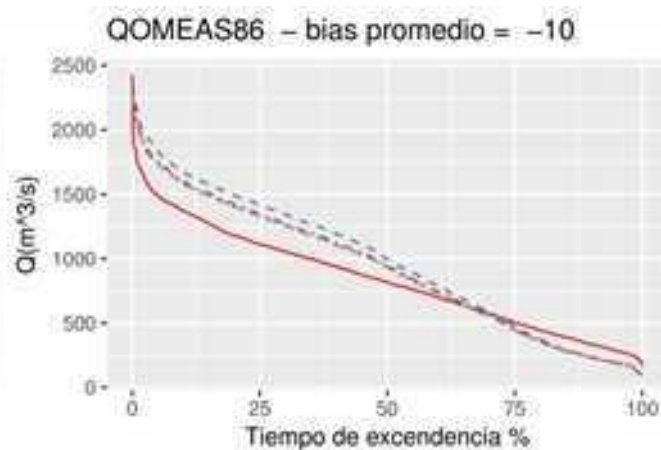


QOMEAS96 – bias promedio = 7

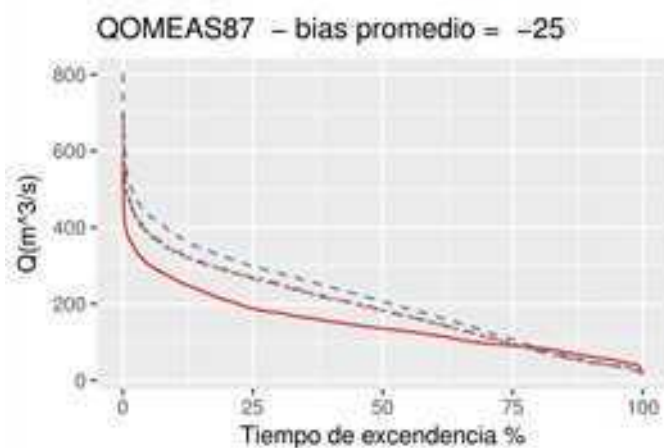




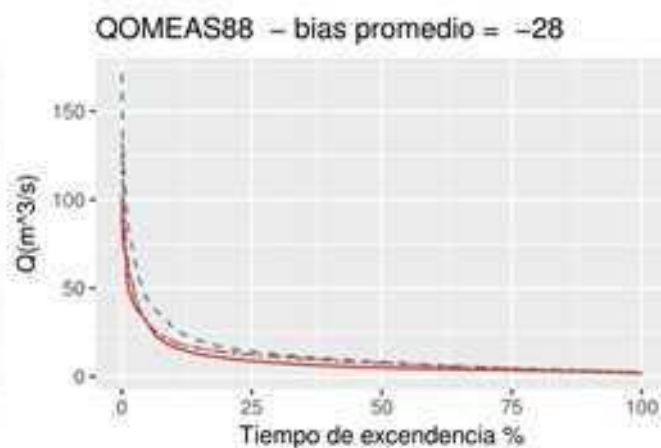
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.



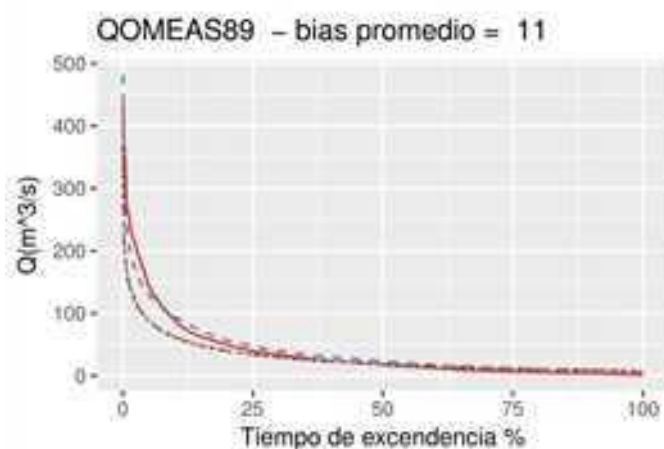
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.



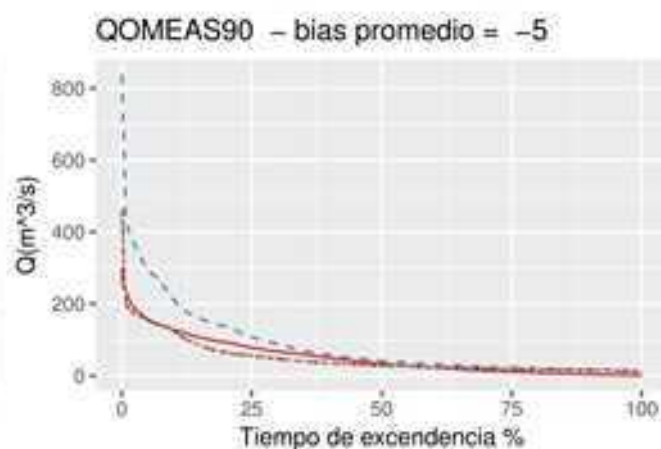
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.



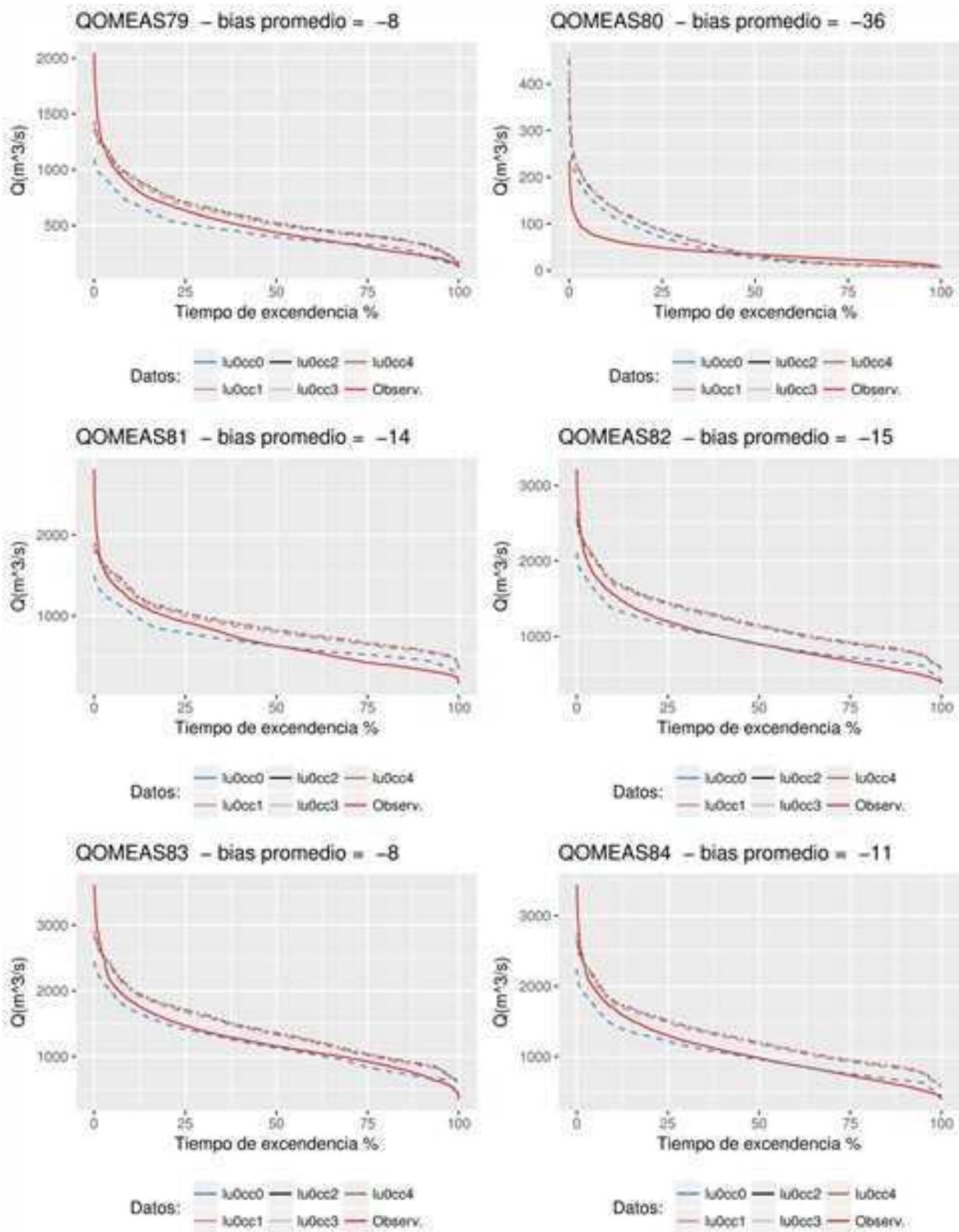
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

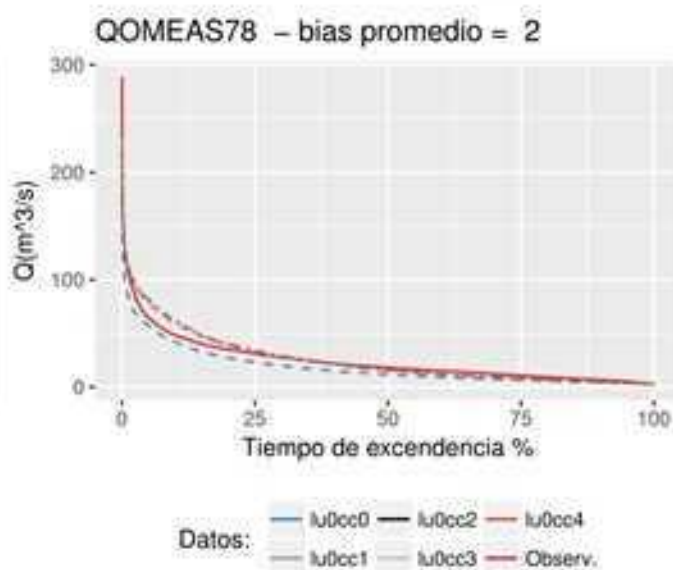
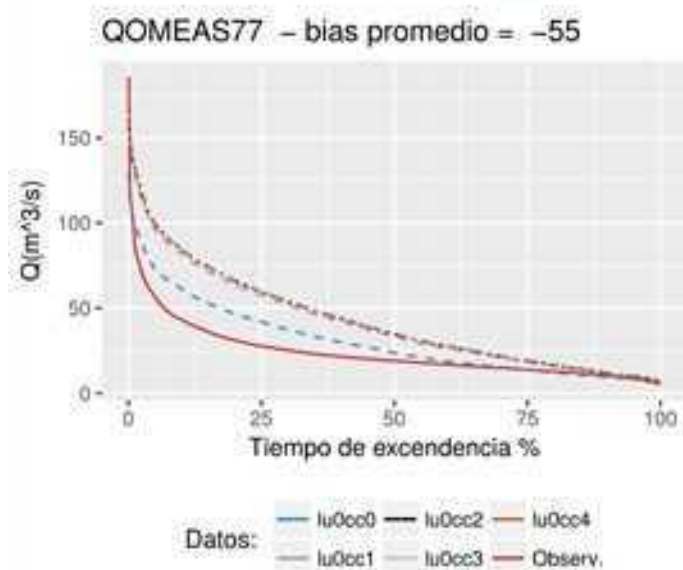
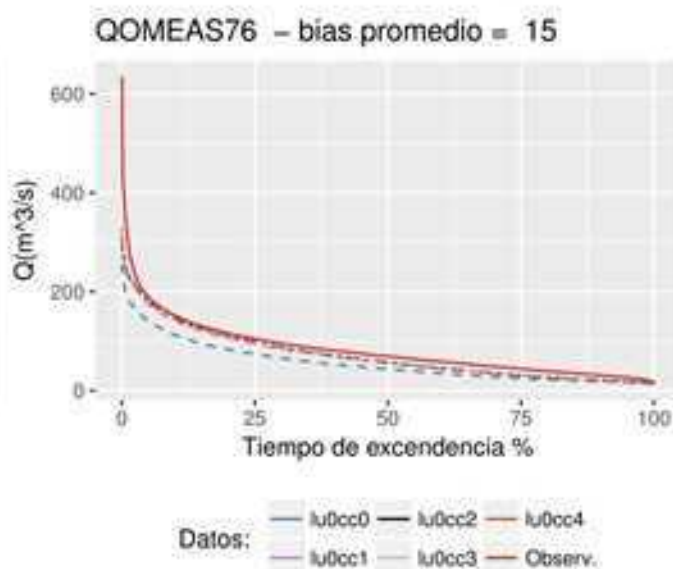
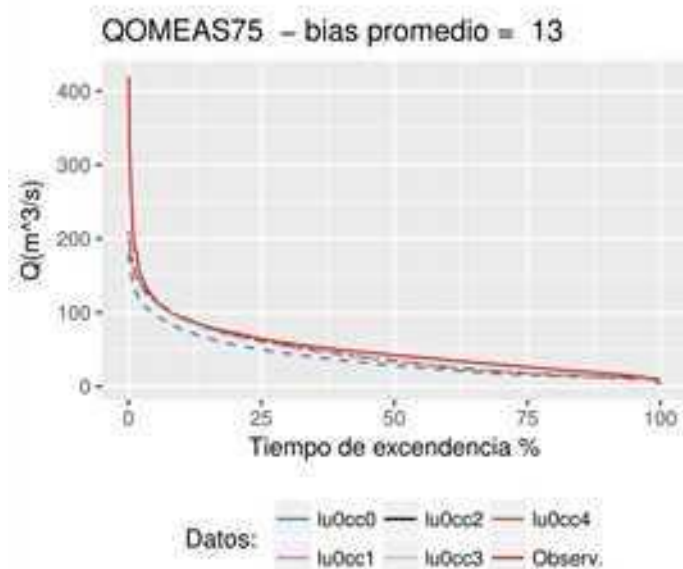
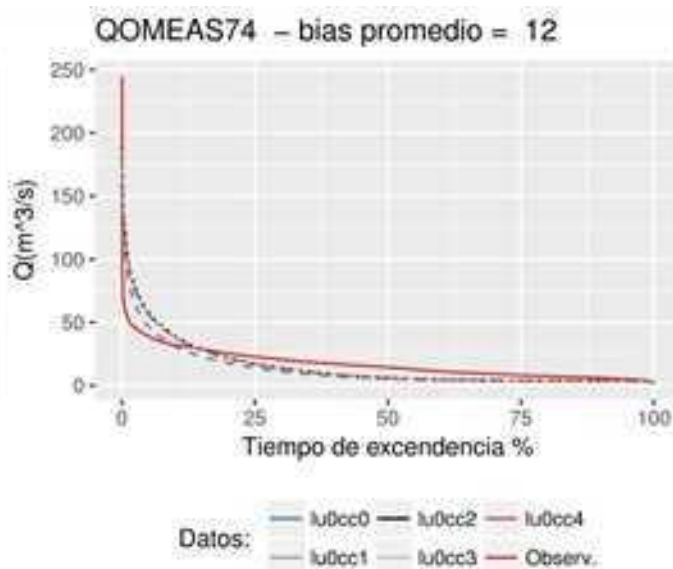
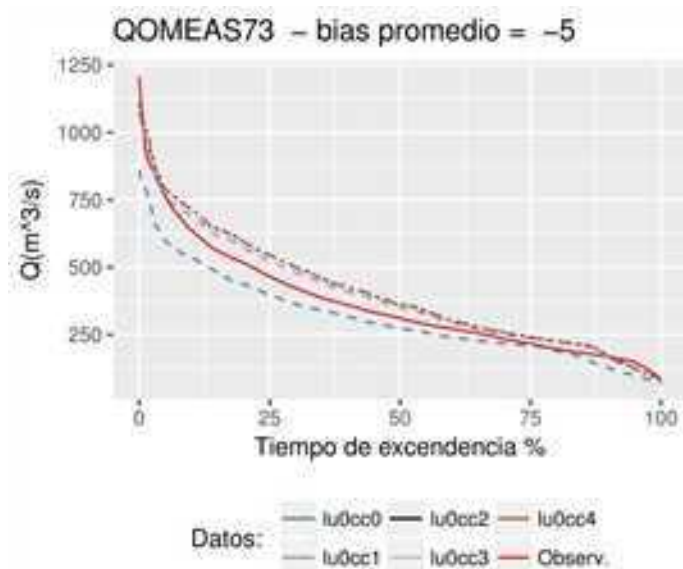


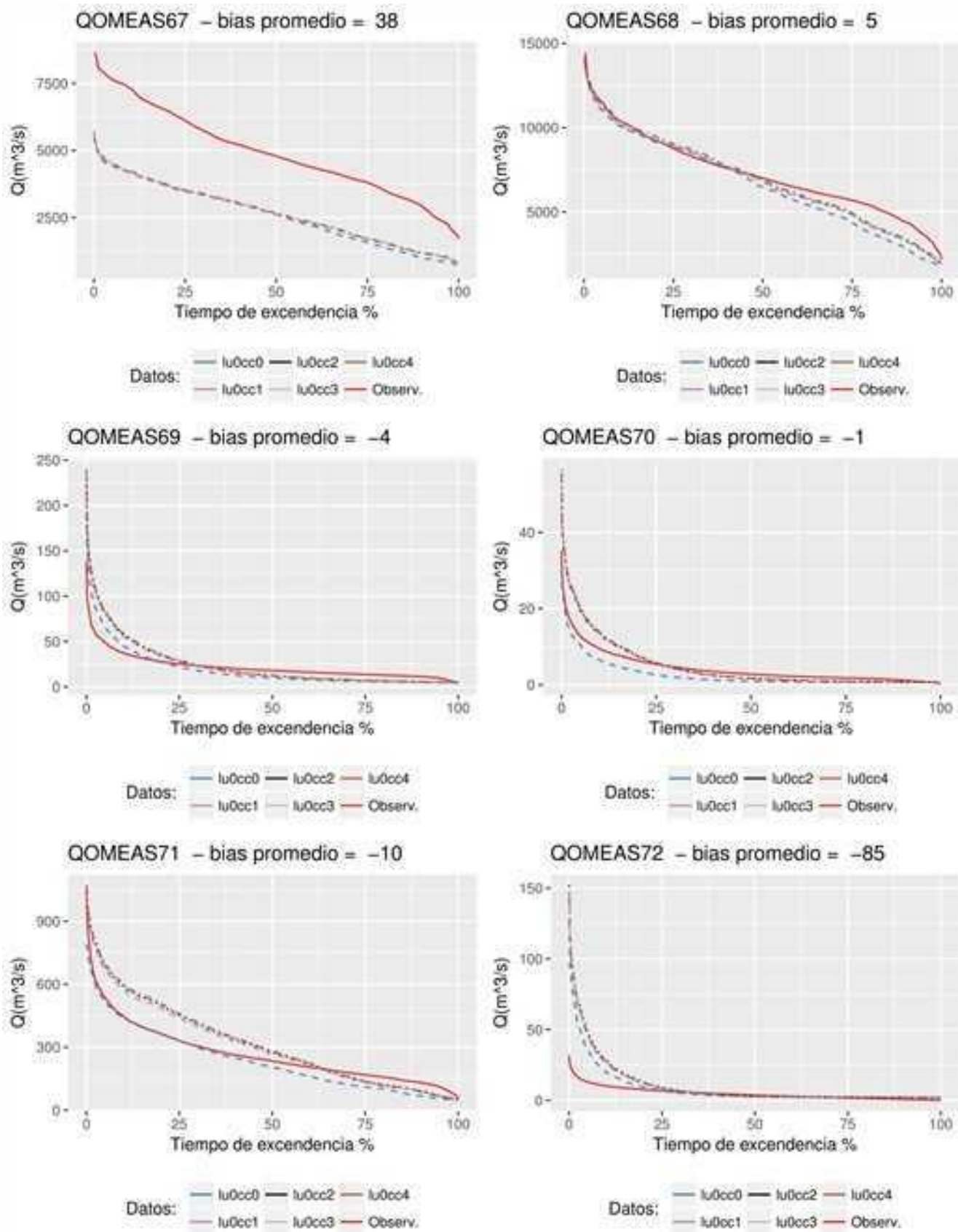
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

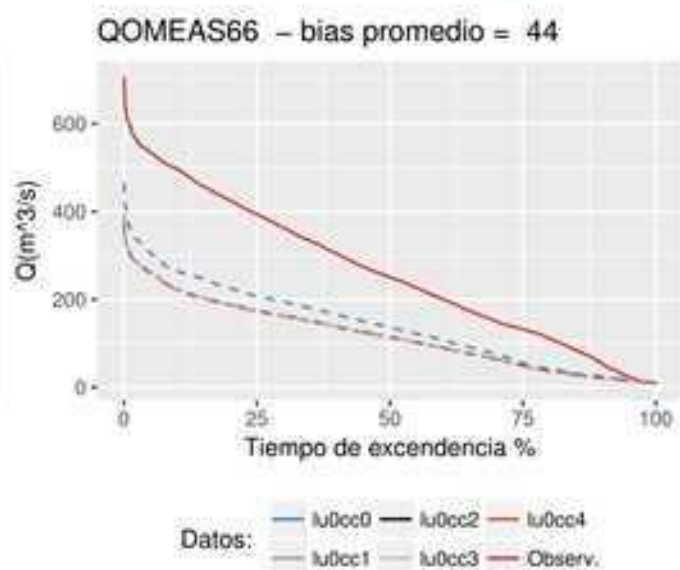
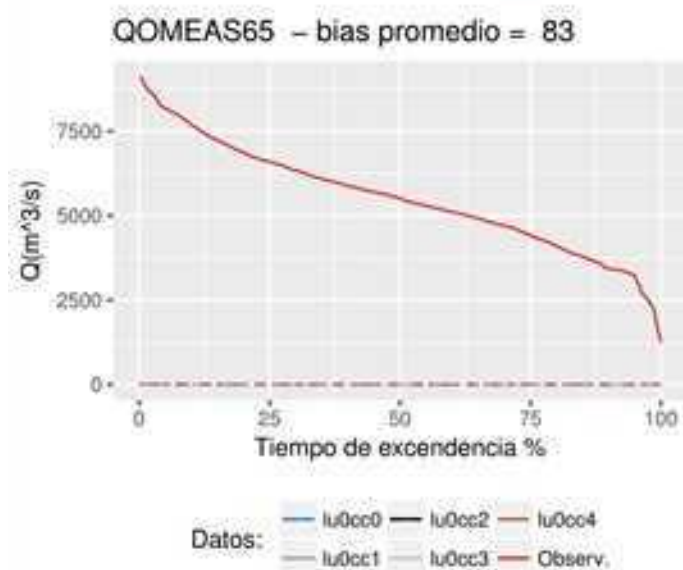
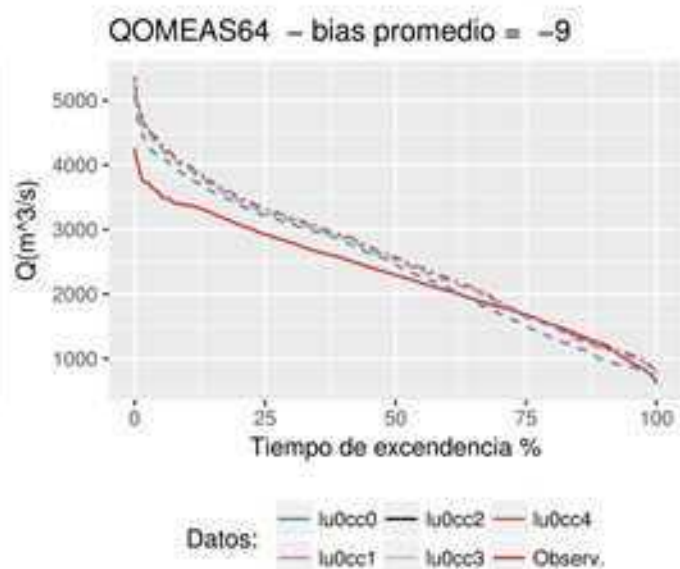
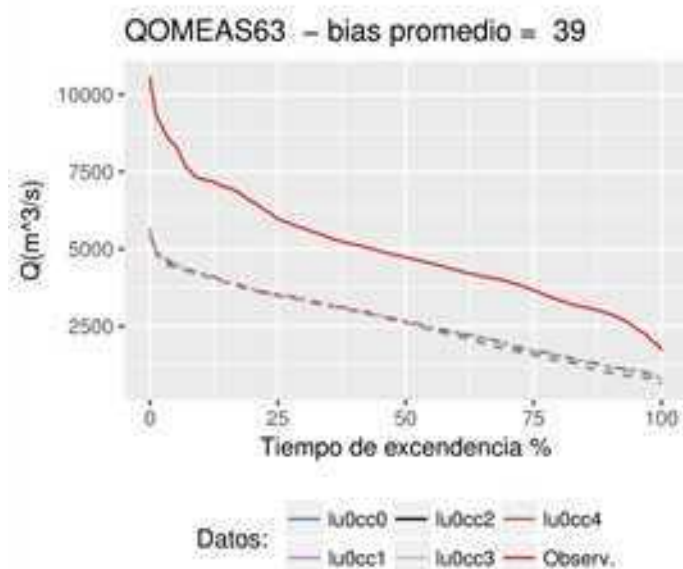
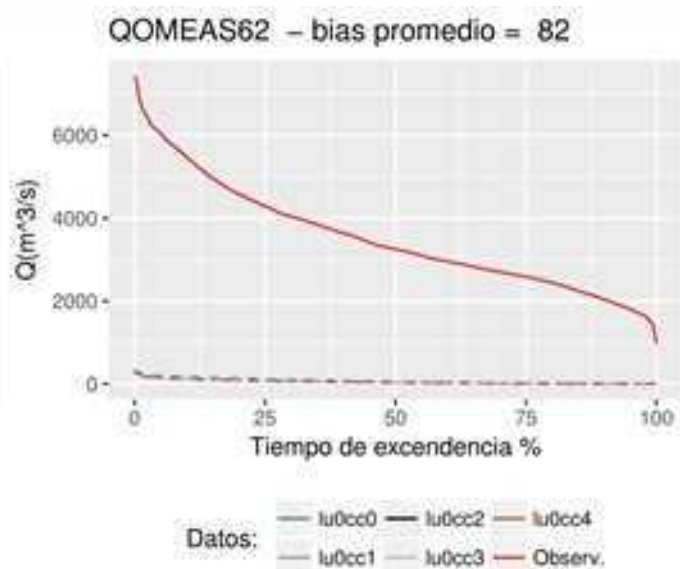
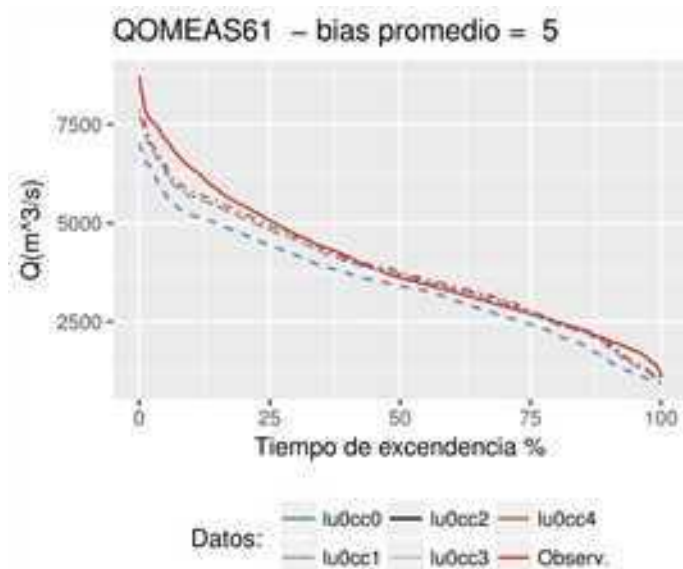


