

# Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia

Jonathan Romero-Cuéllar, Andres Buitrago-Vargas, Tatiana Quintero-Ruiz & Félix Francés

To cite this article: Jonathan Romero-Cuéllar, Andres Buitrago-Vargas, Tatiana Quintero-Ruiz & Félix Francés (2018) Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia, Ribagua, 5:1, 63-78, DOI: [10.1080/23863781.2018.1454574](https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1454574>



© 2018 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 02 May 2018.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 780



View Crossmark data [↗](#)

## Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia

Jonathan Romero-Cuéllar<sup>a</sup>, Andres Buitrago-Vargas<sup>b</sup>, Tatiana Quintero-Ruiz<sup>b</sup> and Félix Francés<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Valencia – España; <sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana, Huila – Colombia

### RESUMEN

La dinámica de un mundo global y el hombre como nueva fuerza geológica plantean la necesidad de tomar decisiones robustas, diseñar estrategias de manejo y de adaptarse al cambio climático. Este estudio investiga la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica del río Aipe (688.9 km<sup>2</sup>), en Huila, Colombia, en acorde con los escenarios de cambio climático desde 2011 a 2040. El modelo hidrológico abcd de Thomas (4 parámetros) fue calibrado y validado comparando el caudal simulado y lo observado en el punto de cierre de la cuenca (en la estación Puente Carretera), usando series históricas mensuales (1992–2012). Realizamos la evaluación de la sensibilidad e identificabilidad de los parámetros con la herramienta ‘Monte Carlo Analysis Toolbox’ (MCAT). Los resultados muestran que el modelo es capaz de representar adecuadamente los caudales mensuales observados en el punto de desagüe de la cuenca, al encontrarse un índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) de 0,89. Los parámetros más influyentes son **a** (almacenamiento del agua en el suelo) y **c** (aporte al acuífero). Con respecto a la simulación de los escenarios, la línea base (1992–2012) estimó un caudal medio de 15,44 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>; el escenario de extrapolación de tendencias estimó un caudal de 13,79 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–10,64%); el escenario de ensamble multi-modelo de 9,34 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–39,47%) y el escenario A2 de 5,74 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–62,60%). Proponemos una batería de medidas de adaptación al cambio climático que buscan la gestión integral del recurso hídrico.

### Modelling the potential impacts of climate change on the hydrology of the Aipe river basin in Huila, Colombia

#### ABSTRACT

The dynamics of a global world, and humans performing as a new geological force, require that an effort is undertaken to make robust decisions in order to devise strategies for the management and adaptation to climate change. This study aims to investigate the potential impact of climate change on the hydrology of the Aipe river basin in Huila, Colombia. The abcd Thomas model (four parameters) was calibrated and validated for the stream flows of the Aipe catchment (1992–2012). The sensitivity and identifiability of the parameters were evaluated using the Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT). The results show the ability of the model to simulate the monthly stream flow (Nash–Sutcliffe efficiency coefficient of 0,89). The most influential parameters are: **a** (water storage in the soil) and **c** (contribution to the aquifer). From the simulated scenarios, the baseline (1992–2012) was estimated to be an average flow of 15,44 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>; the trend extrapolation scenario estimated a rate 13,79 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–10,64%); while for the multi-model assembly scenario it was 9,34 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–39,47%) and for the A2 scenario it was 5,74 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (–62,60%). Lastly, we propose a set of strategies for adaptation to climate change that are committed to the integral management of water resources.