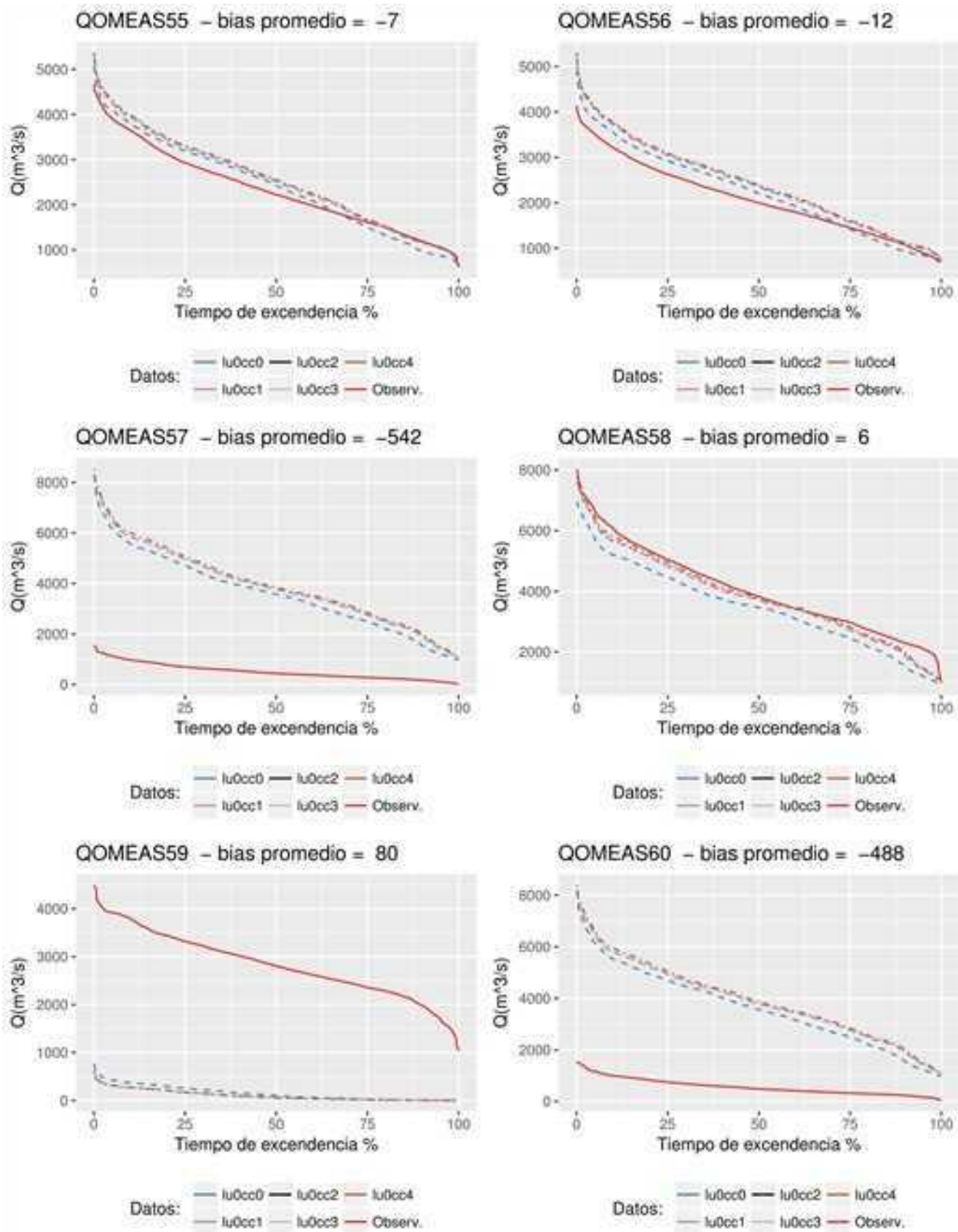
Datos: lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

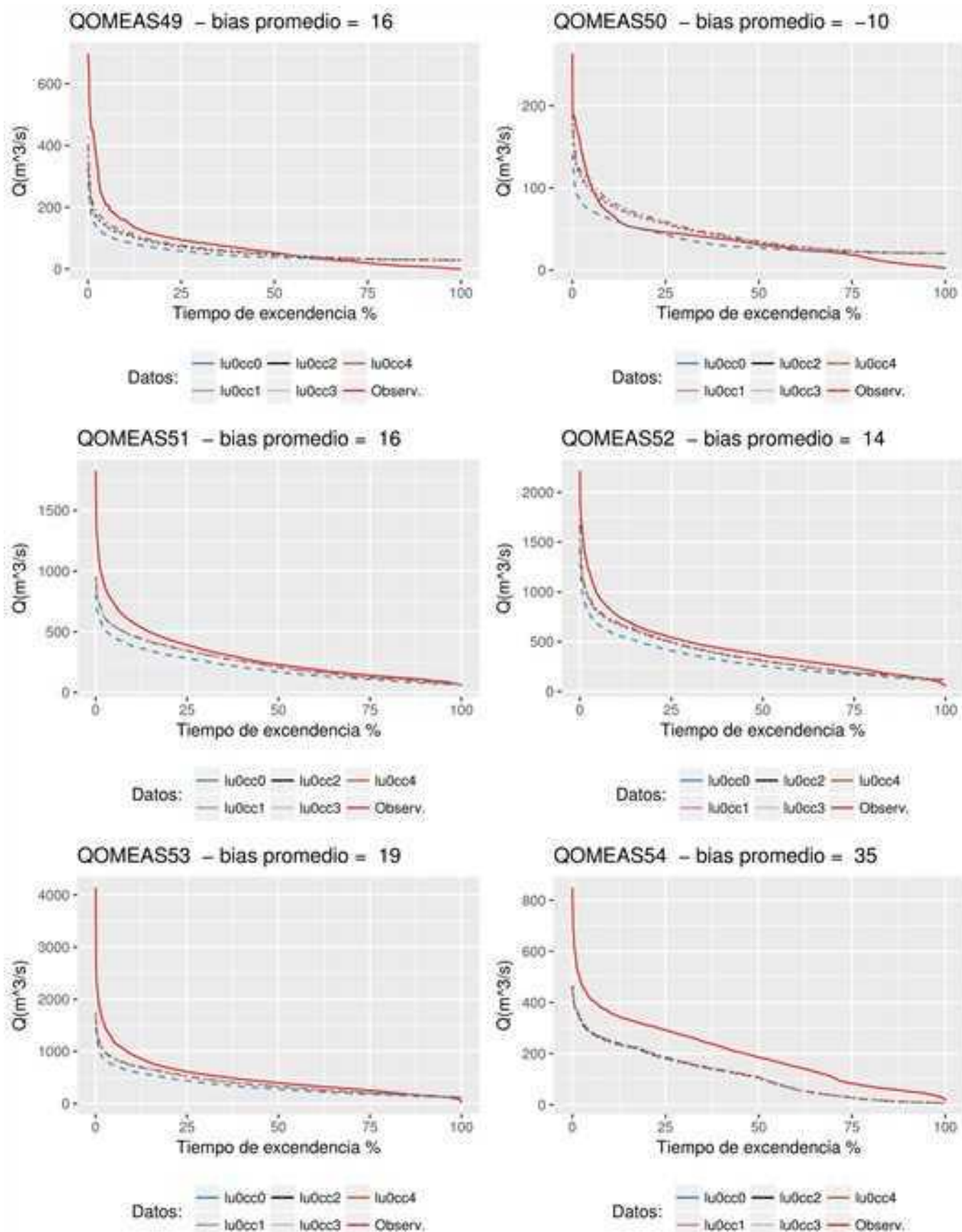


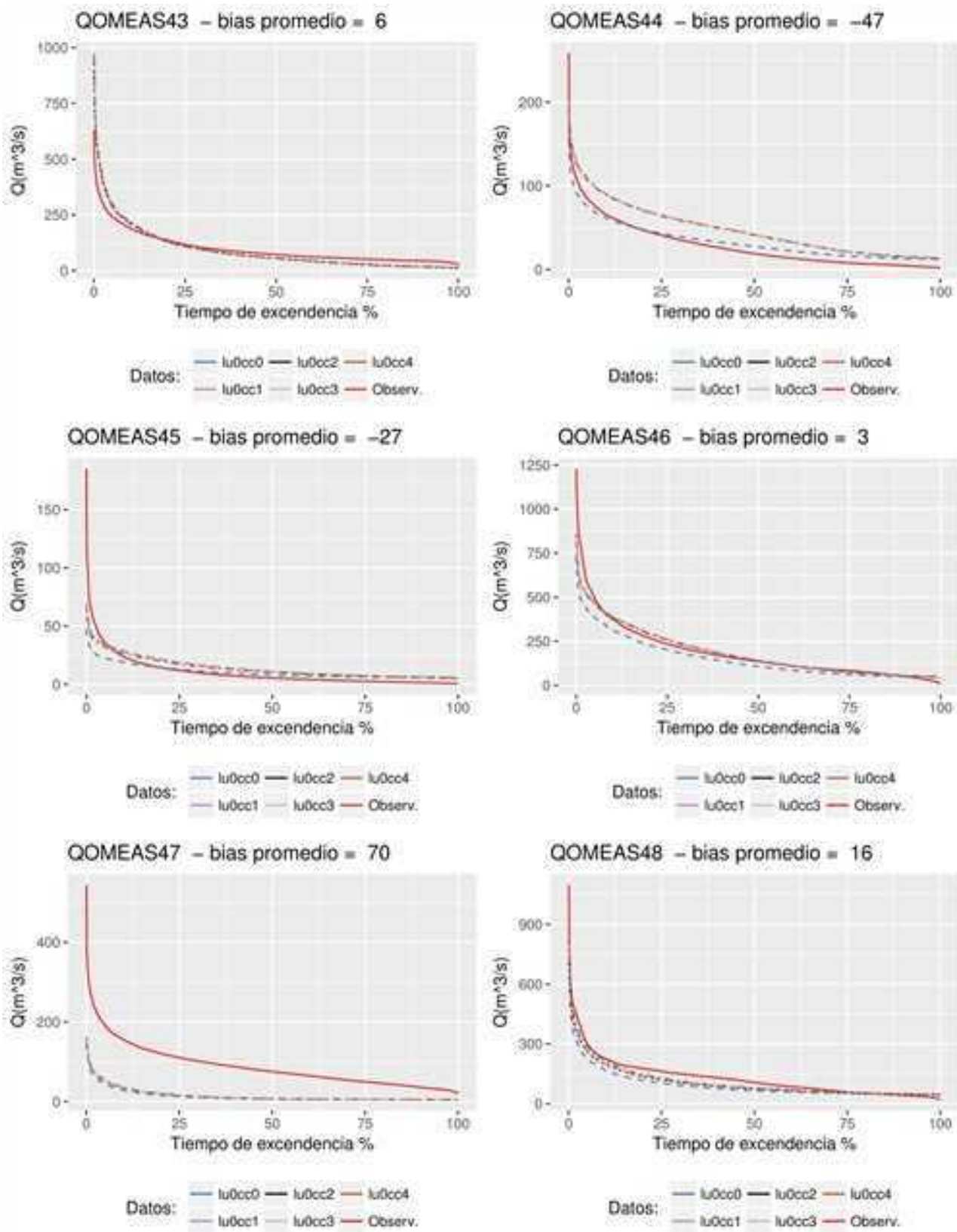


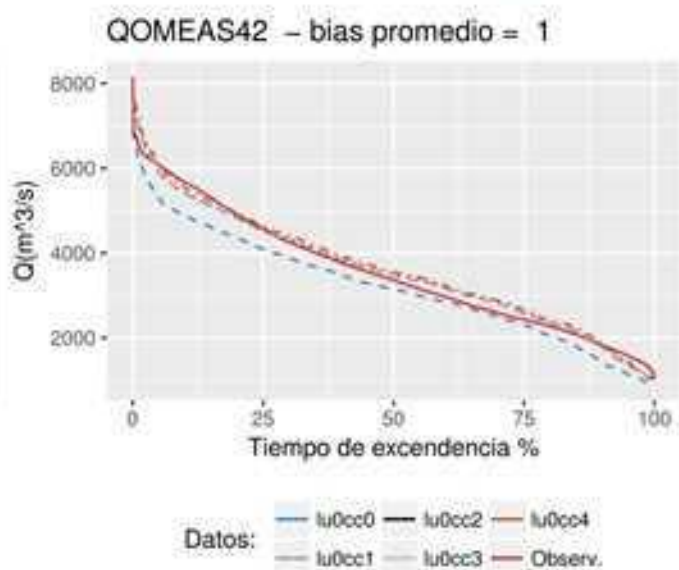
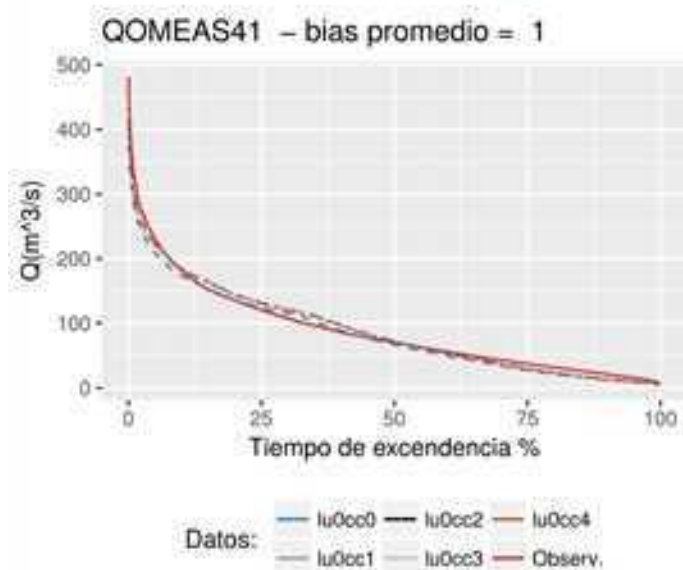
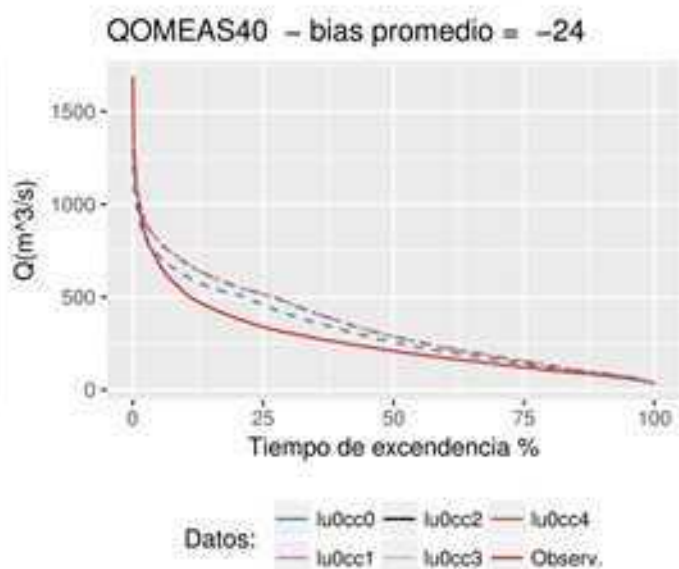
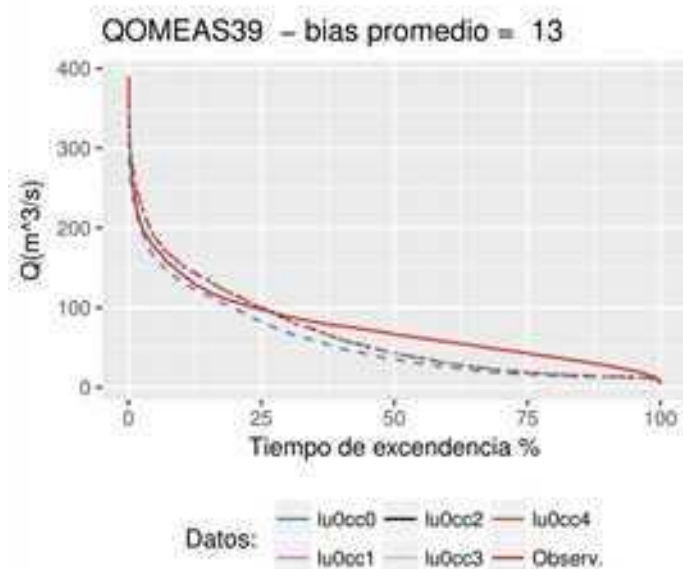
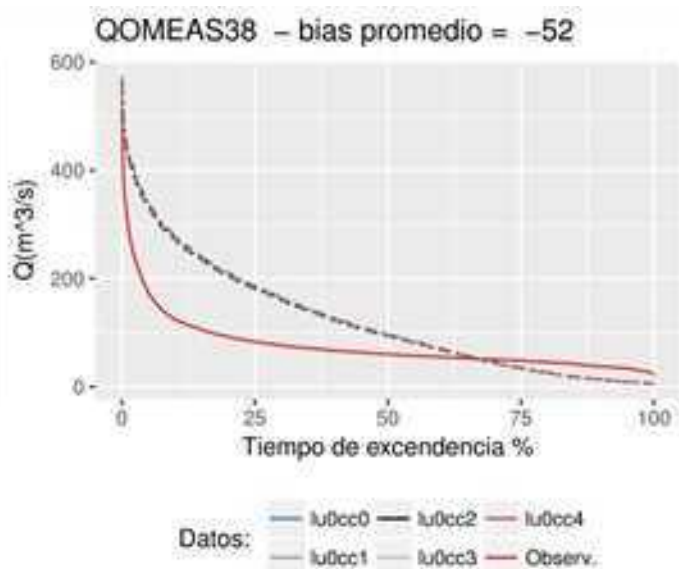
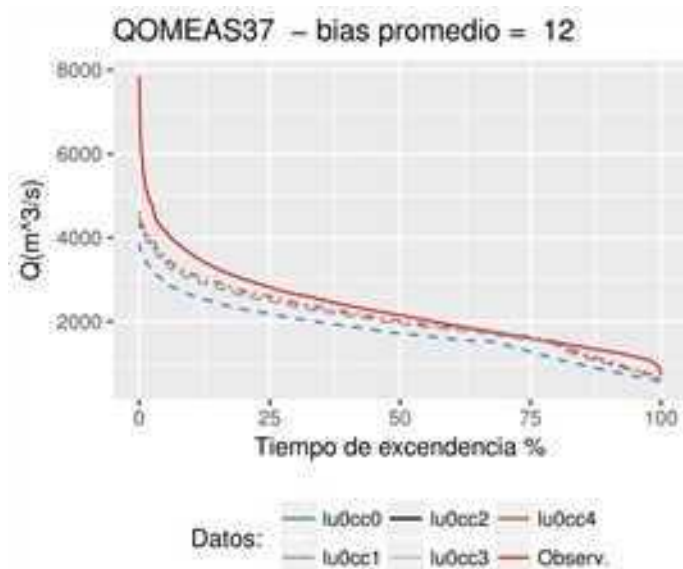


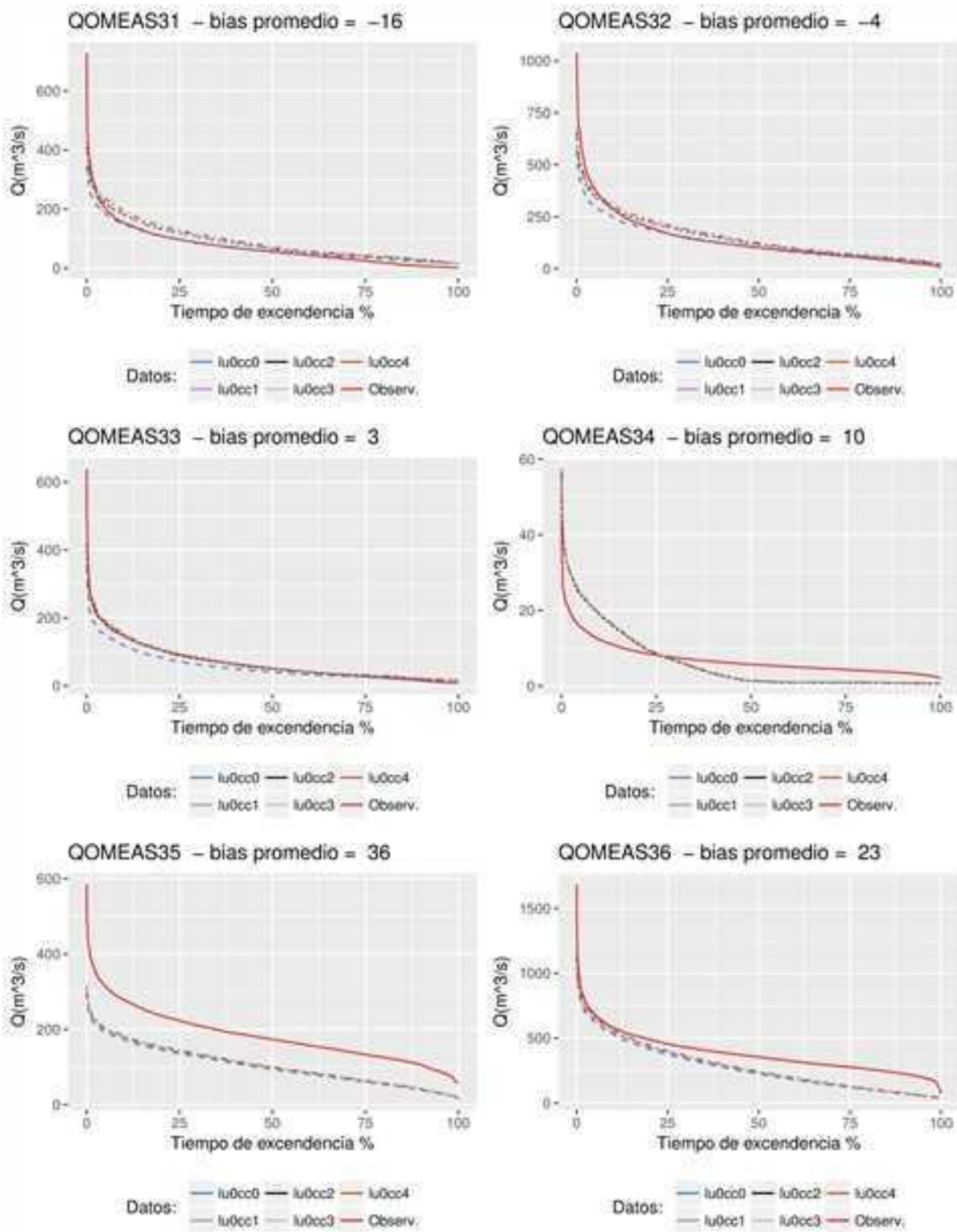


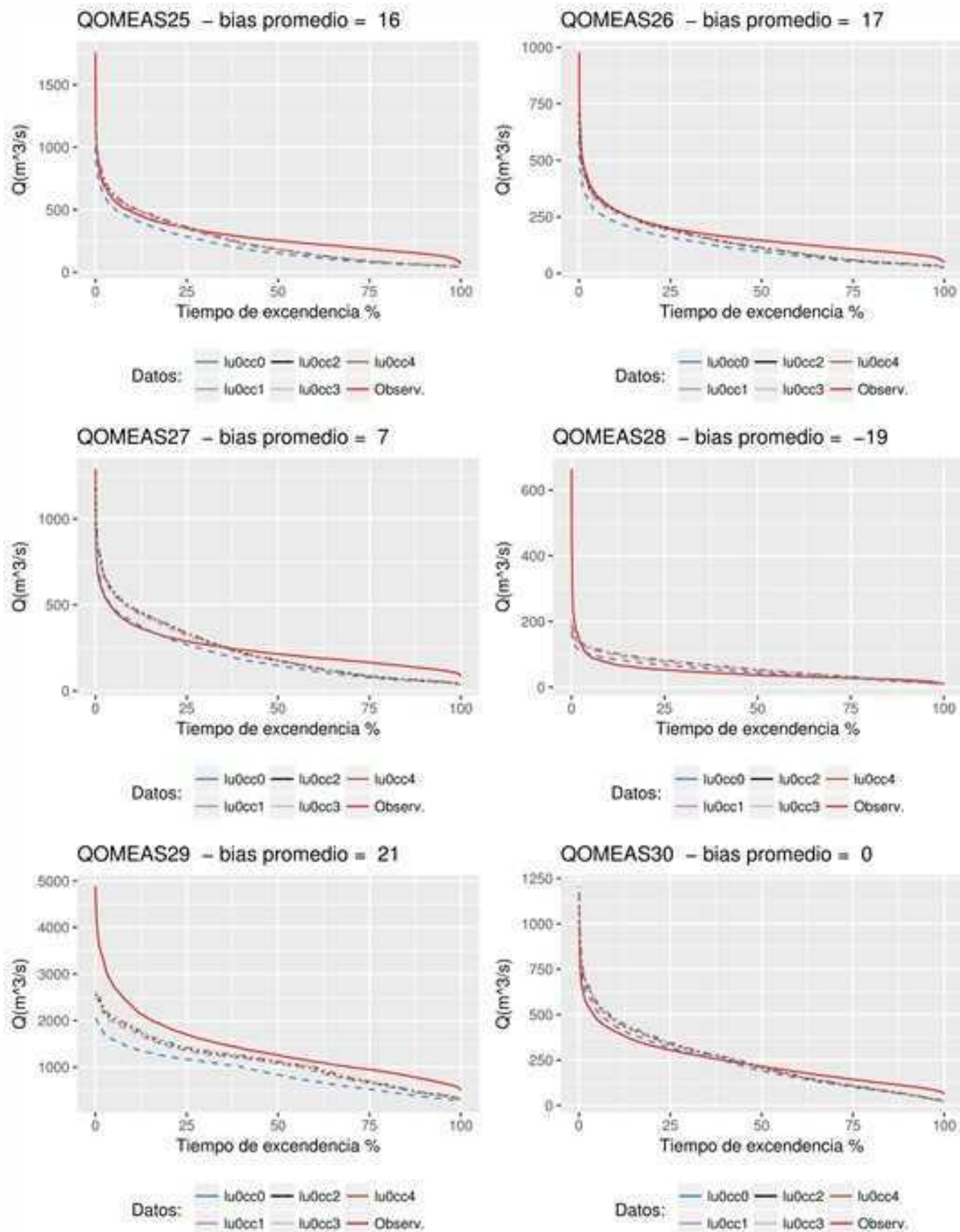


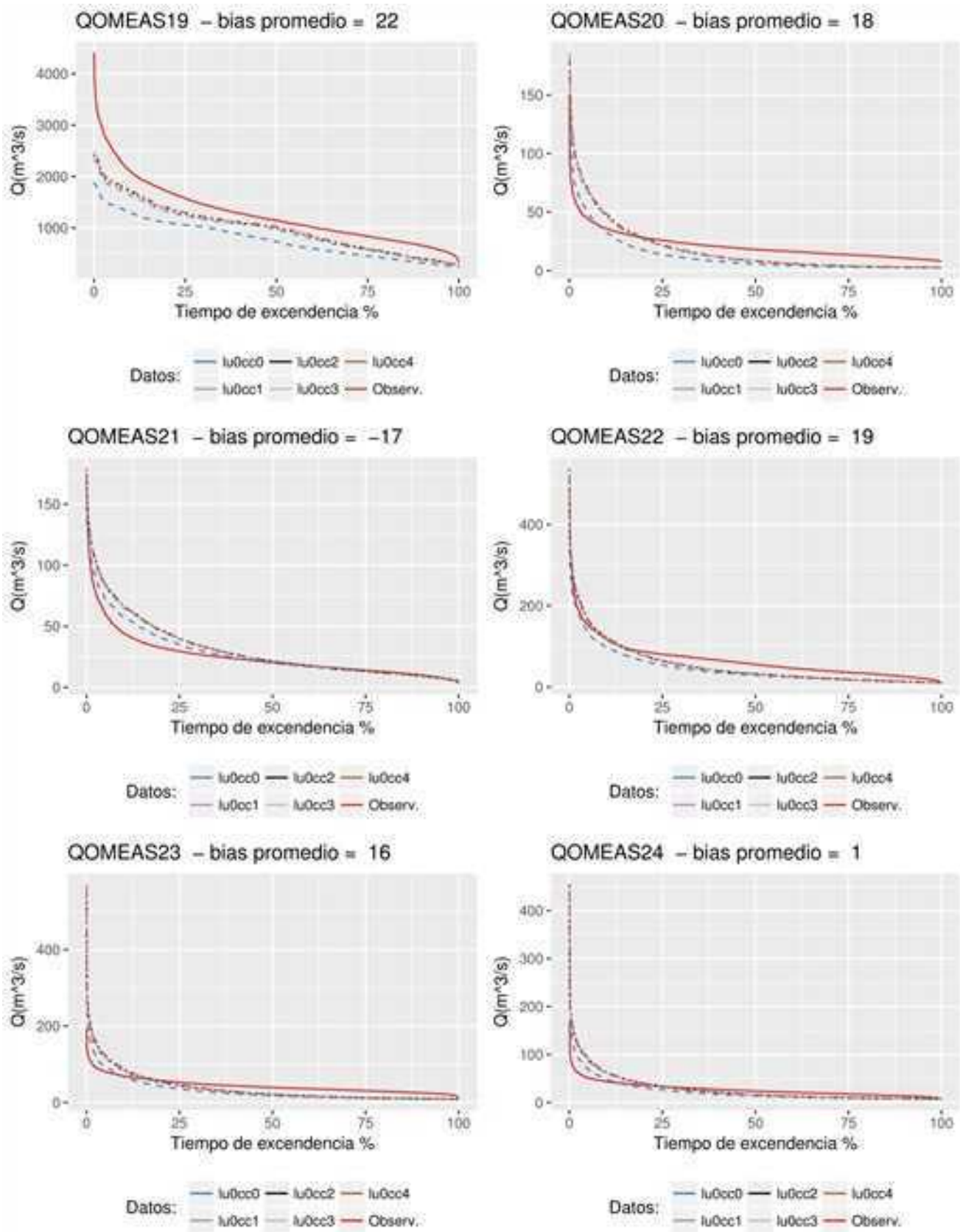


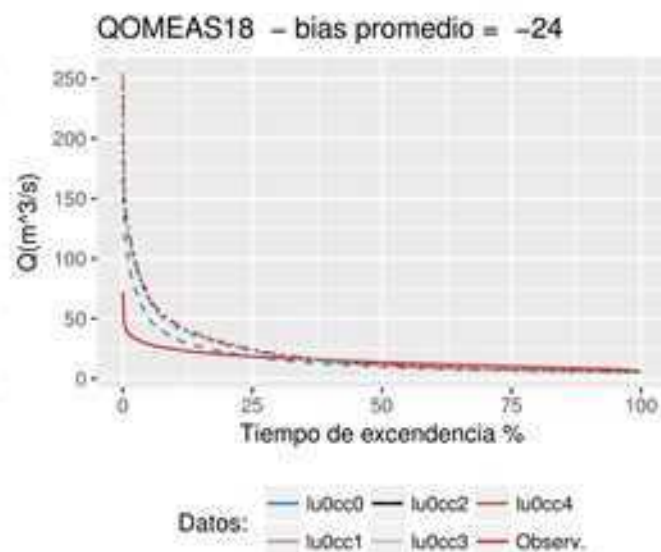
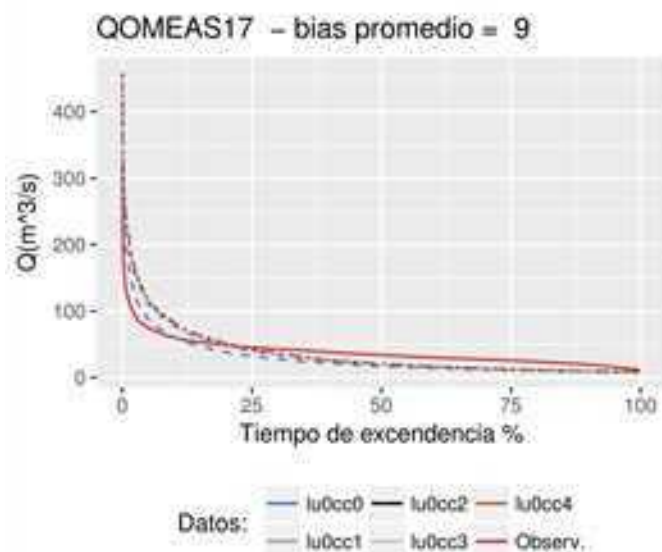
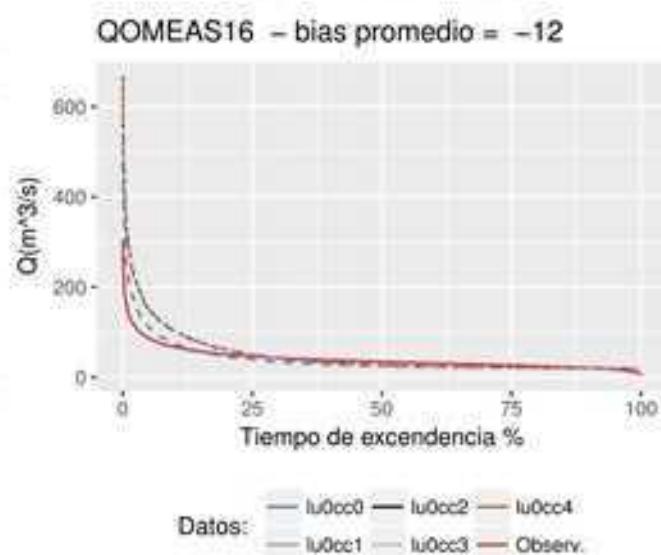
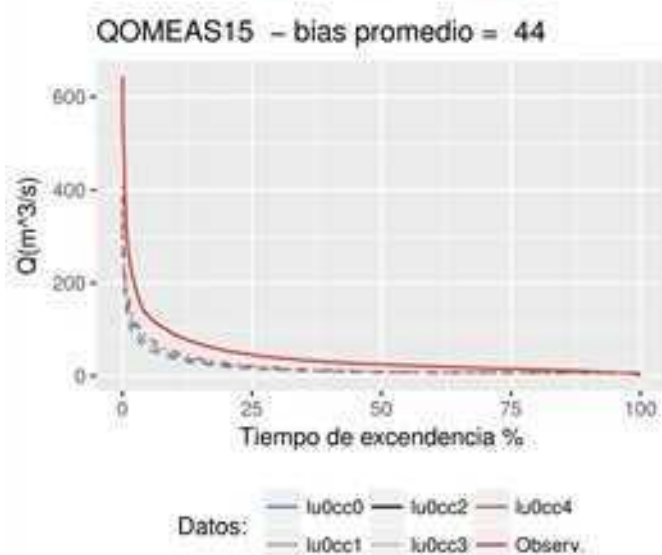
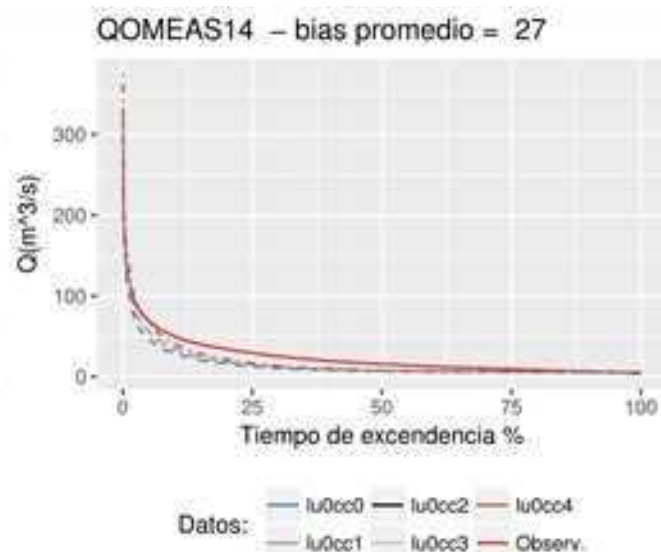
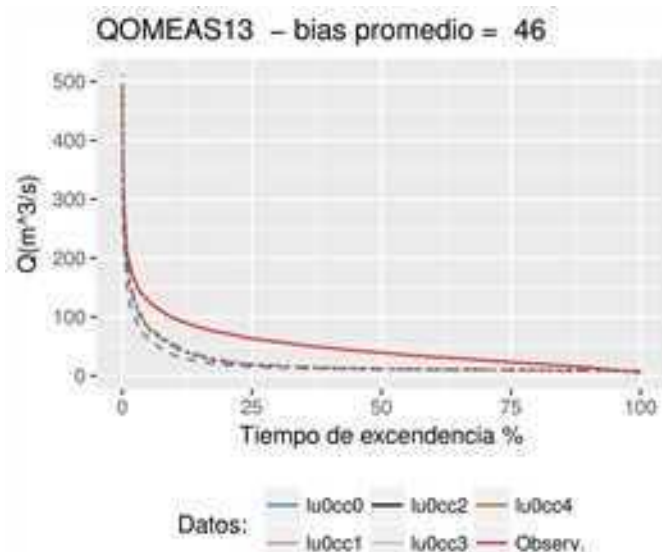


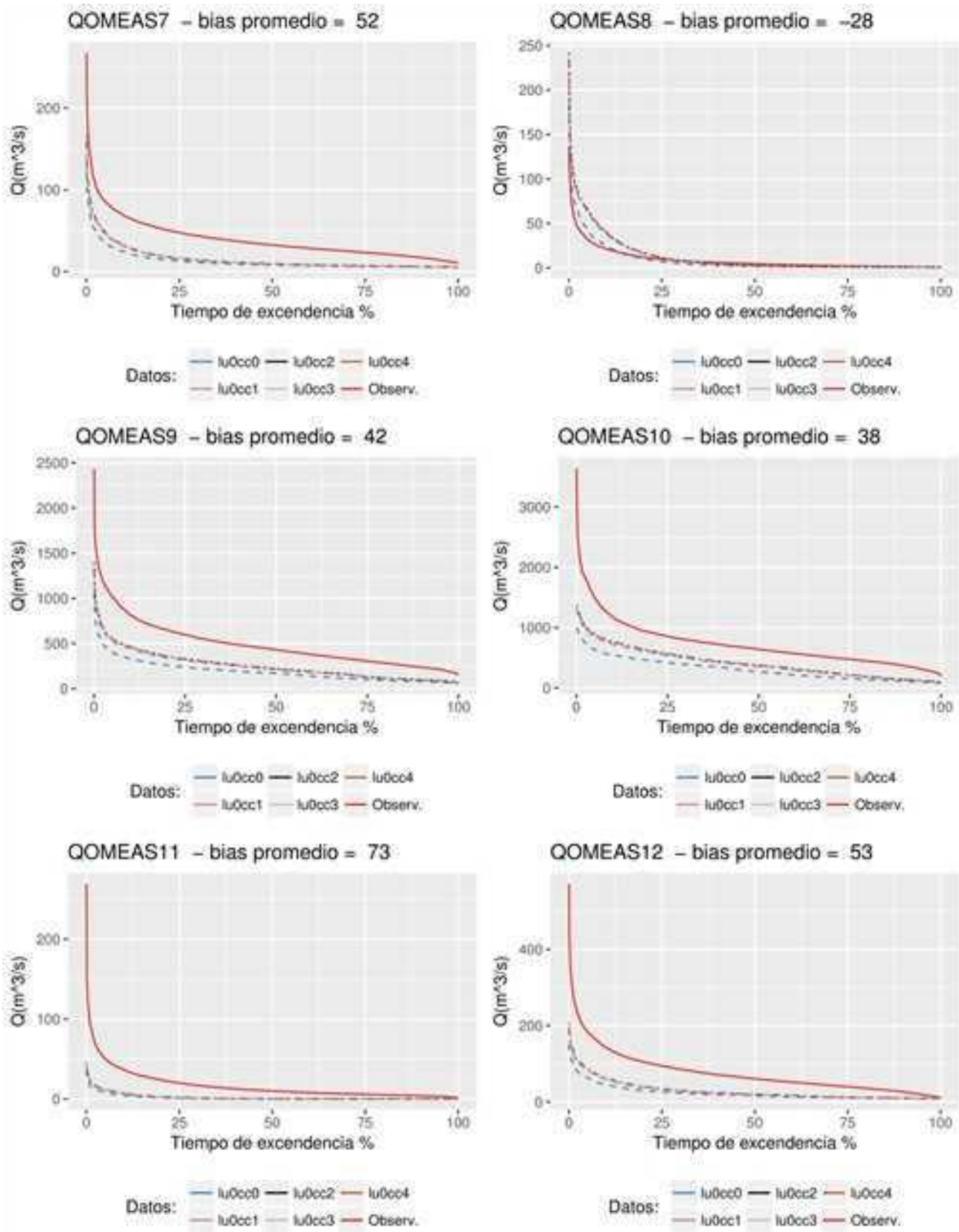




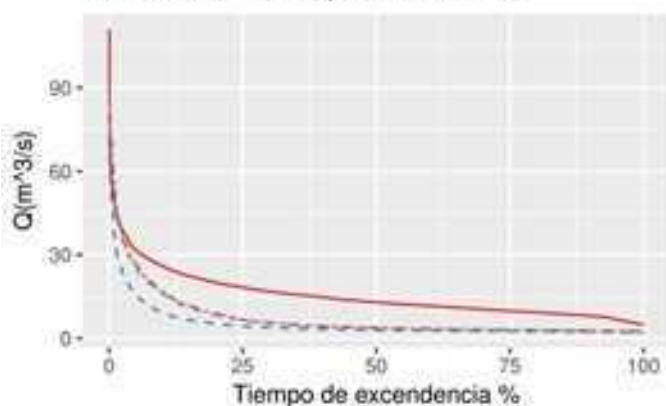






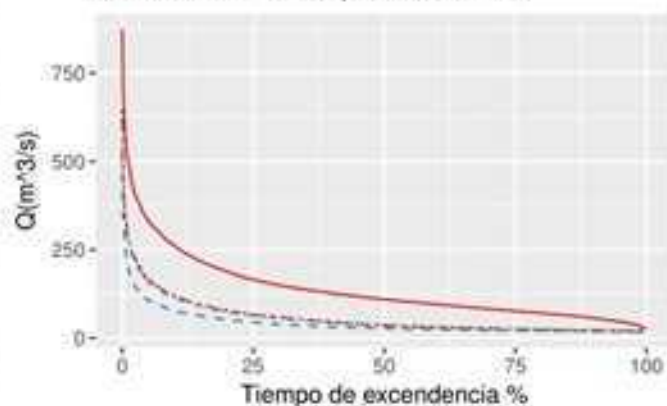


QOMEAS1 – bias promedio = 46



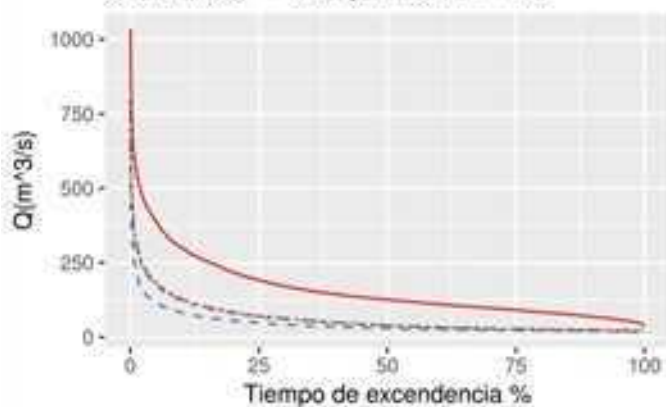
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

QOMEAS2 – bias promedio = 51



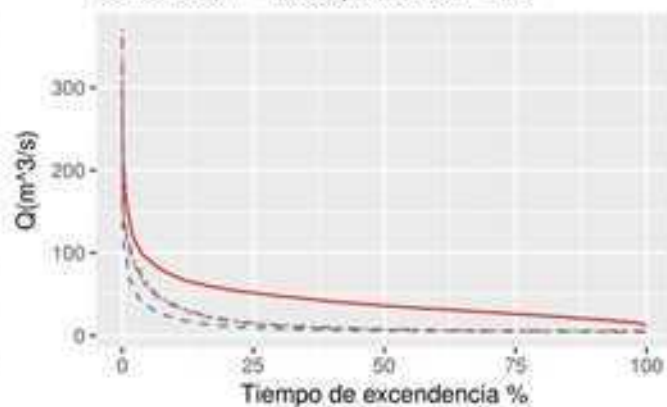
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

QOMEAS3 – bias promedio = 53



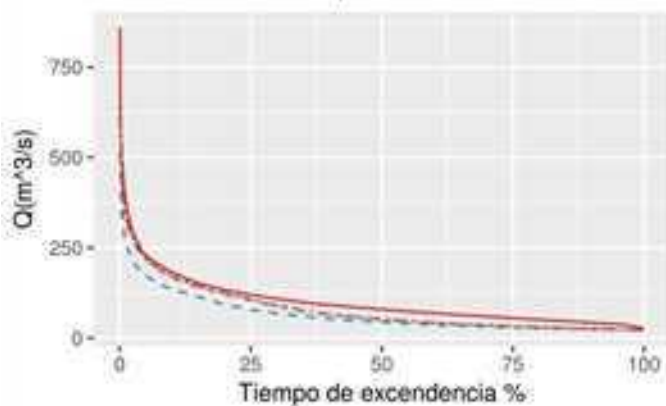
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