### PALABRAS CLAVE

Balance hídrico; cambio climático; Colombia; modelo simulado; parámetros; río Aipe; sensibilidad

### KEYWORDS

Aipe river; climate change; Colombia; monthly stream flow; simulation models; sensitivity analysis; water balance

## 1. Introducción

El cambio climático es uno de los principales desafíos del siglo XXI [1]. De acuerdo con el quinto informe (AR5) del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), para finales del siglo XXI se proyecta que en Suramérica habrá un incremento en la temperatura superficial global de +1,7°C a +6,7°C (confianza media). Los cambios en los

patrones de las lluvias varían geográficamente, pero es notable un incremento en los periodos de sequía, y de días y noches más calurosos (confianza media). Cambios en la disponibilidad hídrica se han observado y proyectado; especialmente en la estacionalidad de la oferta hídrica (confianza alta). El riesgo de abastecimiento incrementaría por la reducción en precipitaciones y el incremento de la evapotranspiración de regiones

semiáridas (confianza alta), esto podría desencadenar el desabastecimiento en las ciudades, la generación de energía eléctrica y en la agricultura [2].

Las proyecciones más confiables del cambio climático muestran un incremento en la frecuencia de los eventos extremos [3]. Estas proyecciones pueden generar consecuencias negativas para el desarrollo de la humanidad. Por ejemplo: el aumento de la tasa de pérdida de la biodiversidad (especialmente en zonas de páramos, alta montaña y humedales), los efectos sobre la salud humana como el aumento de vectores de enfermedades (malaria, dengue, fiebre amarilla, etc.), el incremento de los conflictos por el uso del agua y cambios en la producción agropecuaria. De igual forma, los cambios en el uso del suelo contribuyen significativamente a la degradación ambiental, agravando el impacto negativo del cambio climático (deforestación, erosión, difusión de la contaminación y degradación de suelos) [2].

La respuesta al impacto del cambio climático sobre la sociedad requiere de la interacción de diferentes áreas del conocimiento (ambiental, social, político, económico, físico, químico, biología, matemática, ética, etc.). Además, los problemas complejos se deben abordar desde un contexto transdisciplinario. Básicamente, el cambio climático cuestiona nuestro modelo de desarrollo (en términos de emisiones de gases con efecto de invernadero (GEI), la forma de consumirse, el modelo de producción energética, las formas de transporte y la producción de alimentos [4]). Sin embargo, pensar en soluciones al cambio climático es replantear el modelo de desarrollo. En este sentido y dada la complejidad del problema, se requieren esfuerzos enormes a nivel político, científico, técnico y social.

La evaluación del impacto potencial del cambio climático en el ciclo hidrológico es uno de los principales temas de investigación en la comunidad hidrológica [5]. El procedimiento a escala de cuenca hidrográfica consiste en implementar modelos de lluvia-escorrentía forzados con escenarios climáticos regionales re-escalados de modelos de clima global para evaluar el impacto del cambio climático sobre la oferta hídrica [6]. Sin embargo, debido a la complejidad y alta no linealidad de los procesos [7], se presentan muchas fuentes de incertidumbre [8,9]. Por ejemplo, el desconocimiento de las futuras emisiones de GEI [10], la simplificación de los modelos de circulación global [8,6], métodos de re-escalado [11] y la estructura del modelo hidrológico [12,13,14].

En general, Colombia es considerado uno de los países con mayor biodiversidad y oferta hídrica. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología

y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la oferta hídrica del país es seis veces superior a la oferta mundial, y tres veces mayor que la de otros países en Latinoamérica; sin embargo, a pesar de la abundancia hídrica, se presentan problemas de desabastecimiento. En términos generales, los recursos hídricos en Colombia están mal manejados. De la oferta hídrica disponible, un total de 46,6% es empleada para riego de cultivos agrícolas, de la que se desperdicia el 70% por ineficiencias en los sistemas de riego. Por otro lado, del 8,2% dedicado al uso urbano, se estima que el 31,1% se pierde en la distribución. Aparte de los problemas del uso del agua, se presentan serias deficiencias en el tratamiento de las aguas residuales. En Colombia, sólo se trata el 43,5% de las aguas residuales de uso doméstico, y de este porcentaje, muchas plantas se encuentran por debajo de las eficiencias mínimas reglamentadas. Desde el punto de vista ambiental, los resultados son desalentadores. La deforestación en Colombia para el año 2014 aumentó 16% con respecto al año 2013, dejando así 140,356 hectáreas deforestadas. El 48% del suelo colombiano tiene amenaza de desertificación [15].