QOMEAS4 – bias promedio = 54



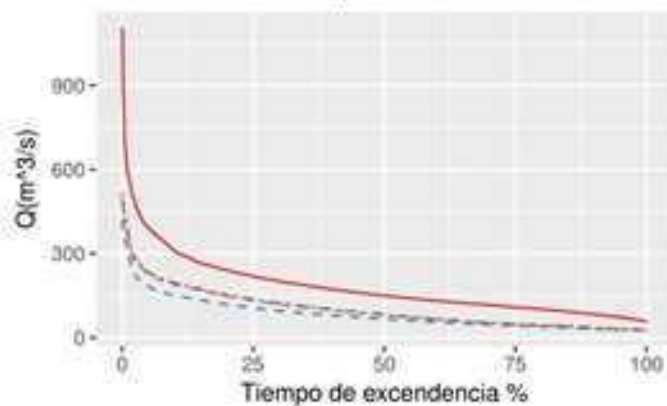
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

QOMEAS5 – bias promedio = 19

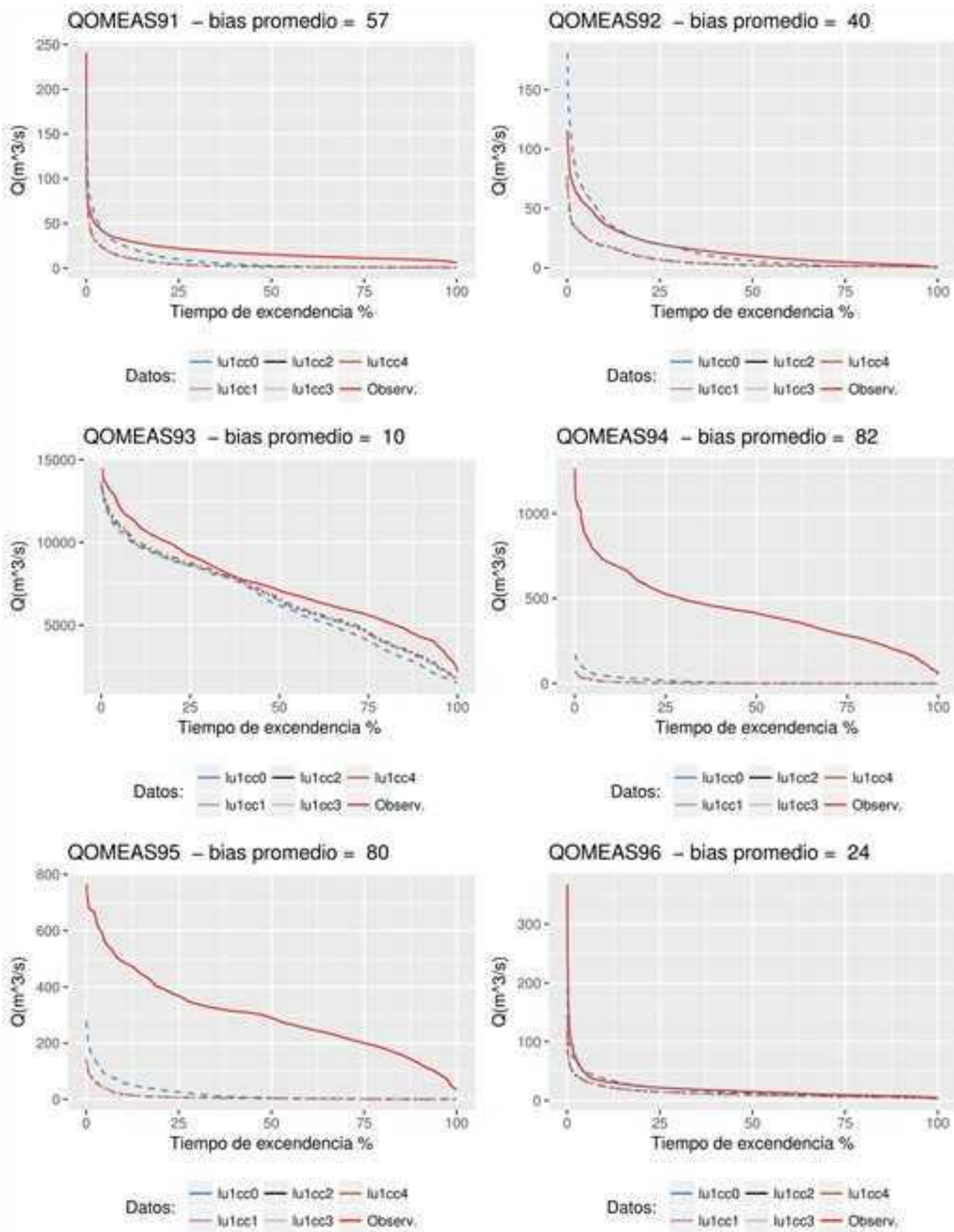


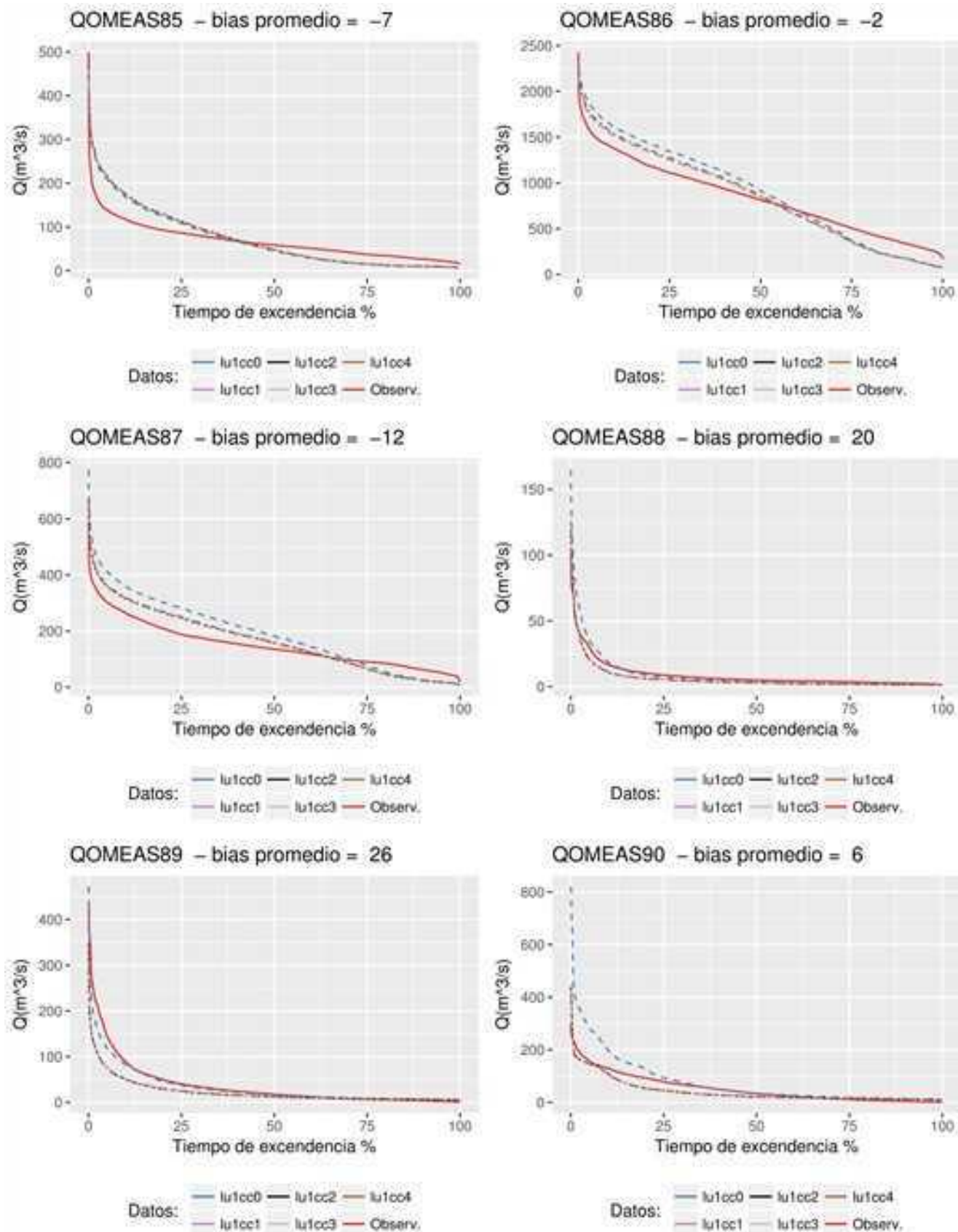
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

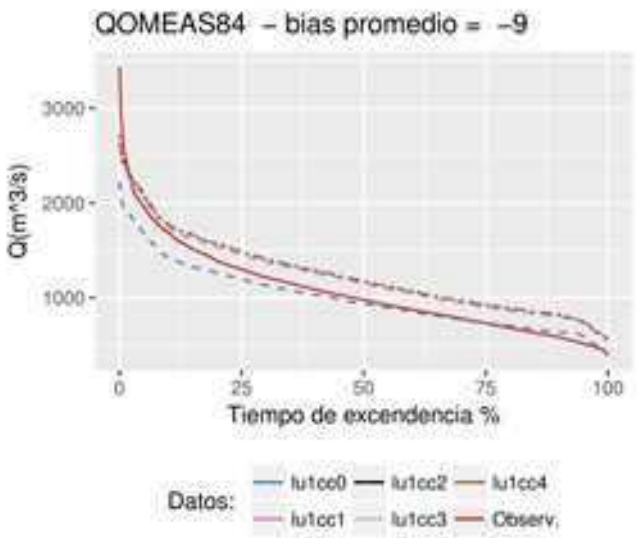
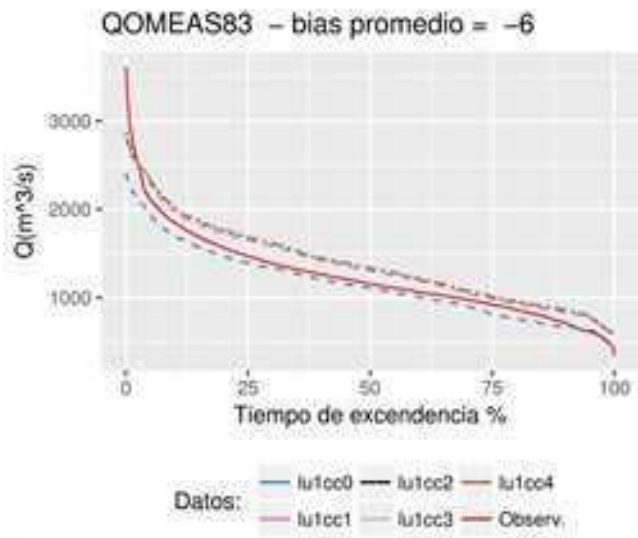
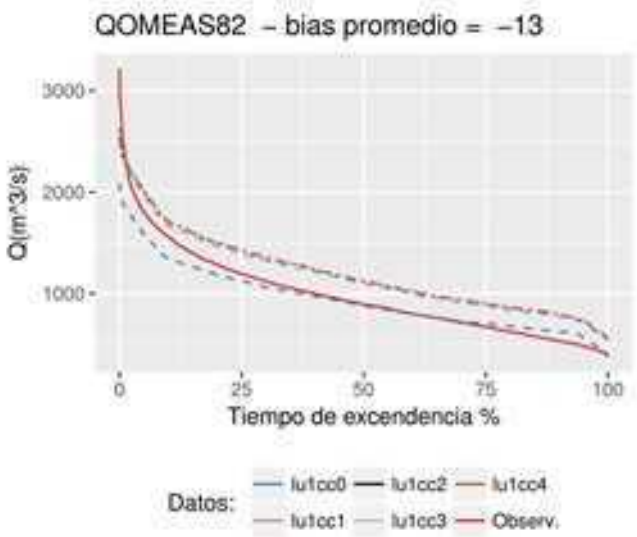
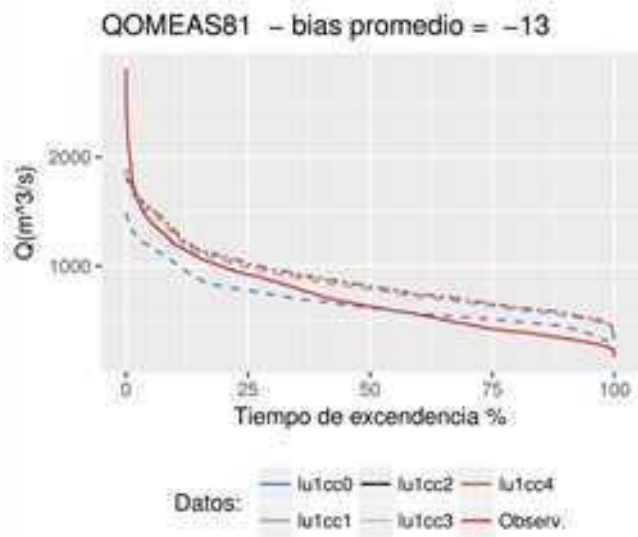
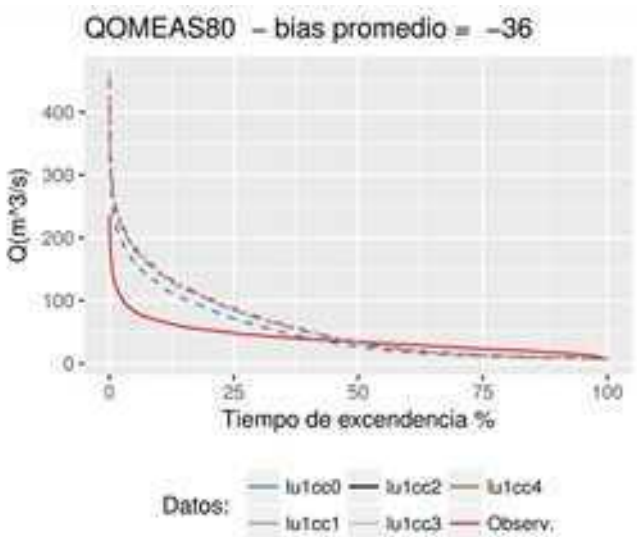
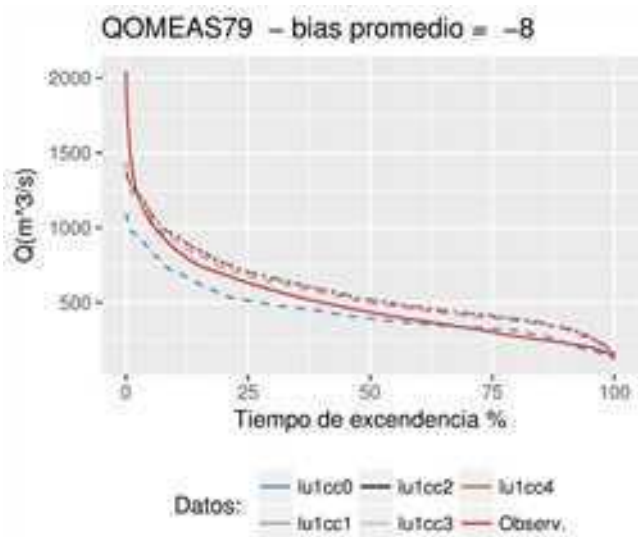
QOMEAS6 – bias promedio = 38

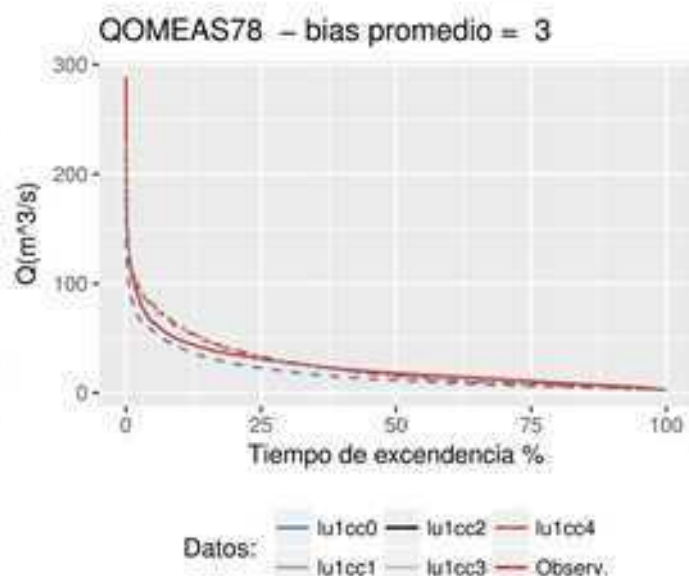
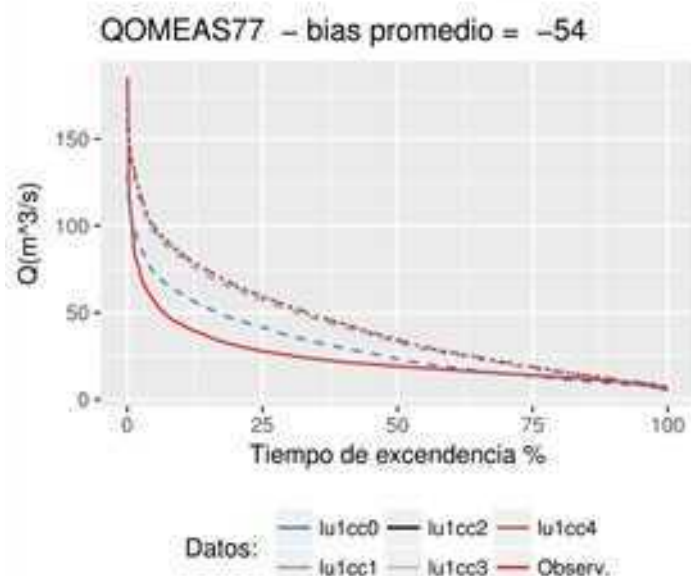
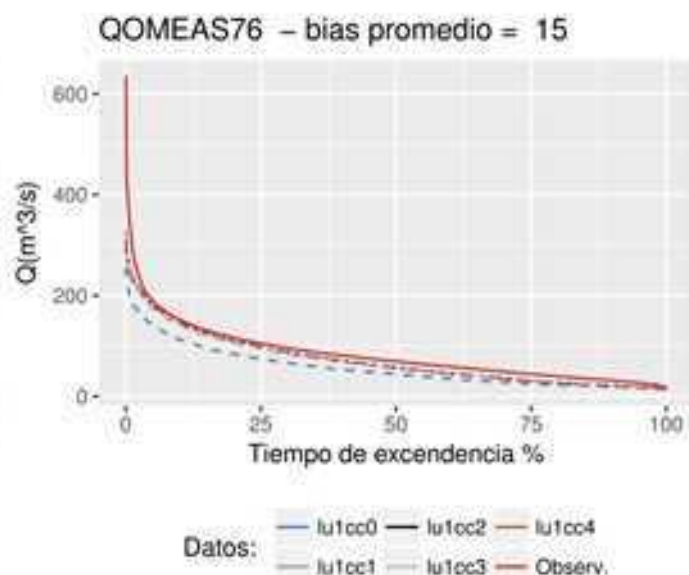
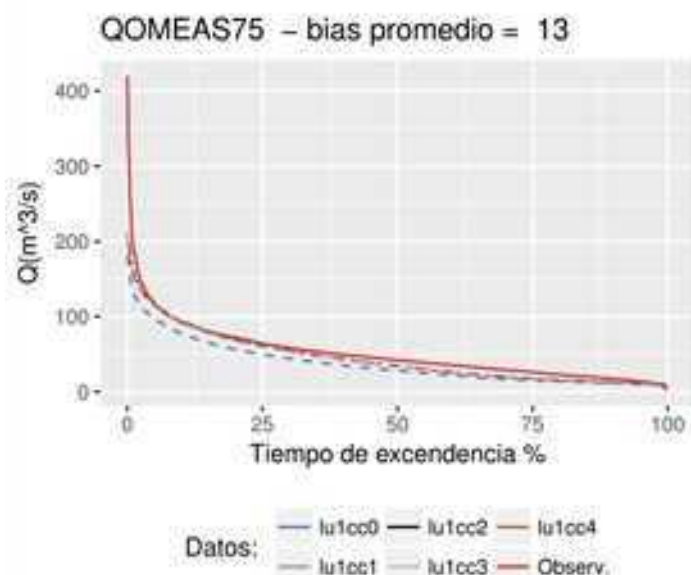
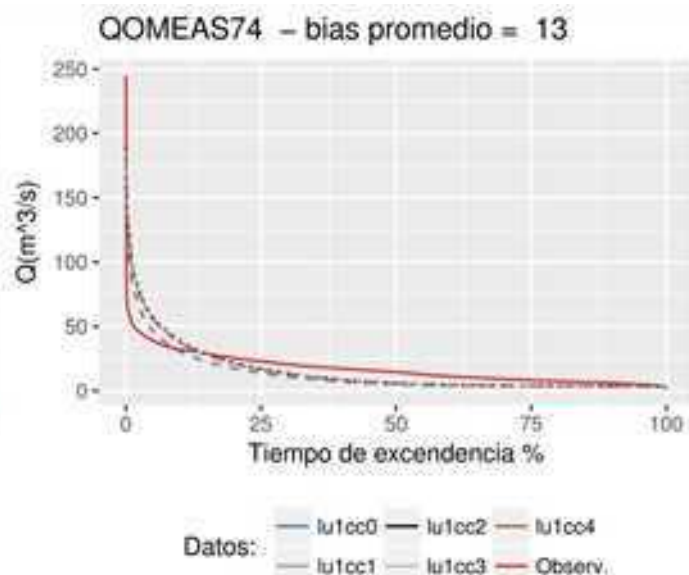
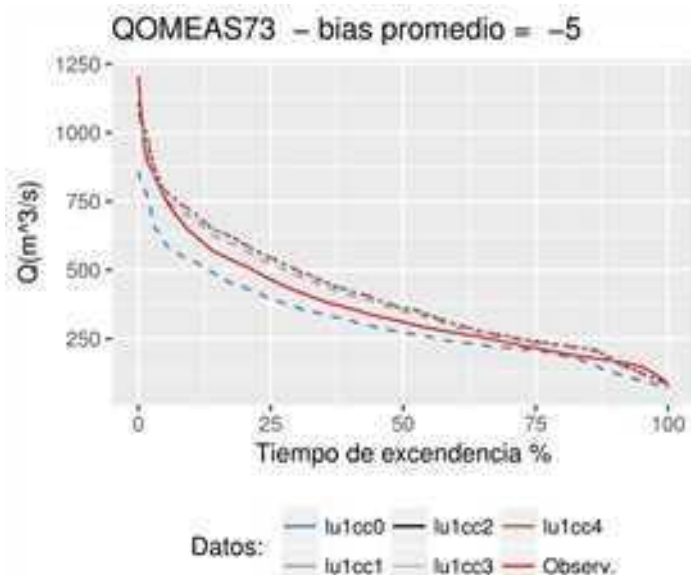


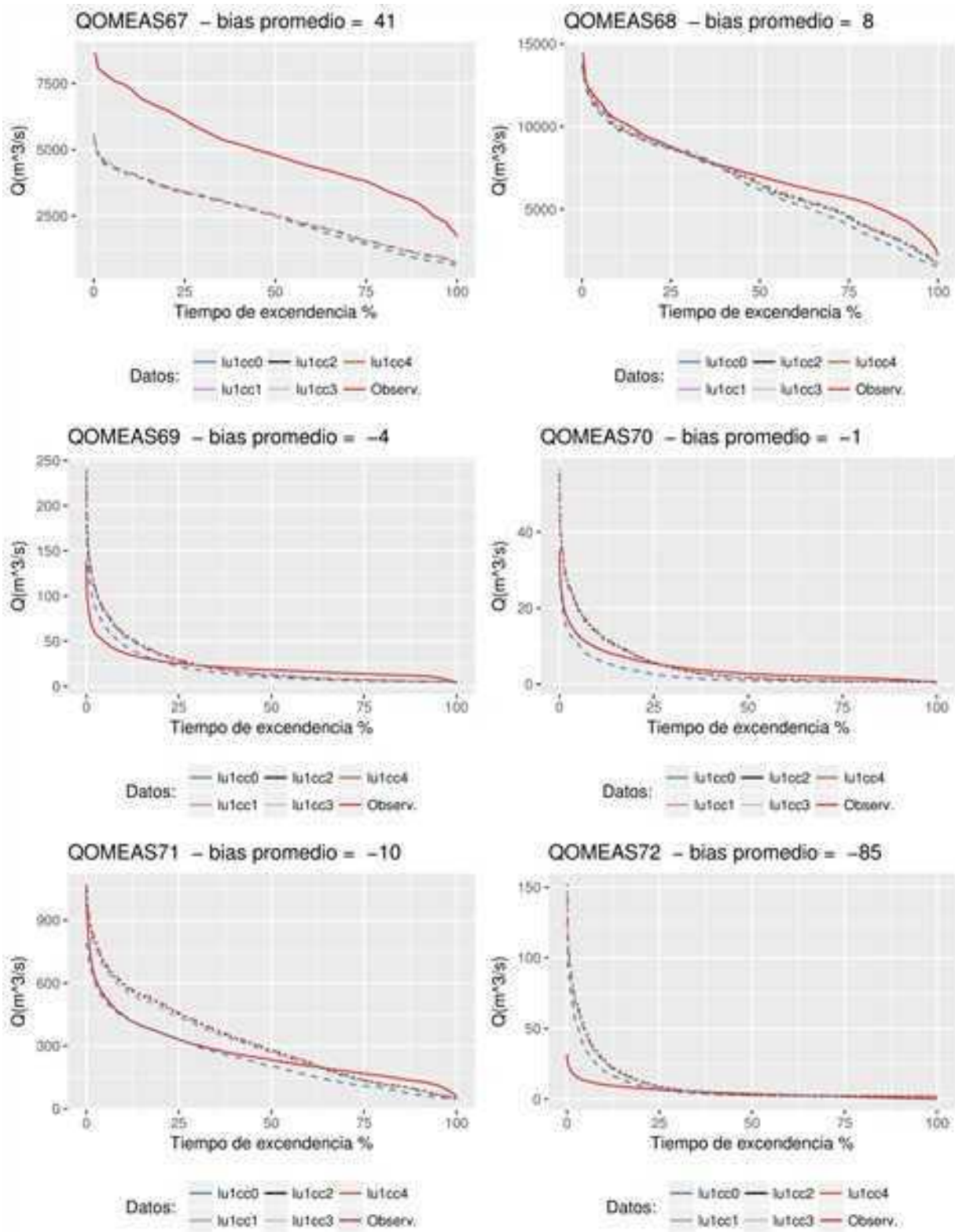
Datos: — lu0cc0 — lu0cc2 — lu0cc4
— lu0cc1 — lu0cc3 — Observ.

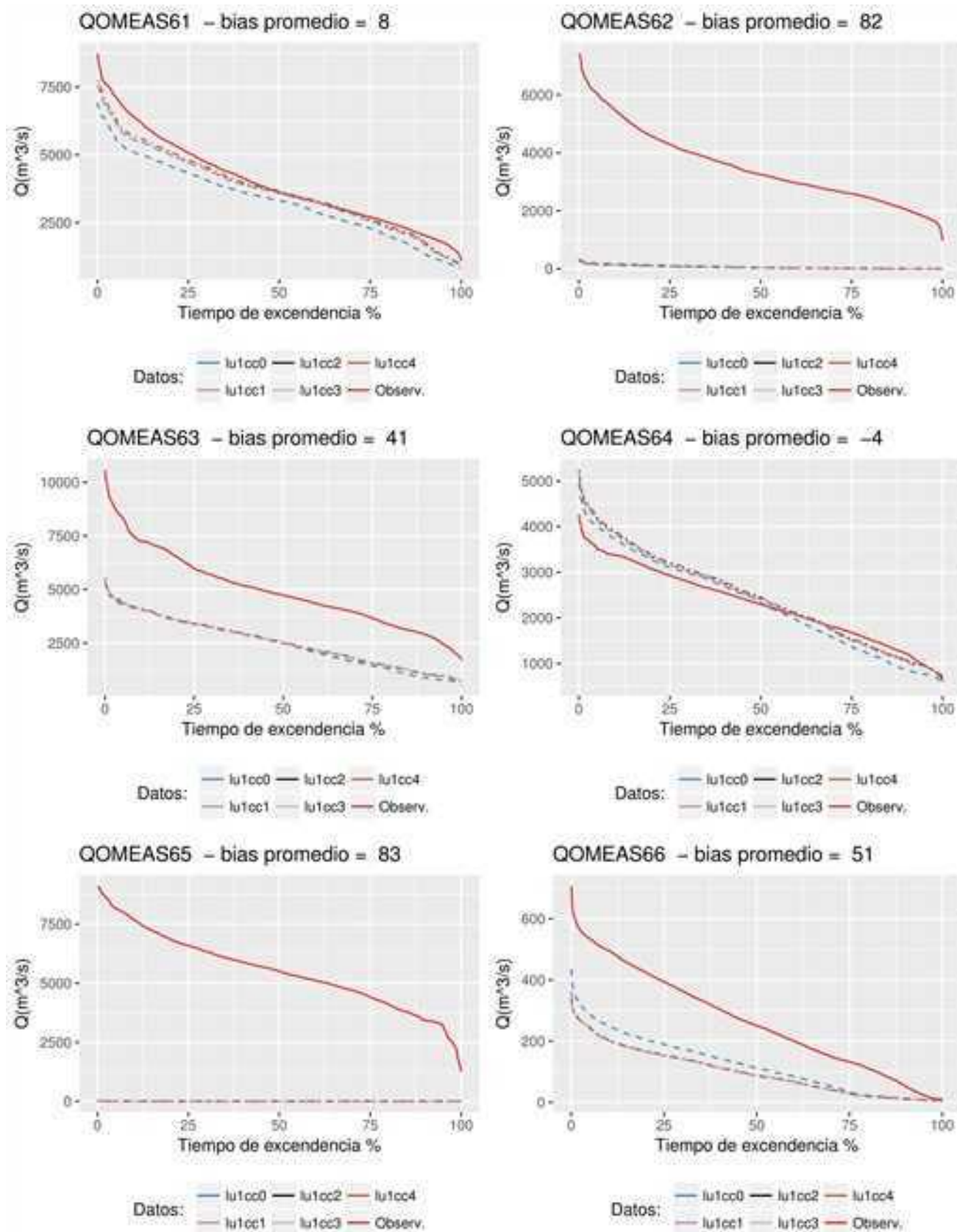


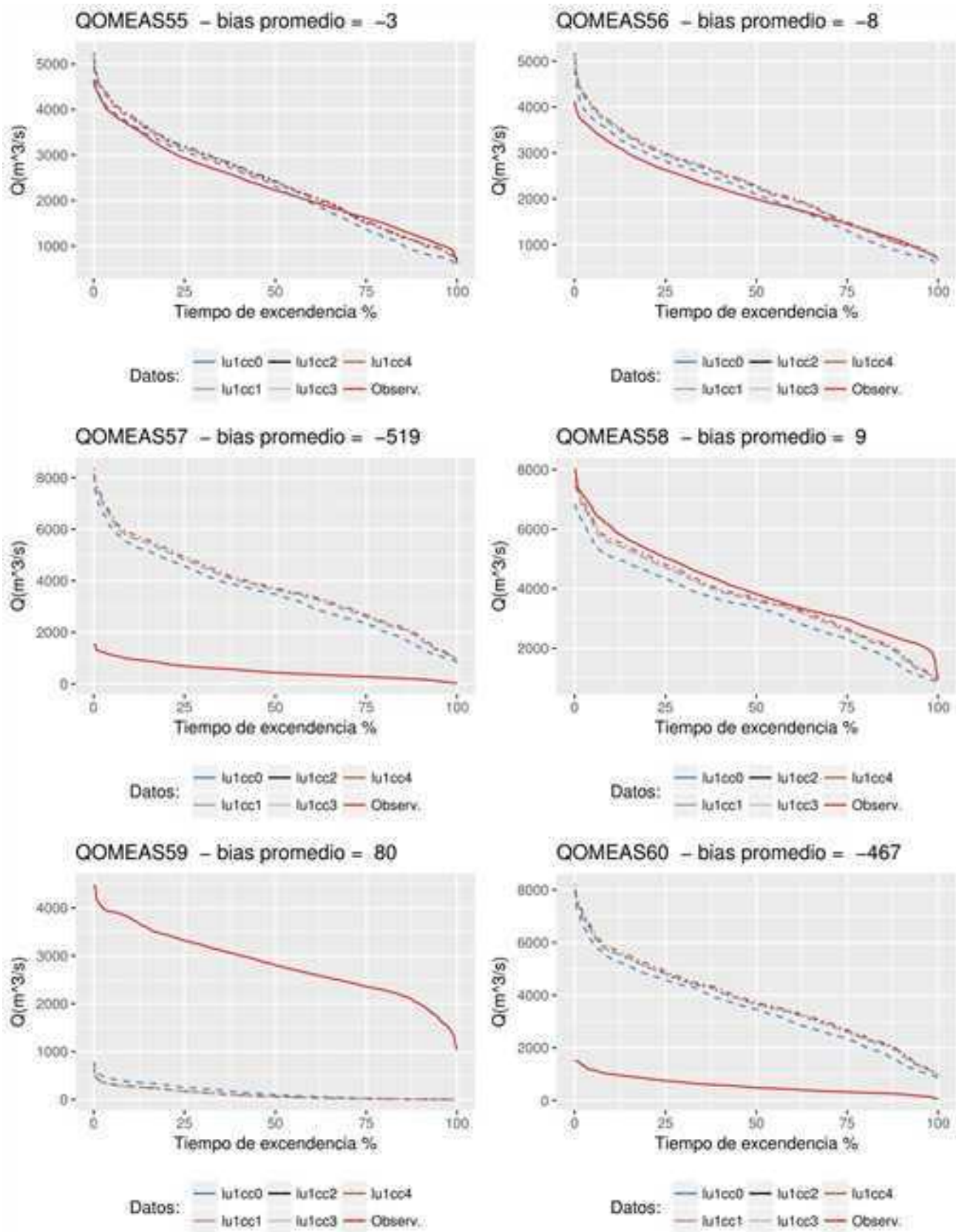


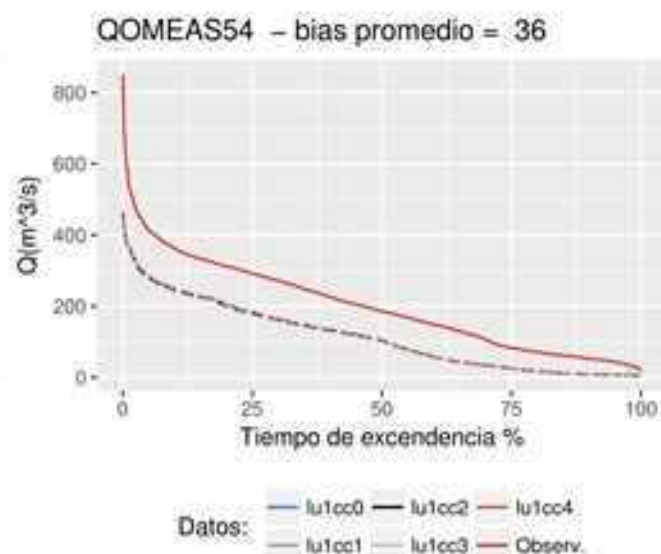
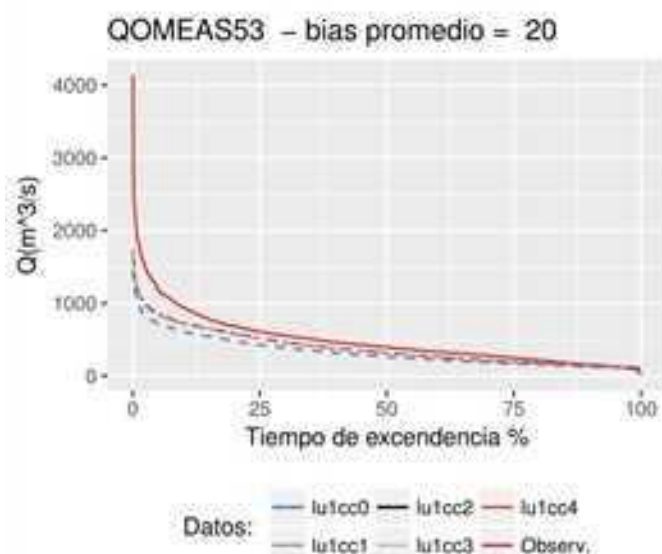
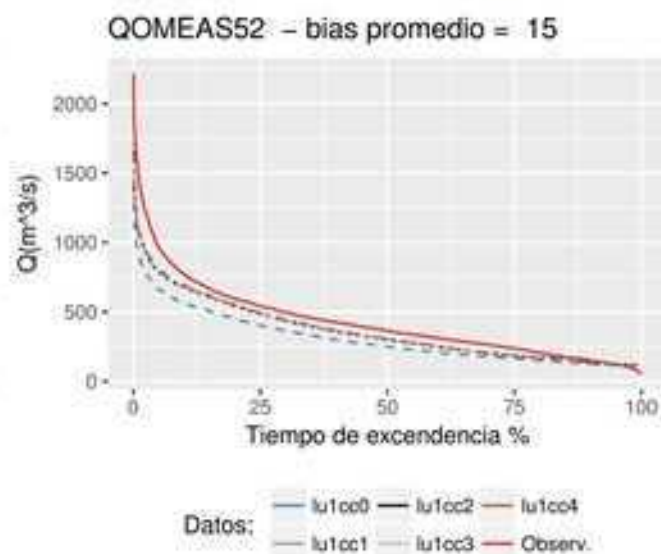
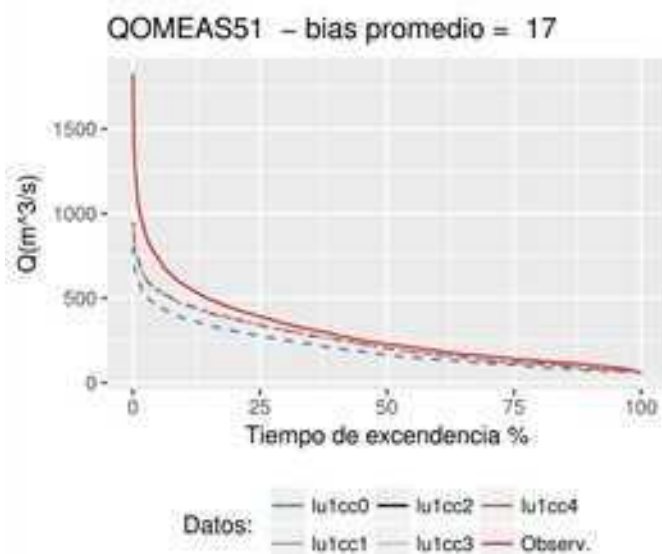
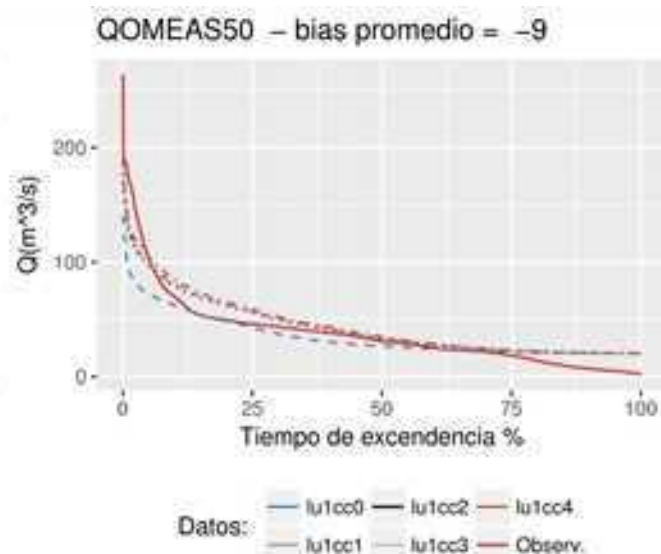
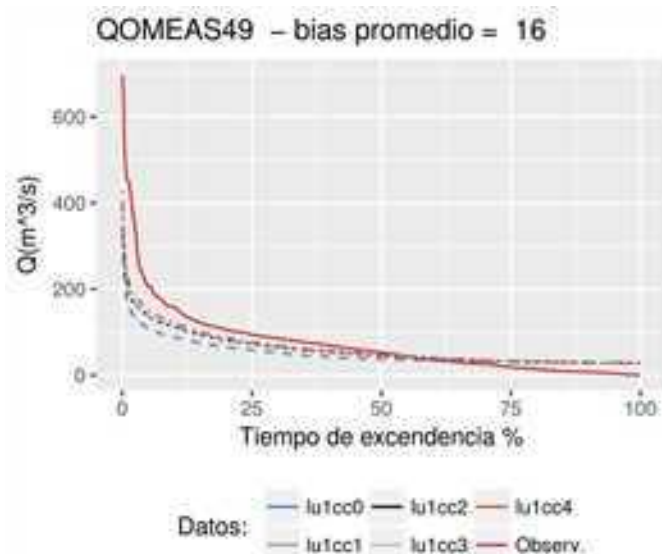


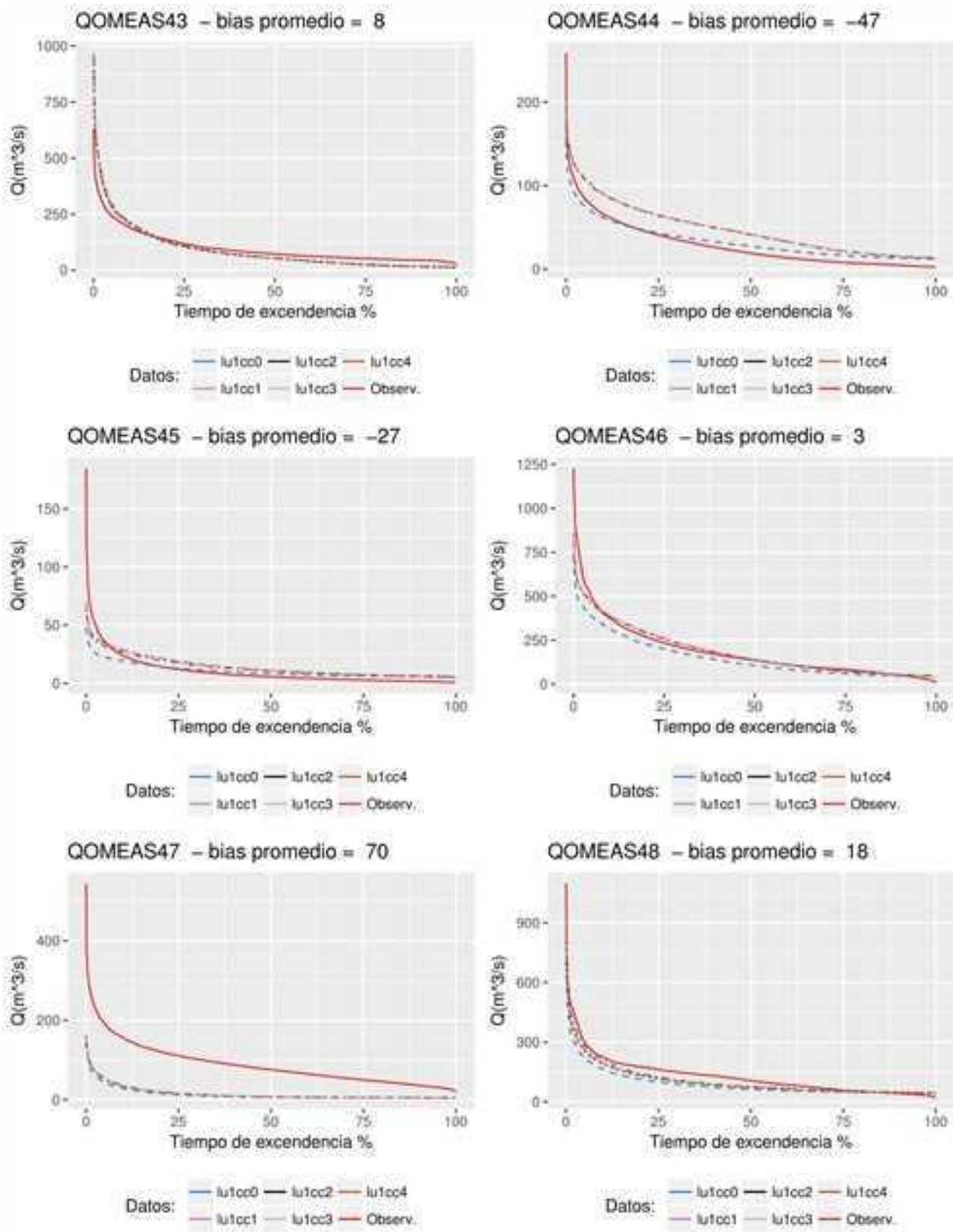


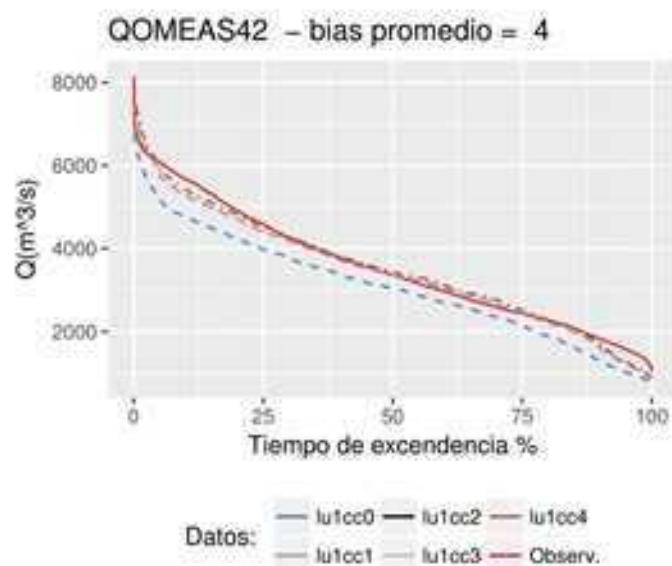
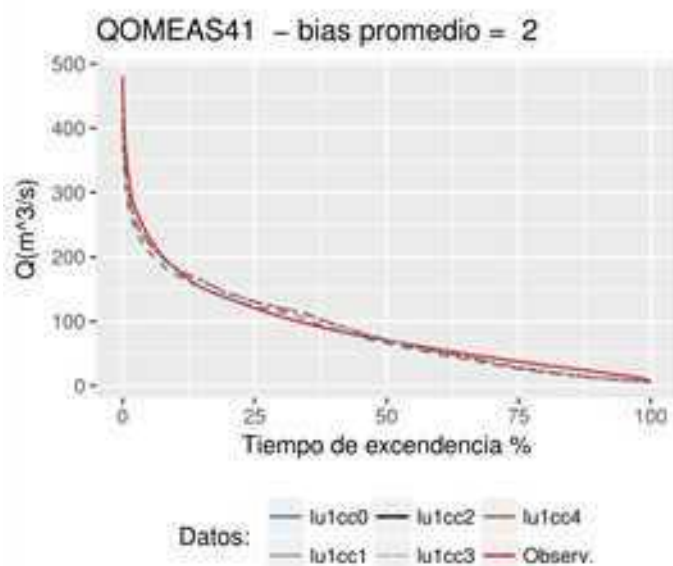
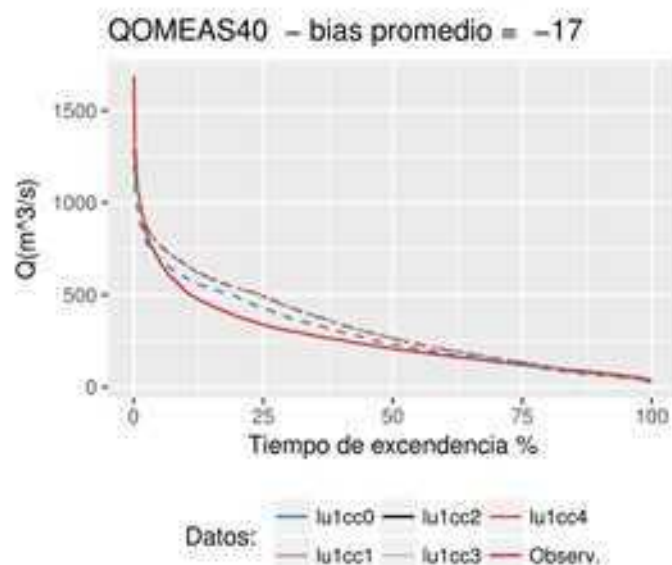
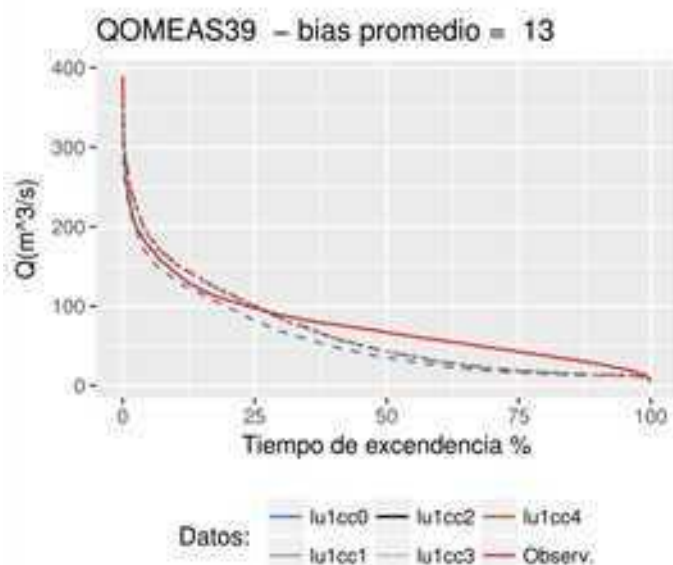
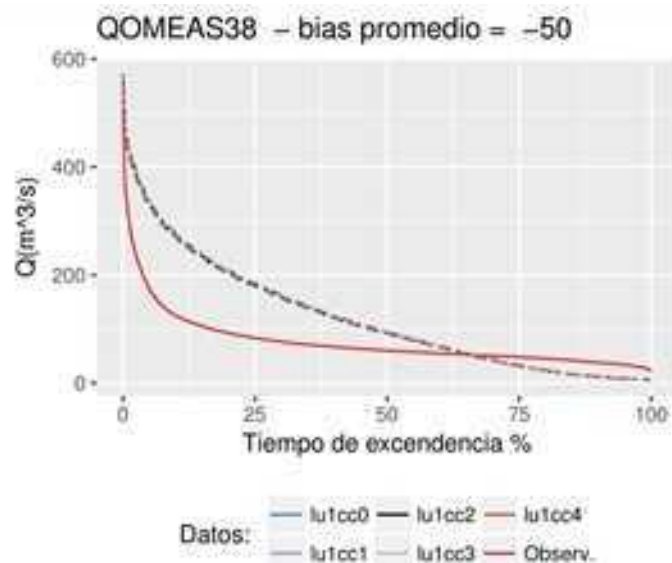
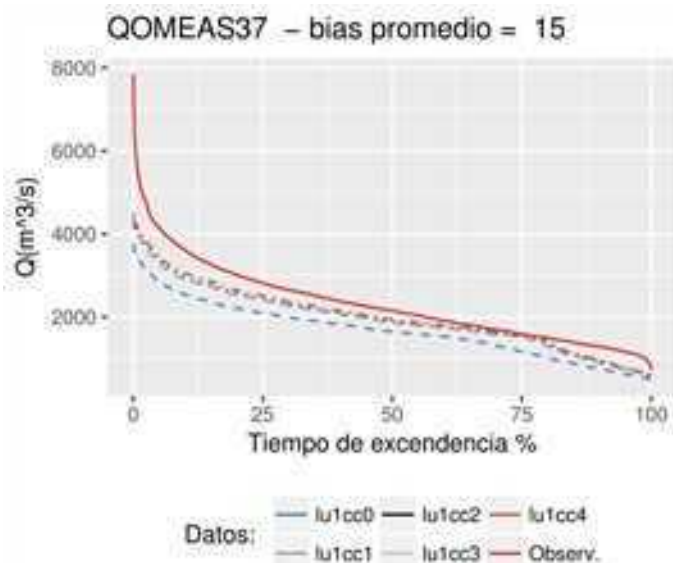