El departamento del Huila es considerado una región estratégica para el país, por su potencial hídrico. En esta región nace el río Magdalena. En la cuenca del Magdalena vive el 70% de la población del país. El Magdalena es la principal fuente de energía hidroeléctrica; así mismo, dinamiza el sector agrícola y tiene un alto potencial para la navegación. Sin embargo, el departamento del Huila como fábrica de agua se encuentra amenazado por el Cambio Global. A nivel regional, las proyecciones de cambio climático para el Huila muestran un incremento de 2°C en su temperatura media para el año 2040, que puede ser aún mayor si se parte de las nuevas proyecciones mundiales; así como una disminución de hasta el 30% en la precipitación [16]. Pese a la alta incertidumbre que presentan las proyecciones de cambio climático [17], es necesario tenerlas en cuenta como escenarios posibles del futuro, para diseñar una serie de medidas que minimicen el impacto del cambio climático. En ese sentido, se puede planificar mejor la inversión de recursos, evitando inconvenientes en la reconstrucción, el reasentamiento y la restauración. Luego, la pregunta de fondo es ¿Cuáles serían las mejores estrategias de adaptación al cambio climático?

Entorno al impacto potencial del cambio climático en la escorrentía superficial, se han realizado varios estudios [6,7,1,18,19,20]. A nivel global, en el sureste de la meseta del Tíbet [21] se utilizaron dos modelos de lluvia y escorrentía (SIMHYD y GR4J) a escala mensual, para evaluar el impacto del cambio climático

sobre los recursos hídricos. Además, se implementaron 20 modelos de clima global (MCG) con un horizonte de pronóstico a 2030. Los resultados muestran un incremento de las precipitaciones medias en todos los MCG; y por lo tanto un incremento en la escorrentía, especialmente durante la temporada de lluvias. También se encuentran implementaciones de modelos hidrológicos distribuidos que evalúan el impacto de los escenarios de cambio del clima y uso del suelo. Por ejemplo: [22] en África, [23] en el noreste de Brasil, en el Norte [24] y el Centro [25] de México. En general, la tendencia futura es el de utilizar ensambles de modelos climáticos e hidrológicos para evaluar las distintas fuentes de incertidumbre [26,27,28,6]. A nivel Andino, [29] en Bolivia utilizando información de satélite para evaluar el impacto del cambio climático sobre el agua de los manantiales, se concluyó que hay un rango de variación en la escorrentía desde -69% hasta +137% dependiendo del escenario. En Colombia se han realizado varios trabajos [30,31,32,33].

Retomando la importancia estratégica del departamento Huila como una fábrica de agua en Colombia (alto Magdalena) a nivel regional, se han realizado varios estudios para caracterizar el comportamiento hidrológico de la región. Empezando por un estudio de inundación en la cuenca del río Las Ceibas [34], otro del impacto potencial del cambio climático sobre la cuenca del río Suaza [35], uno sobre modelación hidrológica del alto Magdalena [36], y por último, un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del río Aipe [37]. Además, dada la importancia del cambio climático, se formuló un plan de cambio climático “Huila 2050” [38]; este proyecto permitió priorizar acciones con las autoridades públicas y privadas, estimar las emisiones de gases con efecto invernadero, y proyectar la vulnerabilidad climática. Sin embargo, el Plan Huila 2050 plantea soluciones parciales, ya que su implementación es inviable a nivel económico, y se formuló desconociendo la cultura y el saber ancestral de los habitantes de los ecosistemas.