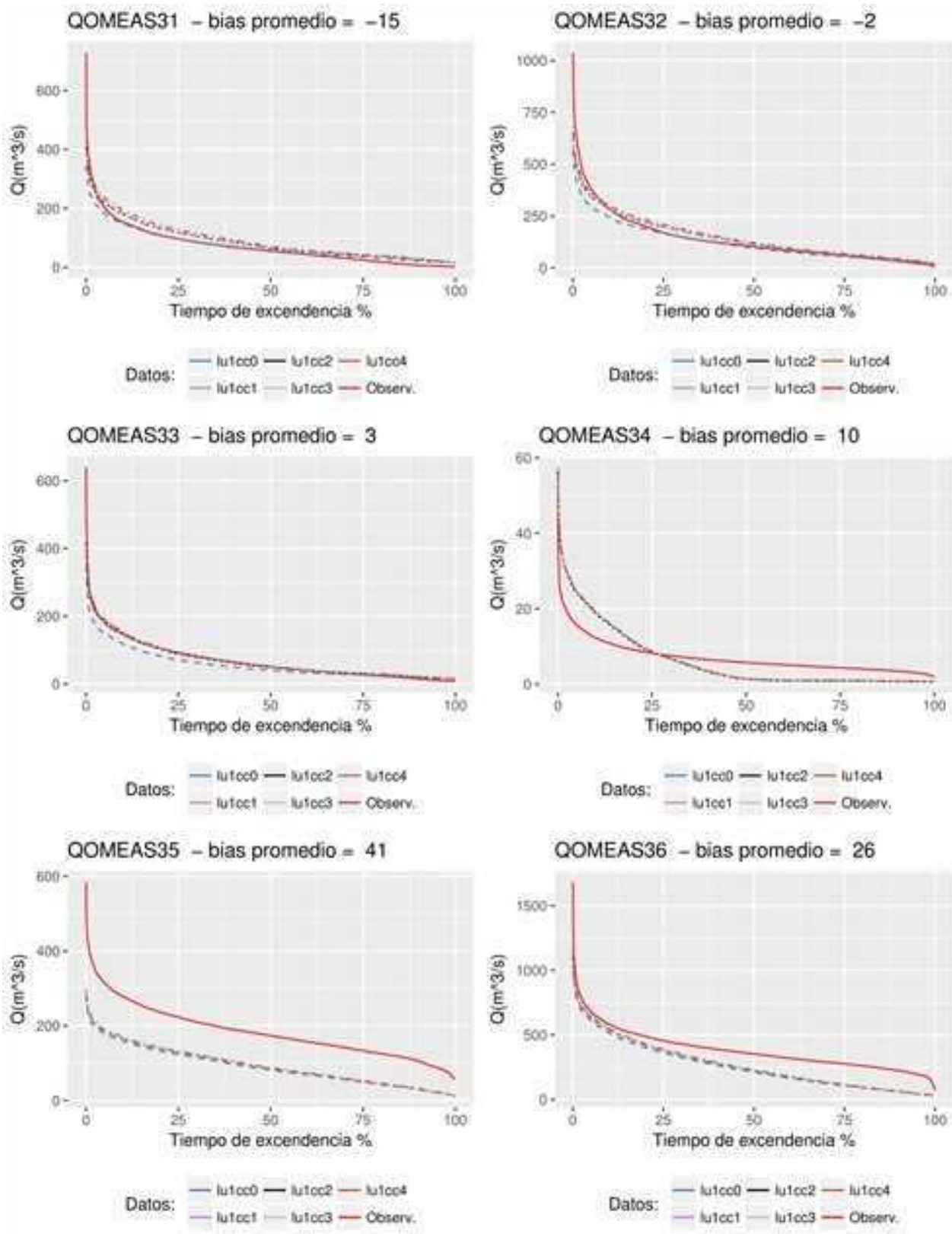


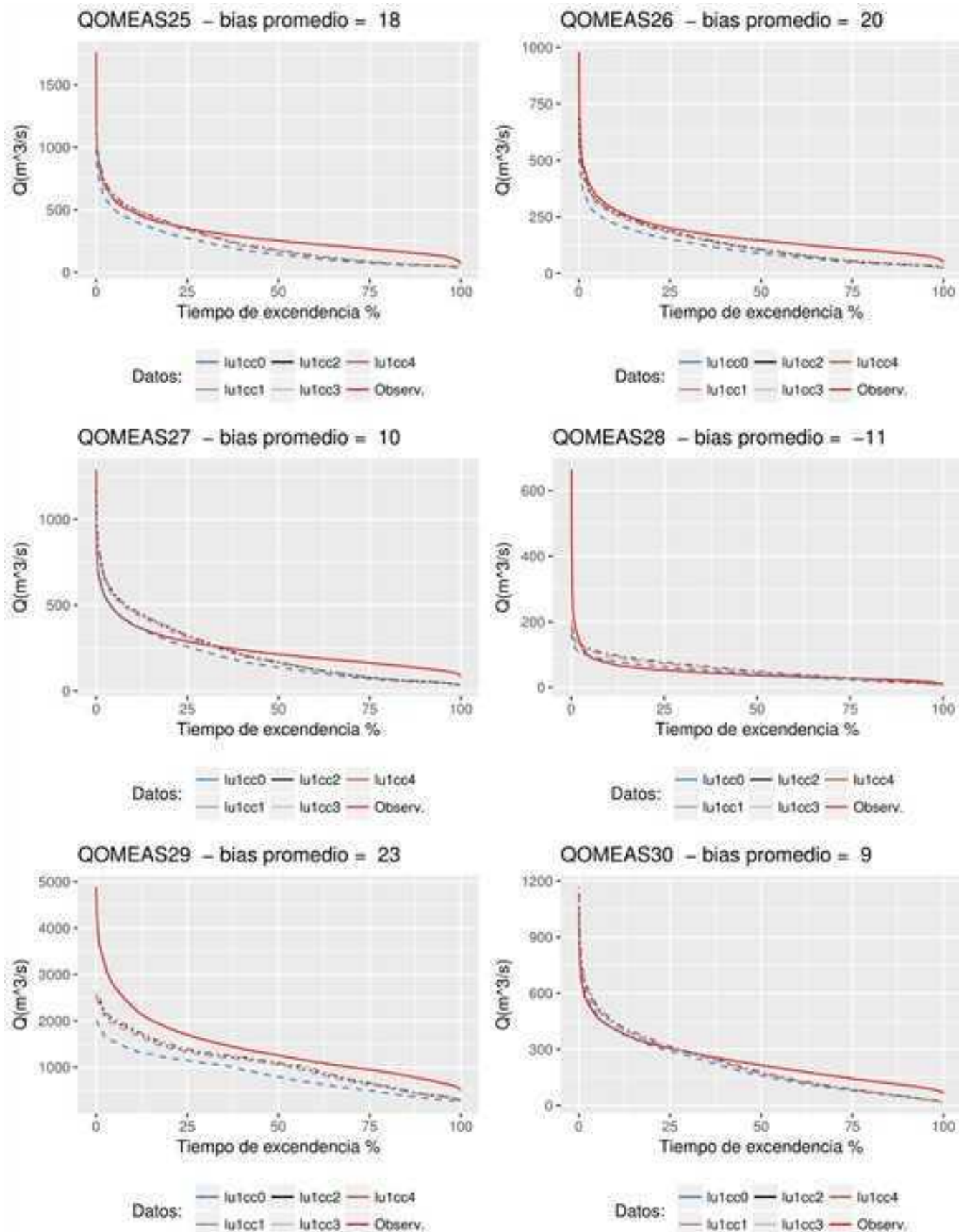


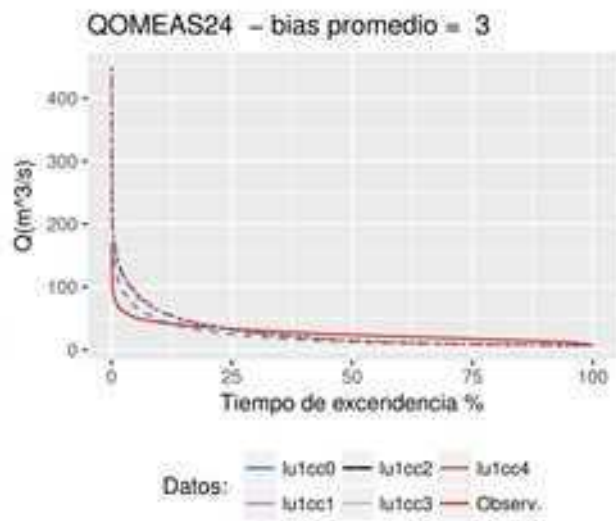
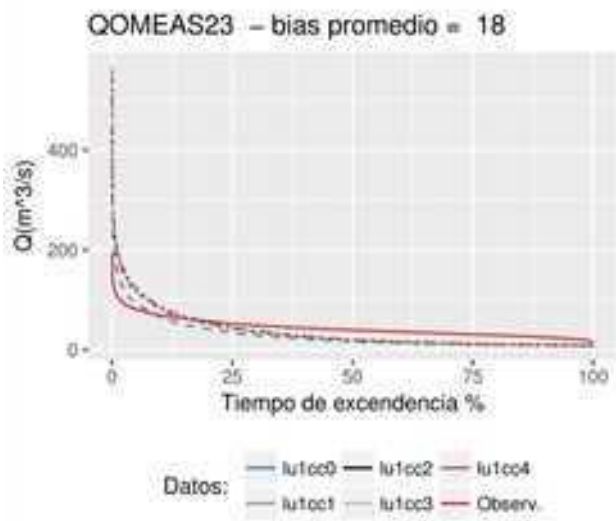
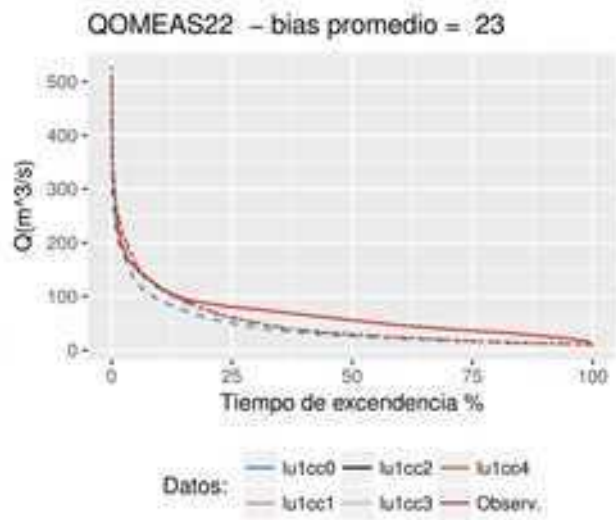
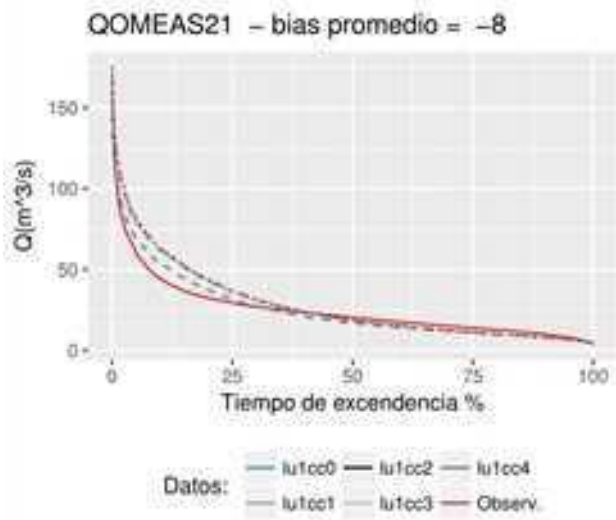
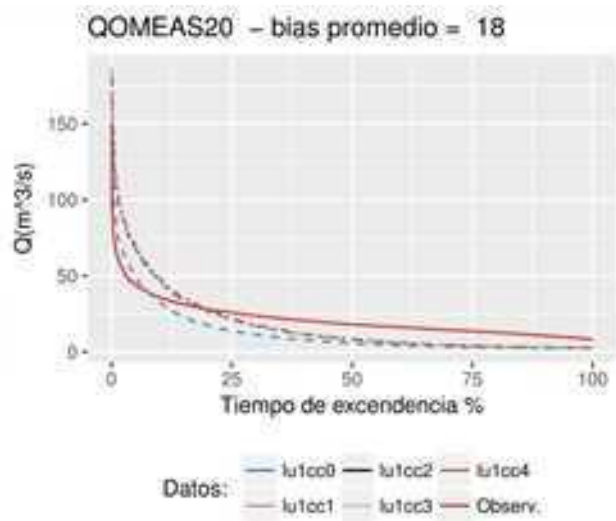
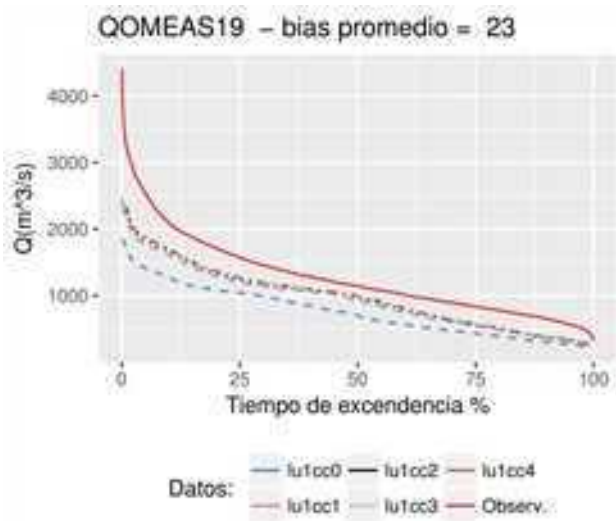


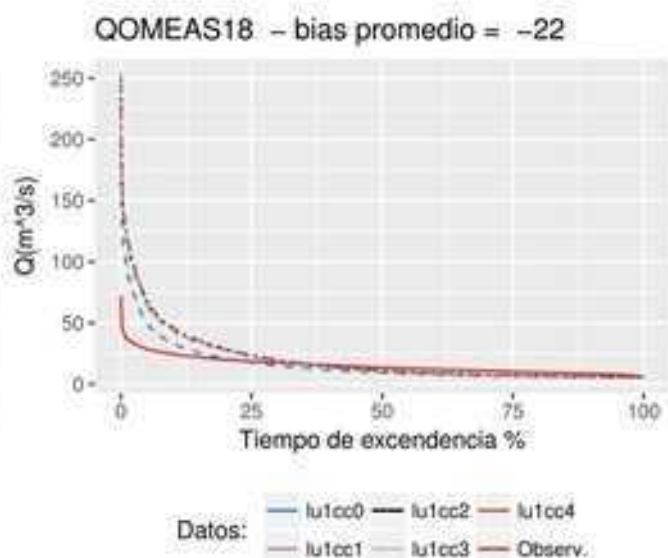
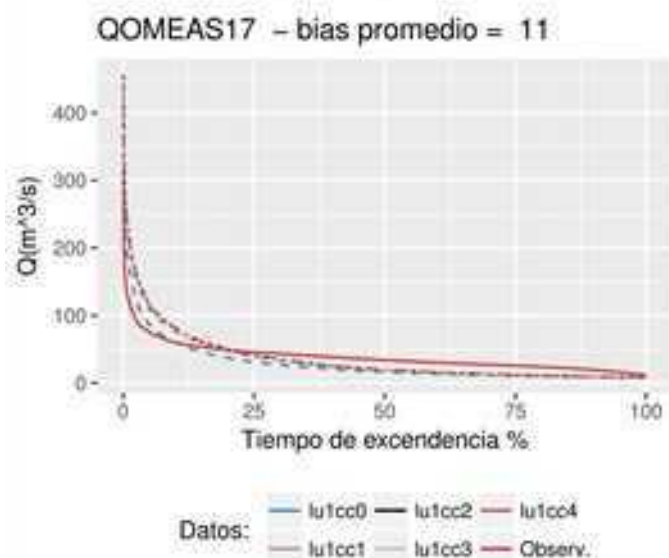
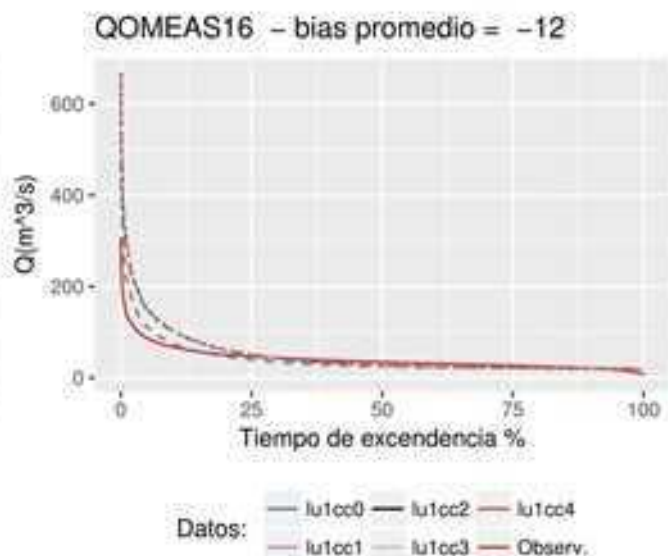
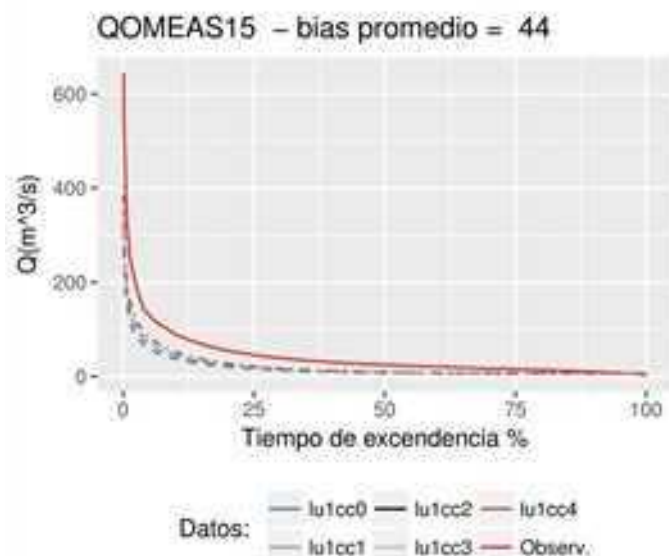
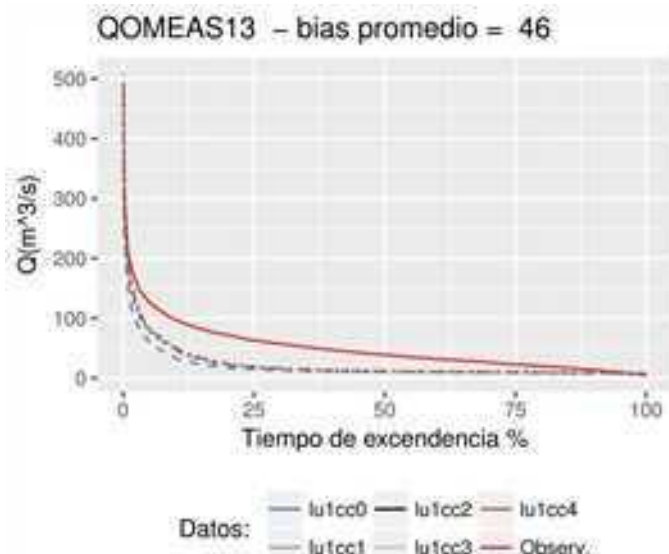