Finalmente, los objetivos del estudio fueron dos: Primero, evaluar el desempeño del modelo hidrológico de Thomas llamado abcd [39] para simular el caudal medio mensual de la cuenca hidrográfica del río Aipe en Huila, Colombia a través de la calibración y validación del modelo, utilizando datos de previos caudales observados en la estación de desagüe; y segundo, estudiar la respuesta hidrológica de la cuenca hidrográfica en acorde con las proyecciones de los escenarios de cambio climático del IPCC-AR4 (2011–2040), como herramienta de apoyo en la toma de decisiones en la formulación de medidas de adaptación que promuevan la gestión integral

del recurso hídrico. El artículo se distribuye de la siguiente manera: una descripción de las condiciones climáticas y biofísicas de la cuenca hidrográfica bajo estudio; una breve introducción del modelo hidrológico abcd [39]; y la metodología de análisis de sensibilidad, calibración, y validación. Luego se presentan las características de los escenarios de cambio climático utilizados y su impacto potencial en la respuesta hidrológica de la cuenca del río Aipe. Finalmente, se propone una batería de medidas de adaptación al cambio climático.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Zona de estudio e información hidrometeorológica

La cuenca hidrográfica del río Aipe está ubicada en el sur de Colombia (Figura 1). Localizada en las coordenadas 3°13'N y 75°14'O, cubre un área de 688,9 Km<sup>2</sup> y es tributaria del río Magdalena. La longitud del cauce principal es de 51,31 km, con densidad de drenaje muy bajo (0,0732 km<sup>-1</sup>), lo que indica un drenaje pobre y un predominio de los procesos de ladera dándole origen a mayores tiempos de residencia (10,53 h). Este supuesto se confirma con el coeficiente de compacidad (2,29), el cual indica una cuenca con forma oval oblonga poco propensa a crecidas súbitas. La cuenca presenta una variedad de relieves (390–1900 msnm). En la parte alta de la cuenca, se encuentran montañas con diferentes rangos de pendientes que se convierten en topografía escarpada a medida que se desciende; en el medio y hasta los sectores bajos y planos se localizan los valles aluviales [40]. La pendiente media de la cuenca es 0,05 m/m. En la parte alta de la cuenca predomina el uso del suelo de vocación forestal, y en la parte media y baja se presentan cultivos de arroz, maíz, ganadería extensiva y piscicultura. El clima de la cuenca se distribuye en acorde con el gradiente altitudinal entre húmedo, seco y muy seco. La precipitación media mensual para el periodo de referencia utilizado (1992–2012) es de 172,75 mm y la evapotranspiración potencial es de 163,17 mm. La temperatura media mensual es de 27,57 °C, con una humedad relativa de 70,75 %.

La cuenca del río Aipe esta monitorizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Las variables utilizadas en el estudio fueron: precipitación (mm), temperatura media (°C) y caudal (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>). Las series históricas tenían 20 años de registros a escala mensuales (1992–2012). La evapotranspiración potencial se calculó con la fórmula de Turc modificada [41]. Las características y localización de las estaciones se encuentran referenciadas en la tabla 1.