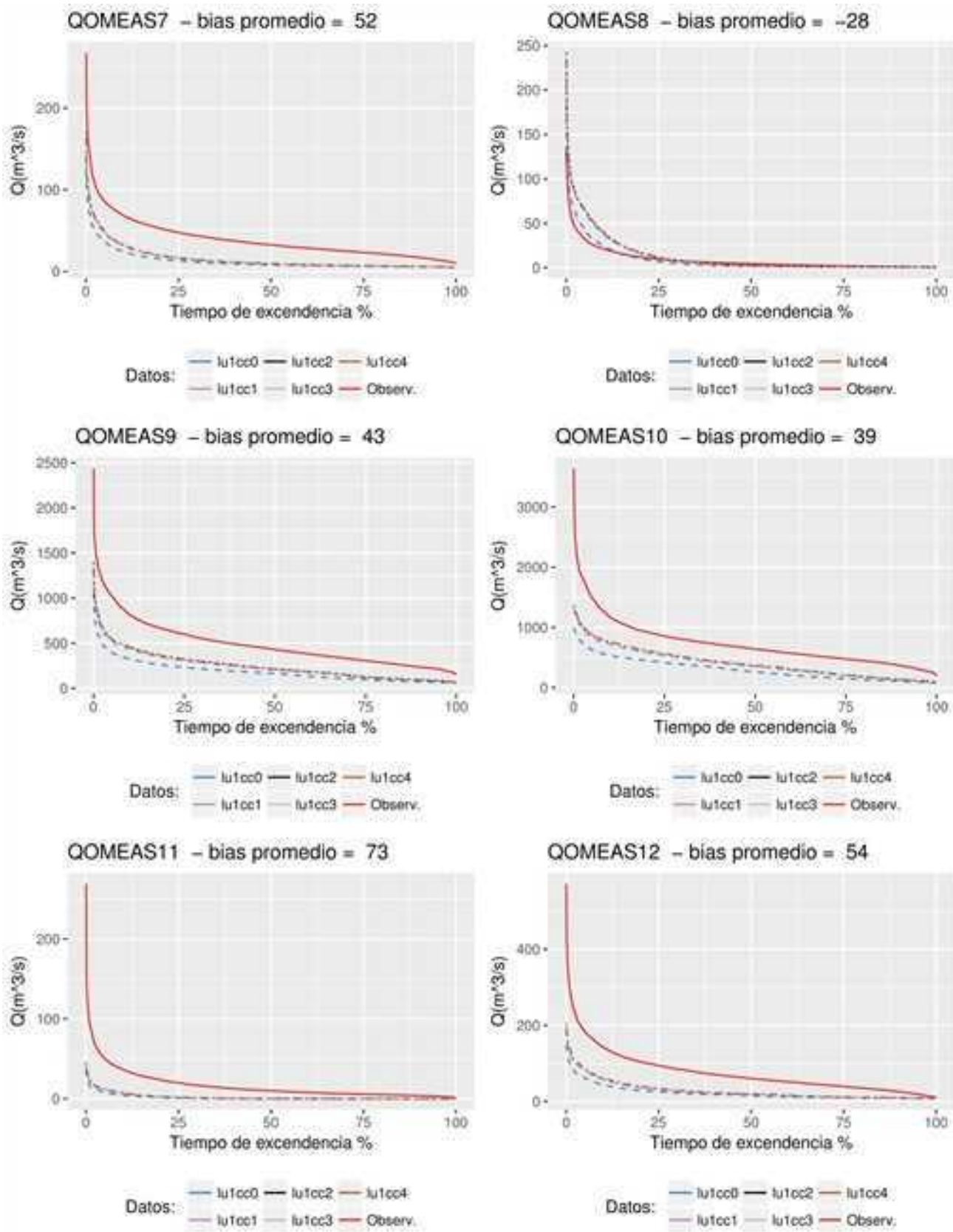


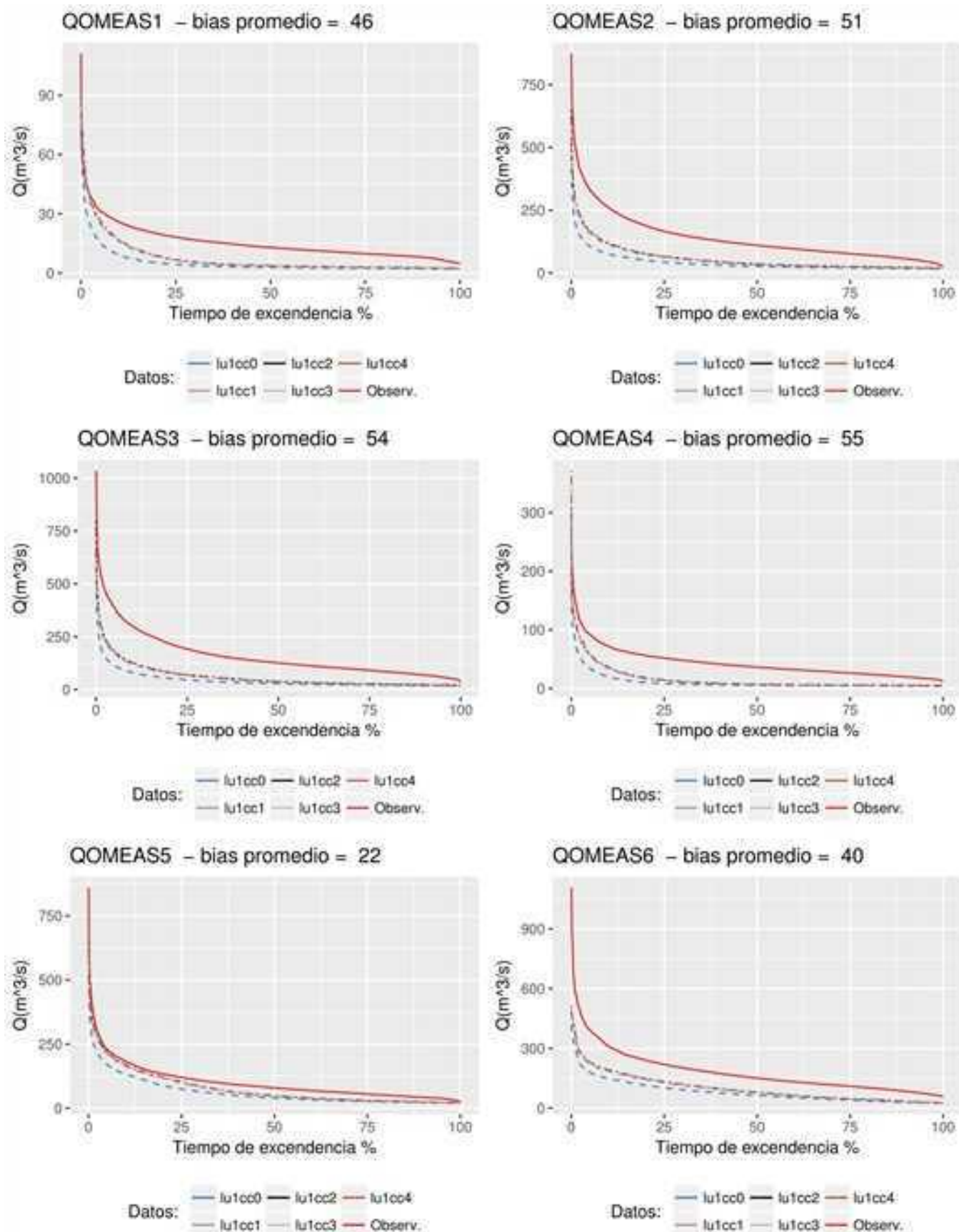












H. Análisis de sensibilidad paramétrica sobre modelo del río Coello: aproximación con nueva metodología para GLUE utilizando DDS como algoritmo de búsqueda

Se realizó un muestreo utilizando el algoritmo de búsqueda DDS con multiarranque (Tolson and Shoemaker 2008b), con el fin de realizar un análisis de sensibilidad basado en la metodología de sensibilidad regional (*Regional Sensitivity Analysis*, RSA) (Hornberger and Spear 1981; Freer et al. 1996).

El periodo de tiempo escogido fue de 1995 a 2005. En total se obtuvieron 10680 conjuntos de parámetros repartidos en 60 campañas de DDS. El software escogido para analizar este conjunto de datos fue MCAT, de amplio conocimiento en modelación hidrológica (Wagener et al. 2001).

El modelo escogido para el análisis fue el de 4 GRU de la Cuenca del Río Coello. En total, se incluyeron 39 parámetros dentro del proceso de muestreo. Se utilizó la métrica NSE (Nash Sutcliff Efficiency) como función objetivo de la métrica

Los resultados, que se muestran abajo (ver Anexo H - 1 y Anexo H - 2 para gráficas de sensibilidad con RSA, y Anexo H - 3 y Anexo H - 4 para comparación de valores del NSE contra valores paramétricos), muestran alta sensibilidad de los parámetros relacionados a la cobertura vegetal. Especialmente sensible es el índice de área foliar (Ia), que presenta un curioso escalón en la gráfica de rendimiento, a partir de un valor del índice de 13. Esto es coherente con el control fisiológico del flujo de calor latente que expone la bibliografía sobre el tema. La longitud de rugosidad (Lanzo) también presenta una alta sensibilidad.

En cuanto a la profundidad de raíces (Root), este parámetro presenta una sensibilidad baja, y no parece ser tan importante en el rendimiento del modelo.

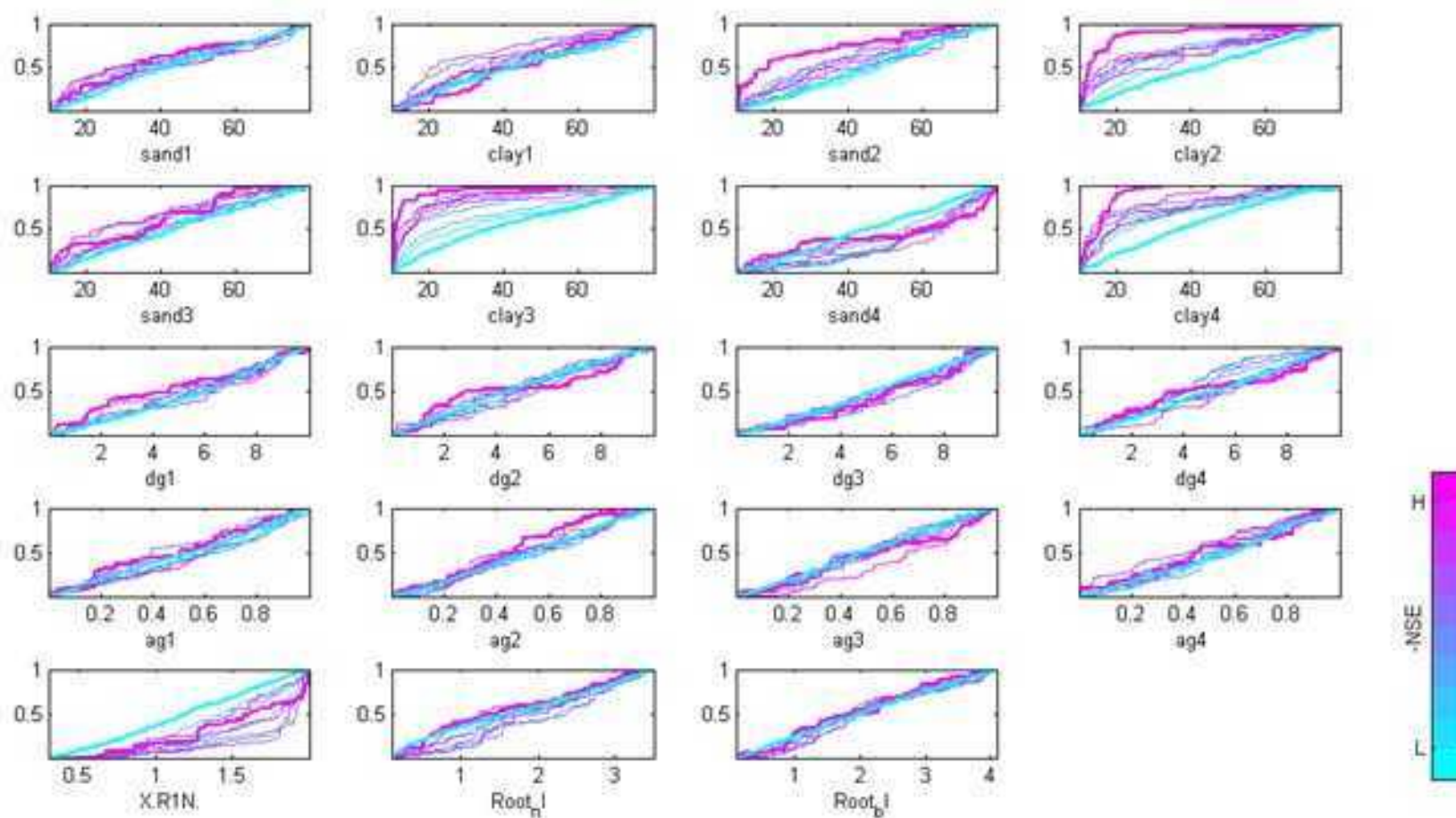
Otros parámetros que se presentan como sensibles son la pendiente del GRU (xslope), y la conductividad saturada superficial (Ks). En cuanto al módulo de tránsito, el parámetro de rugosidad del canal (X.R1N) también presenta alguna sensibilidad, aunque parece ser menor.

Por otro lado, los parámetros de textura del suelo presentan sensibilidad para el porcentaje de arcilla (CLAY), pero no así para el porcentaje de arena (SAND). En cuanto a los parámetros del módulo de flujo base (ag y dg), estos no presentan sensibilidad en los resultados del modelo.

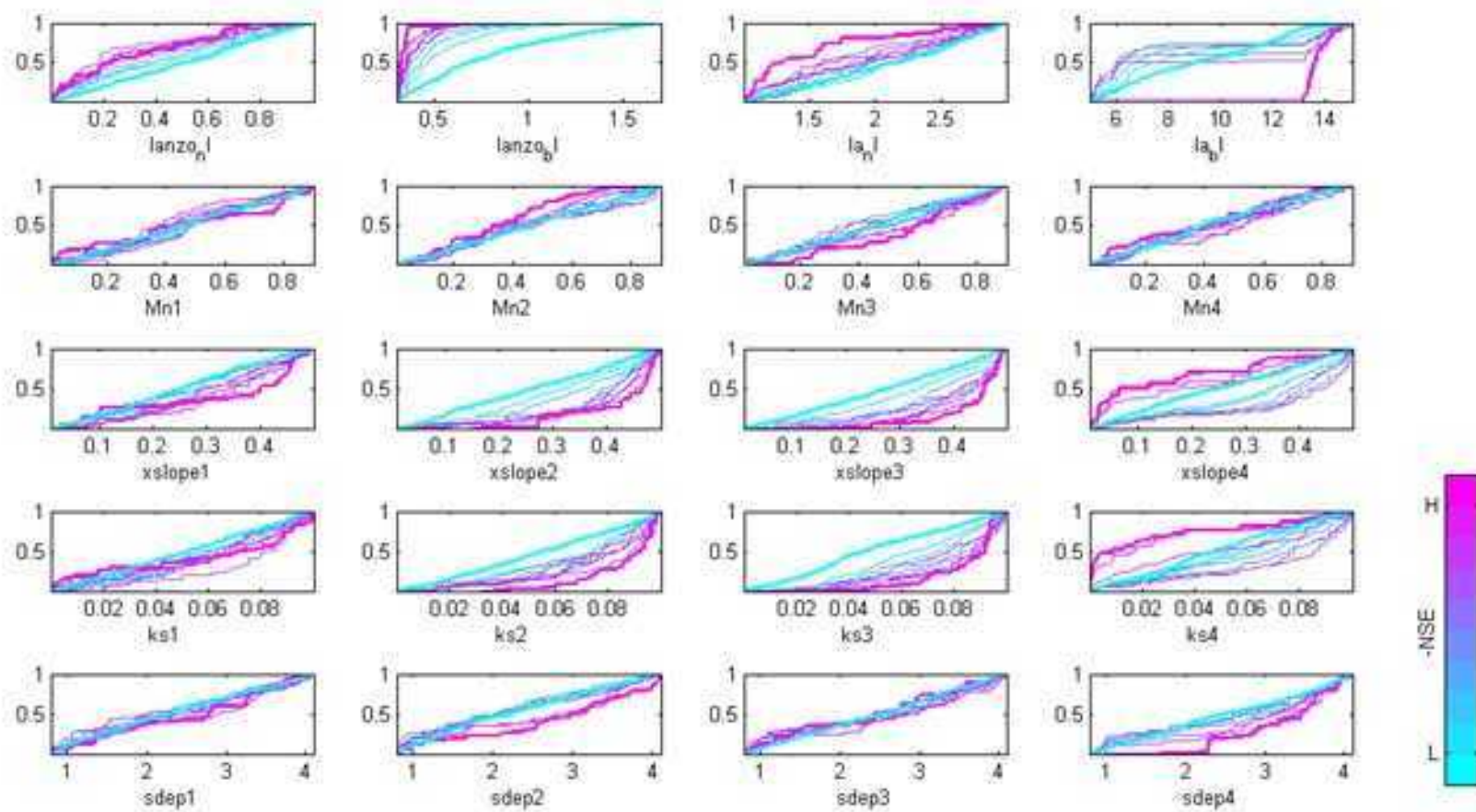
Los parámetros de rugosidad superficial de Manning (Mn) y de profundidad de la columna permeable de suelo (Sdep) presentan sensibilidades también bajas

Estos resultados podrían estar indicando que es posible mejorar los problemas de los caudales bajos, utilizando una manipulación más fina de los valores paramétricos. Esto puede lograrse con una calibración más extensa, por ejemplo, asociando rangos de valores para los albedos y las resistencias de estomas de la cobertura vegetal, y utilizando el módulo de flujo base simple que ya ha sido incluido en la estructura del modelo.

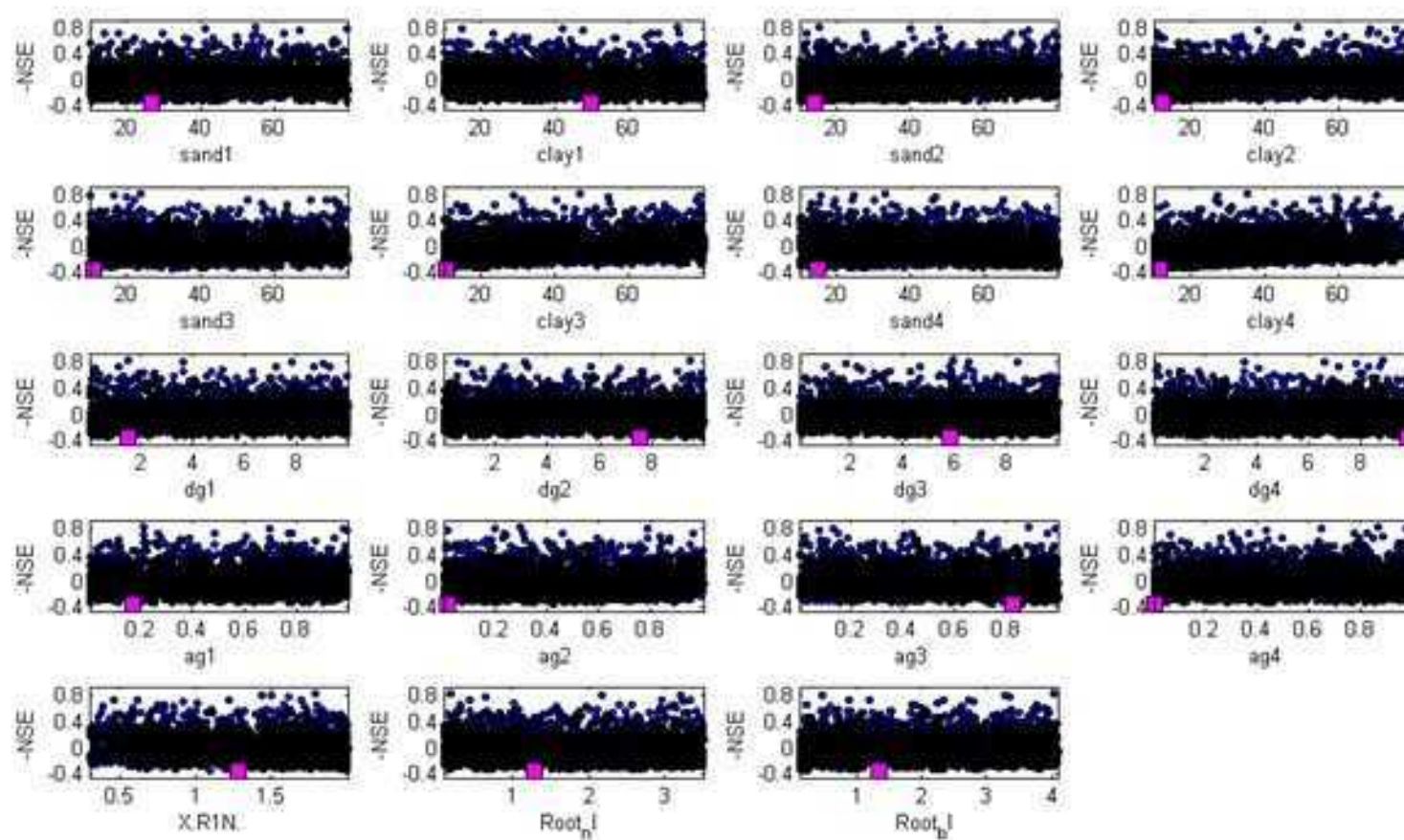
Estos resultados son preliminares, pero pueden ayudar a superar algunas de las simplificaciones del modelo que permita mejorar aún más el rendimiento del modelo.



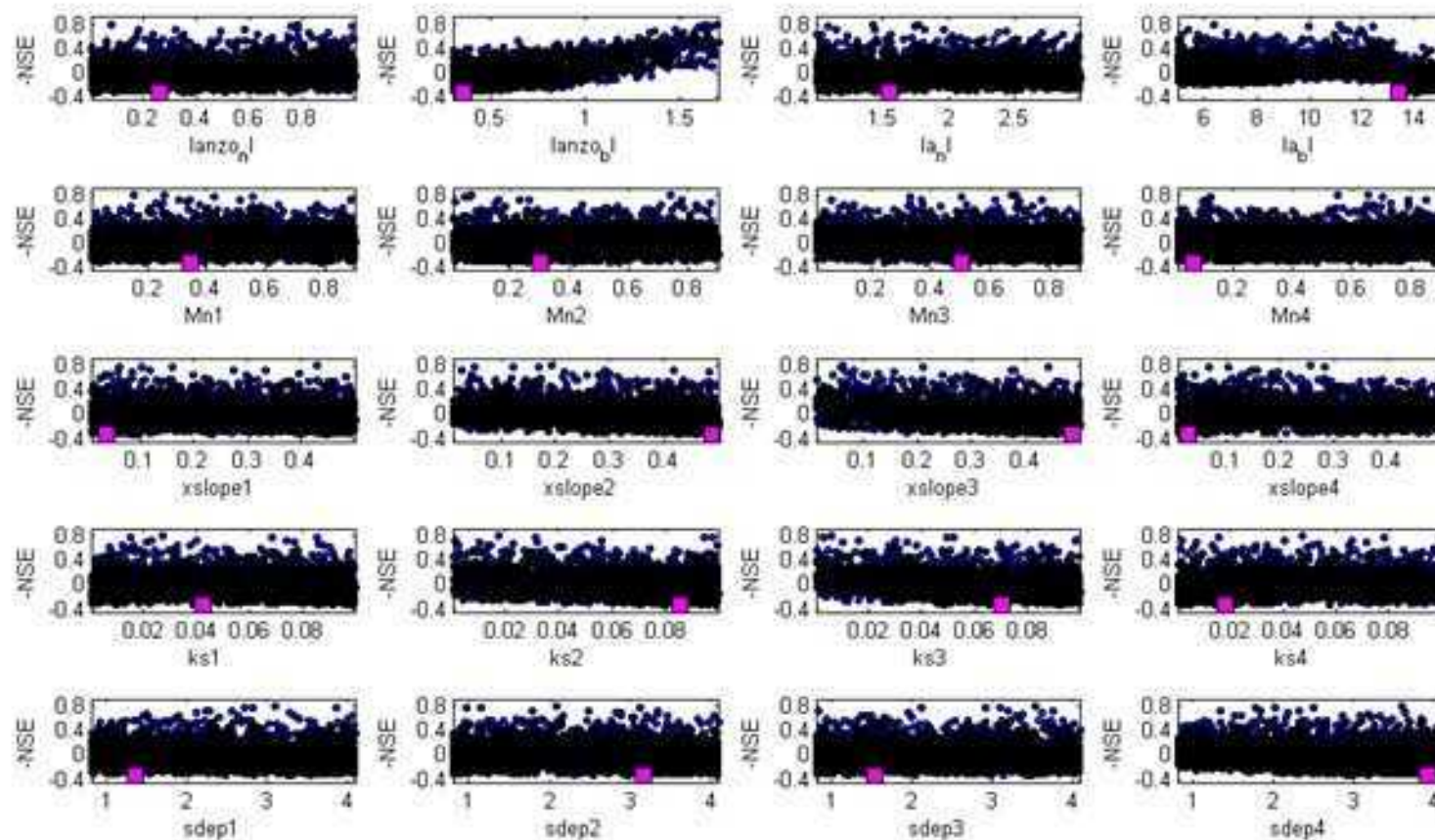
Anexo H - 1 Análisis con RSA para parámetros de textura del suelo, flujo base, y profundidad de las raíces



Anexo H - 2 Análisis con RSA para longitud de rugosidad, área foliar, y parámetros de flujo superficial e interflujo



Anexo H - 3. Gráfica de valor de NSE contra valor paramétrico de parámetros de textura del suelo, flujo base, y profundidad de las raíces



Anexo H - 4. Gráfica de valor de NSE contra valor paramétrico de longitud de rugosidad, área foliar, y parámetros de flujo superficial e interflujo

Bibliografía

- Akkermans T, Lauwaet D, Demuzere M, et al (2012) Validation and comparison of two soil-vegetation-atmosphere transfer models for tropical Africa. *J Geophys Res Biogeosciences* 117:n/a-n/a. doi: 10.1029/2011JG001802
- Allen G. R, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Alvarenga LA, de Mello CR, Colombo A, et al (2016) Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. *CATENA* 143:7–17. doi: 10.1016/j.catena.2016.04.001
- Angarita H, Delgado J, Escobar-Arias MI, Walschburger T (2013) Escenarios de alteración regional del régimen hidrológico en la Cuenca Magdalena Cauca por intensificación de la demanda para hidroenergía.
- Angarita H, Wickel AJ, Sieber J, et al (2017) Large-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 1–39. doi: 10.5194/hess-2017-544
- Ardoin-Bardin S, Dezetter A, Servat E, et al (2009) Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrol Sci J* 54:77–89. doi: 10.1623/hysj.54.1.77
- Asadzadeh M, Tolson B (2013) Pareto archived dynamically dimensioned search with hypervolume-based selection for multi-objective optimization. *Eng Optim* 45:1489–1509. doi: 10.1080/0305215X.2012.748046
- Balsamo G, Pappenberger F, Dutra E, et al (2011) A revised land hydrology in the ECMWF model: A step towards daily water flux prediction in a fully-closed water cycle. *Hydrol Process* 25:1046–1054. doi: 10.1002/hyp.7808
- Beck HE, Van Dijk AIJM, Levizzani V, et al (2017) MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:589–615. doi: 10.5194/hess-21-589-2017
- Beven KJ (2012) Rainfall-runoff modelling: the primer.
- Bilbao J, de Miguel AH (2007) Estimation of daylight downward longwave atmospheric

- irradiance under clear-sky and all-sky conditions. *J Appl Meteorol Climatol* 46:878–889. doi: 10.1175/JAM2503.1
- Caballero Y, Chevallier P, Boone A, et al (2007) Calibration of the Interaction Soil Biosphere Atmosphere land-surface scheme on a small tropical high-mountain basin (Cordillera Real, Bolivia). *Water Resour Res*. doi: 10.1029/2005WR004490
- Caballero Y, Chevallier P, Gallaire R, Pillco R (2004) Flow modelling in a high mountain valley equipped with hydropower plants: Rio Zongo Valley, Cordillera Real, Bolivia. *Hydrol Process* 18:939–957. doi: 10.1002/hyp.1339
- Canadian Hydraulics Centre, National Research Council, Water Survey Canada, Environment Canada (2010) Green Kenue Reference Manual. 360.
- Cárdenas MF, Tobón C, Buytaert W (2017) Contribution of occult precipitation to the water balance of páramo ecosystems in the Colombian Andes. *Hydrol Process* 31:4440–4449. doi: 10.1002/hyp.11374
- Chow V, Maidment D, Mays L (1994) *Hidrología aplicada*.
- Clark MP, Fan Y, Lawrence DM, et al (2015a) Improving the representation of hydrological processes in Earth System Models. *Water Resour Res* 1–28. doi: 10.1002/2015WR017096. Received
- Clark MP, Nijssen B, Lundquist JD, et al (2015b) A unified approach for process-based hydrologic modeling: 2. Model implementation and case studies. *Water Resour Res* 4592–4622. doi: 10.1002/2015WR017198.A
- Clark MP, Nijssen B, Lundquist JD, et al (2015c) A unified approach for process-based hydrologic modeling: 1. Modeling concept. *Water Resour Res* 51:1–17. doi: 10.1002/2015WR017200.A
- Cormagdalena, IDEAM (2001) Estudio Ambiental de la Cuenca Magdalena-Cauca y elementos para su ordenamiento territorial. Resumen ejecutivo. Bogotá D.C., Colombia
- Cruz-Roa AF, Olaya-Marín EJ, Barrios MI (2017) Ground and satellite based assessment of meteorological droughts: The Coello river basin case study. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 62:114–121. doi: 10.1016/j.jag.2017.06.005
- Davison B, Pietroniro A, Fortin V, et al (2016) What is Missing from the Prescription of Hydrology for Land Surface Schemes? *J Hydrometeorol* 17:2013–2039. doi: 10.1175/JHM-D-15-0172.1
- Decharme B (2007) Influence of runoff parameterization on continental hydrology: Comparison between the Noah and the ISBA land surface models. *J Geophys Res*

- 112:D19108. doi: 10.1029/2007JD008463
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, et al (2011) The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc* 137:553–597. doi: 10.1002/qj.828
- Díaz-Granados M, Camacho LA, Maestre A (2001) Modelación de balances hídricos de cienagas fluviales y costeras colombianas. *Rev Ing* 13:5–13.
- Díaz-Granados M, Navarrete JD, Suárez T (2005) Páramos: Hidrosistemas sensibles. *Rev Ing* 22:64–75.
- Díaz-Nieto J, Wilby RL (2005) A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Clim Change* 69:245–268. doi: 10.1007/s10584-005-1157-6
- Döll P, Berkhoff K, Bormann H, et al (2008) Advances and visions in large-scale hydrological modelling: findings from the 11th Workshop on Large-Scale Hydrological Modelling. *Adv Geosci* 18:51–61.
- Döll P, Douville H, Güntner A, et al (2016) Modelling Freshwater Resources at the Global Scale: Challenges and Prospects. *Surv Geophys* 37:195–221. doi: 10.1007/s10712-015-9343-1
- Freer J, Beven K, Ambroise B (1996) Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. *Water Resour Res* 32:2161–2173. doi: 10.1029/96WR03723
- Gascoin S (2009) Etude des paramétrisations hydrologiques d ' un modèle de surface continentale : importance des aquifères et des premiers centimètres du sol. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI
- Giuntoli I, Vidal J-P, Prudhomme C, Hannah DM (2015) Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth Syst Dyn* 6:267–285. doi: 10.5194/esd-6-267-2015
- González JJ, Etter AA, Sarmiento AH, et al (2011) Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia. IDEAM, Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Fundación Natura, Bogotá D.C., Colombia
- Gottschalk L, Beldring S, Engeland K, et al (2001) Regional/macroscale hydrological modelling: a Scandinavian experience. *Hydrol Sci J* 46:963–982. doi: 10.1080/02626660109492889
- Gudmundsson L, Tallaksen LM, Stahl K, et al (2012a) Comparing Large-Scale Hydrological Model Simulations to Observed Runoff Percentiles in Europe. *J Hydrometeorol*

13:604–620. doi: 10.1175/JHM-D-11-083.1

Gudmundsson L, Wagener T, Tallaksen LM, Engeland K (2012b) Evaluation of nine large-scale hydrological models with respect to the seasonal runoff climatology in Europe. *Water Resour Res*. doi: 10.1029/2011WR010911

Guzmán MO, Baldión J V., Simbaqueva FO, et al (2013) Coeficientes para Estimar la Radiación Solar Global A partir del Brillo Solar en la Zona Cafetera Colombiana. *Cenicafé* 64:60–76.

Haddeland I, Clark DB, Franssen W, et al (2011) Multimodel Estimate of the Global Terrestrial Water Balance: Setup and First Results. *J Hydrometeorol* 12:869–884. doi: 10.1175/2011JHM1324.1

Haghnegahdar A, Razavi S, Yassin F, Wheeler H (2017) Multi-criteria sensitivity analysis as a diagnostic tool for understanding model behavior and characterizing model uncertainty. *Hydrol Process* 1–15. doi: 10.1002/hyp.11358

Haghnegahdar A, Tolson BA, Craig JR, Paya KT (2015) Assessing the performance of a semi-distributed hydrological model under various watershed discretization schemes. *Hydrol Process* 29:4018–4031. doi: 10.1002/hyp.10550

Haghnegahdar A, Tolson BA, Davison B, et al (2014) Calibrating environment Canada's MESH modelling system over the Great Lakes Basin. *Atmos - Ocean* 52:281–293. doi: 10.1080/07055900.2014.939131

Hornberger GM, Spear RC (1981) An Approach to the Preliminary Analysis of Environmental Systems. *J Environ Manag* 12:7–18.

Horton RE (1945) Erosional development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bull Geol Soc Am* 56:275–370.

Hoyos N, Escobar J, Restrepo JC, et al (2013) Impact of the 2010-2011 La Niña phenomenon in Colombia, South America: The human toll of an extreme weather event. *Appl Geogr* 39:16–25. doi: 10.1016/j.apgeog.2012.11.018

IDEAM (2013) Mapa de Zonificación Hidrográfica.

IDEAM (2015) Escenarios de Cambio climático para la precipitación y temperatura en Colombia - Estudio Técnico Completo: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

IDEAM (2014) Estudio Nacional del agua 2014. Bogotá D.C., Colombia

IDEAM, IGAC, Cormagdalena (2008) Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca: Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia a escala 1:100.000. Bogotá D.C., Colombia

- IGAC (2003) Soil types map, scale 1:500.000. 1.
- IGAC (2014a) Reservoirs map, scale 1:100.000.
- IGAC (2014b) Drainage network map, scale 1:100.000.
- IGAC (2014c) Wetland maps, scale 1:100.000.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, First Edit. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA
- Jaramillo-Robledo Á, Arcila-Pulgarín J, Montoya-Restrepo EC, Quiroga-Zea F (2006) La radiación solar; consideraciones para su estudio en las plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Meteorol Colomb* 10:12–22.
- Jarvis A, Reuter HI, Nelson A, Guevara E (2008) Hole-filled seamless SRTM data V4.
- Jiao Y, Lei H, Yang D, et al (2017) Impact of vegetation dynamics on hydrological processes in a semi-arid basin by using a land surface-hydrology coupled model. *J Hydrol* 551:116–131. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.060
- Kauffeldt A, Wetterhall F, Pappenberger F, et al (2016) Technical review of large-scale hydrological models for implementation in operational flood forecasting schemes on continental level. *Environ. Model. Softw.*
- Kaune A, Werner M, Rodríguez E, et al (2017) A novel tool to assess available hydrological information and the occurrence of sub-optimal water allocation decisions in large irrigation districts. *Agric Water Manag* 191:229–238. doi: 10.1016/j.agwat.2017.06.013
- Kite GW, Pietroniro A (1996) Remote sensing applications in hydrological modelling. *Hydrol Sci J* 41:563–591. doi: 10.1080/02626669609491526
- Kouwen N (2017) WATFLOOD TM / CHARM Canadian Hydrological And Routing Model. 285.
- Kouwen N (1988) WATFLOOD: a Micro-Computer Based Flood Forecasting System Based on Real-Time Weather Radar. *Can Water Resour J* 13:62–77. doi: 10.4296/cwrj1301062
- Larsen MAD, Refsgaard JC, Jensen KH, et al (2016) Calibration of a distributed hydrology and land surface model using energy flux measurements. *Agric For Meteorol* 217:74–88. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.11.012
- Li KY, Coe MT, Ramankutty N (2005) Investigation of hydrological variability in West Africa using land surface models. *J Clim* 18:3173–3188. doi: 10.1175/JCLI3452.1
- López PL, Sutanudjaja EH, Schellekens J, et al (2017) Calibration of a large-scale hydrological model using satellite-based soil moisture and evapotranspiration

- products. Hydrol Earth Syst Sci 21:3125–3144. doi: 10.5194/hess-21-3125-2017
- Luo Y, Arnold J, Allen P, Chen X (2012) Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. Hydrol Earth Syst Sci 16:1259–1267. doi: 10.5194/hess-16-1259-2012
- Maclean AJ (2009) Calibration and Analysis of the MESH Hydrological Model applied to Cold Regions. University of Waterloo
- Maclean AJ, Tolson BA, Seglenieks FR, Soulis E (2010) Multiobjective calibration of the MESH hydrological model on the Reynolds Creek Experimental Watershed. Hydrol Earth Syst Sci Discuss 7:2121–2155.
- Martinez R, Euscategui C, Jaimes E, Leon Aristizabal GE (2011) [Regional climates] Northern South America and Tropical Andes. In: Blunden J, Arndt DS, Baringer MO (eds) State of the Climate in 2010. Bulletin of the American Meteorological Society, pp 186–187
- Matott LS (2008) OSTRICH: An Optimization Software Tool; Documentation and User's Guide. OSTRICH Doc. User Guid. 1–77.
- Mekonnen MA, Soulis R, Fortin V, et al (2012) WATDRN: Enhanced Hydrology for CLASS. 1–19.
- Méndez W, Pacheco H, Cartaya S, et al (2015) Caracterización hidroclimatológica y morfométrica de la cuenca del río San Julián (estado Vargas , Venezuela): aportes para la evaluación de la amenaza hidrogeomorfológica. Cuad Geogr - Rev Colomb Geogr 24:133–156. doi: dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50213
- Mendoza PA, Mizukami N, Ikeda K, et al (2016) Effects of different regional climate model resolution and forcing scales on projected hydrologic changes. J Hydrol. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.08.010
- Mizukami N, Clark MP, Newman AJ, et al (2017) Towards seamless large-domain parameter estimation for hydrologic models. Water Resour Res 53:8020–8040. doi: 10.1002/2017WR020401
- Moene AF, Dam JC van (2014) Transport in the Atmosphere-Vegetation-Soil Continuum, First Edit. Cambridge University Press, New York
- Mogollón LAG (2017) Dinámica espacio temporal del almacenamiento de agua en el suelo en el Norte de Suramérica. Universidad Nacional de Colombia
- Moreno J, Cardenas E, González F, et al (2014) Stream classification and assessment of hydrologic alterations towards an environmental flow appraisal of the Magdalena-Cauca river basin (Colombia). In: 10th ISE 2014. p 4

- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, et al (2007) Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans ASABE* 50:885–900. doi: 10.13031/2013.23153
- Mulligan M (2013) WaterWorld: a self-parameterising, physically based model for application in data-poor but problem-rich environments globally. *Hydrol Res* 44:748. doi: 10.2166/nh.2012.217
- Mulligan M (2016) Chapter 3.1 - Computational Policy Support Systems for Understanding Land Degradation Effects on Water and Food Security for and from Africa. In: Chabay I, Frick M, Helgeson J (eds) *Land Restoration*. Academic Press, Boston, pp 211–233
- Nash JE, Sutcliffe J V. (1970) River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Ntegeka V, Baguis P, Roulin E, Willems P (2014) Developing tailored climate change scenarios for hydrological impact assessments. *J Hydrol* 508:307–321. doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.001
- Olchev A, Ibrom A, Priess J, et al (2008) Effects of land-use changes on evapotranspiration of tropical rain forest margin area in Central Sulawesi (Indonesia): Modelling study with a regional SVAT model. *Ecol Modell* 212:131–137. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.10.022
- Orgeval T, Polcher J, Rosnay P De (2008) Sensitivity of the West African hydrological cycle in ORCHIDEE to infiltration processes. *Hydrol Earth Syst Sci* 12:1387–1401.
- Overgaard J, Rosbjerg D, Butts MB (2006) Land-surface modelling in hydrological perspective – a review. *Biogeosciences* 3:229–241. doi: 10.5194/bg-3-229-2006
- Panagopoulos Y, Gassman PW, Jha MK, et al (2015) A refined regional modeling approach for the Corn Belt – Experiences and recommendations for large-scale integrated modeling. *J Hydrol* 524:348–366. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.039
- Pechlivanidis IG, Arheimer B (2015) Large-scale hydrological modelling by using modified PUB recommendations: the India-HYPE case. *Hydrol Earth Syst Sci* 19:4559–4579. doi: 10.5194/hess-19-4559-2015
- Pereira FF, Farinosi F, Arias ME, et al (2017) Technical note: A hydrological routing scheme for the Ecosystem Demography model (ED2+R) tested in the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:4629–4648. doi: 10.5194/hess-21-4629-2017
- Pietroniro A, Fortin V, Kouwen N, et al (2006) Using the MESH modelling system for hydrological ensemble forecasting of the Laurentian Great Lakes at the regional scale.

- Hydrol Earth Syst Sci Discuss 3:2473–2521. doi: 10.5194/hessd-3-2473-2006
- Pietroniro A, Soulis ED, Snelgrove K, Kouwen N (2001) A framework for coupling atmospheric and hydrological models. In: Soil-Vegetation-Atmosphere Schemes and Large-Scale Hydrological Models. pp 27–34
- Port U, Brovkin V, Claussen M (2012) The influence of vegetation dynamics on anthropogenic climate change. *Earth Syst Dyn* 3:233–243. doi: 10.5194/esd-3-233-2012
- Poveda G (2004) La Hidroclimatología De Colombia : Una Síntesis Desde La Escala Inter-Decadal. *Rev académica Colomb Ciencias* 28:201–222.
- Poveda G, Waylen PR, Pulwarty RS (2006) Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol* 234:3–27. doi: 10.1016/j.palaeo.2005.10.031
- Prudhomme C, Reynard N, Crooks S (2002) Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrol Process* 16:1137–1150. doi: 10.1002/hyp.1054
- Ramirez WD, Rodriguez EA, Sanchez JL, et al (2015) Hydrologic Modeling of Principal Sub-Basins of the Magdalena-Cauca Large Basin Using Wflow Model. In: 36th IAHR World Congress. pp 1–10
- Restrepo JD, Escobar HA (2016) Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980-2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.12.013
- Restrepo JD, Escobar R, Tosic M (2016) Fluvial fluxes from the Magdalena River into Cartagena Bay, Caribbean Colombia: Trends, future scenarios, and connections with upstream human impacts. *Geomorphology* 195:1–15. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.11.007
- Restrepo JD, Kettner AJ, Syvitski JPM (2015) Recent deforestation causes rapid increase in river sediment load in the Colombian Andes. *Anthropocene* 10:13–28. doi: 10.1016/j.ancene.2015.09.001
- Restrepo JD, Zapata P, Díaz JM, et al (2006) Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Glob Planet Change* 50:33–49. doi: 10.1016/j.gloplacha.2005.09.002
- Reymondin L, Jarvis A, Perez-uribe A, et al (2010) A methodology for near real-time monitoring of habitat change at continental scales using MODIS-NDVI and TRMM.
- Ridler ME, Sandholt I, Butts M, et al (2012) Calibrating a soil-vegetation-atmosphere

- transfer model with remote sensing estimates of surface temperature and soil surface moisture in a semi arid environment. *J Hydrol* 436–437:1–12. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.047
- Rodriguez EA, Sánchez IC, Duque N, et al Combined use of local and global hydrometeorological data with hydrological models for water resources management in the Magdalena - Cauca macrobasin - Colombia.
- Rodríguez EA, Werner M, Sánchez I, et al (2016) El proyecto EARTH2OBSERVE y su caso de estudio en la macrocuenca Magdalena-Cauda. In: XXVII Congreso Latinoamericano De Hidráulica. p 11
- Rodriguez E, Sanchez I, Duque N, et al (2017) Combined use of local and global hydrometeorological data with regional and global hydrological models in the Magdalena - Cauca river basin , Colombia. In: EGU General Assembly. EGU, Viena, Austria,
- Safeeq M, Mauger GS, Grant GE, et al (2014) Comparing Large-Scale Hydrological Model Predictions with Observed Streamflow in the Pacific Northwest: Effects of Climate and Groundwater*. *J Hydrometeorol* 15:2501–2521. doi: 10.1175/JHM-D-13-0198.1
- Sánchez IC (2014) Evaluación del desempeño del esquema ISBA en la cuenca del río La Vieja-departamentos de Valle del Cauca, Risaralda y Quindío (Colombia). Universidad Nacional de Colombia
- Sato H, Ito A, Ito A, et al (2015) Current status and future of land surface models. *Soil Sci Plant Nutr* 61:34–47. doi: 10.1080/00380768.2014.917593
- Schellekens J, Dutra E, Martínez-De La Torre A, et al (2017) A global water resources ensemble of hydrological models: The earth2Observe Tier-1 dataset. *Earth Syst Sci Data* 9:389–413. doi: 10.5194/essd-9-389-2017
- Silberstein RP (2006) Hydrological models are so good, do we still need data? *Environ Model Softw* 21:1340–1352. doi: 10.1016/j.envsoft.2005.04.019
- Snyder PK, Delire C, Foley JA (2004) Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Clim Dyn* 23:279–302. doi: 10.1007/s00382-004-0430-0
- Song X, Zhan C, Kong F, Xia J (2011) Advances in the study of uncertainty quantification of large-scale hydrological modeling system. *J Geogr Sci* 21:801–819. doi: 10.1007/s11442-011-0881-2
- Song X, Zhang J, Zhan C, et al (2015) Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *J Hydrol*

- 523:739–757. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.013
- Sood A, Smakhtin V (2015) Global hydrological models: a review. *Hydrol Sci J*. doi: 10.1080/02626667.2014.950580
- Soulis ED, Snelgrove KR, Kouwen N, et al (2000) Towards closing the vertical water balance in Canadian atmospheric models: Coupling of the land surface scheme class with the distributed hydrological model watflood. *Atmos - Ocean* 38:251–269. doi: 10.1080/07055900.2000.9649648
- Tolson BA, Shoemaker CA (2007) Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resour Res* 43:1–16. doi: 10.1029/2005WR004723
- Tolson BA, Shoemaker CA (2008a) Reply to comment on “Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration” by Ali Behrangi et al. *Water Resour Res* 44:2–5. doi: 10.1029/2008WR006862
- Tolson BA, Shoemaker CA (2008b) Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. *Water Resour Res* 44:1–19. doi: 10.1029/2007WR005869
- Tung Y (1985) River Flood Routing by Nonlinear Muskingum Method. *J Hydraul Eng* 111:1447–1460. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:12(1447)
- University of Saskatchewan (2017) MESH - A Community Hydrology - Land Surface Model.
- Verseghy DL (2012) Class – the canadian land surface scheme (version 3.6). 179.
- Verseghy DL (2000) The Canadian land surface scheme (CLASS): Its history and future. *Atmos - Ocean* 38:1–13. doi: 10.1080/07055900.2000.9649637
- Vormoor K, Skaugen T (2013) Temporal Disaggregation of Daily Temperature and Precipitation Grid Data for Norway. *J Hydrometeorol* 14:989–999. doi: 10.1175/JHM-D-12-0139.1
- Wagener T, Boyle DP, Lees MJ, et al (2001) A framework for development and application of hydrological models. *Hydrol Earth Syst Sci* 5:13–26. doi: 10.5194/hess-5-13-2001
- Wagner PD, Bhallamudi SM, Narasimhan B, et al (2017) Comparing the effects of dynamic versus static representations of land use change in hydrologic impact assessments. *Environ Model Softw*. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.023
- Wallace JM, Hobbs P V (2006) Atmospheric science, an introductory survey.
- Weedon GP, Balsamo G, Bellouin N, et al (2014) The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim reanalysis data. *Water Resour Res* 50:7505–7514. doi: 10.1002/2014WR015638. Received

- Woldesenbet TA, Elagib NA, Ribbe L, Heinrich J (2017) Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sci Total Environ* 575:724–741. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.09.124
- Xu X, Tolson BA, Li J, et al (2015) Assimilation of SMOS soil moisture over the Great Lakes basin. *Remote Sens Environ* 169:163–175. doi: 10.1016/j.rse.2015.08.017
- Yu Y, Disse M, Yu R, et al (2015) Large-Scale Hydrological Modeling and Decision-Making for Agricultural Water Consumption and Allocation in the Main Stem Tarim River, China. *Water* 7:2821–2839. doi: 10.3390/w7062821
- Zhang Y, Zheng H, Chiew FHS, et al (2016) Evaluating Regional and Global Hydrological Models against Streamflow and Evapotranspiration Measurements. *J Hydrometeorol* 17:995–1010. doi: 10.1175/JHM-D-15-0107.1
- Zhao F, Veldkamp TIE, Frieler K, et al (2017) The critical role of the routing scheme in simulating peak river discharge in global hydrological models. *Environ Res Lett* 12:75003. doi: 10.1088/1748-9326/aa7250
- Zhao W, Li A (2015) A Review on Land Surface Processes Modelling over Complex Terrain. *Adv Meteorol* 2015:1–17. doi: 10.1155/2015/607181
- Zulkafli Z, Buytaert W, Onof C, et al (2013) A critical assessment of the JULES land surface model hydrology for humid tropical environments. *Hydrol Earth Syst Sci* 17:1113–1132. doi: 10.5194/hess-17-1113-2013