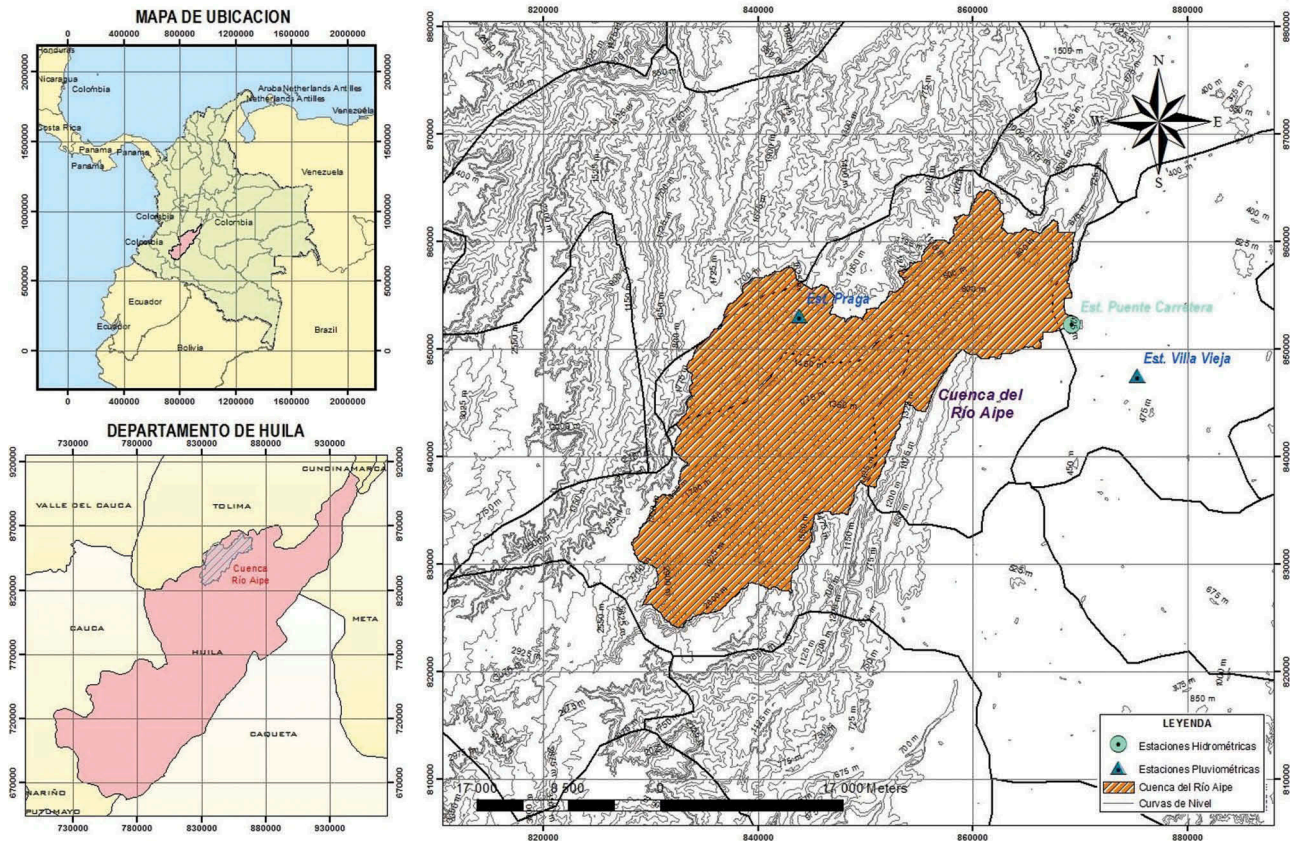


Figura 1. Localización del área de estudio: cuenca del río Aipe, al sur de Colombia.

Tabla 1. Estaciones hidrometeorológicas en la cuenca del río Aipe.

Código	Tipo de estación	Nombre de la estación	Coordenadas		ELEVACIÓN (msnm)
			OE	N	
21130110	PM	PRAGA	75°29'26.4"	3°16'6.89"	1085
21115080	CO	VILLAVIEJA FFCC	75°12'58.6"	3°13'21.1"	430
21137030	LG	PTE CARRETERA	75°15'3.49"	3°15'48.3"	385

PM: Pluviométrica, CO: Climatológica Ordinaria, LG: Limnigráfica, msnm: metros sobre el nivel del mar, N: norte, OE: oeste, PM: pluviométrica

## 2.2 Implementación del modelo hidrológico

### 2.2.1 Descripción del modelo

El modelo de balance hídrico abcd desarrollado por Thomas en 1981 es un modelo hidrológico minucioso que simula el caudal en respuesta de la precipitación y la evapotranspiración potencial. El modelo se puede considerar de tipo conceptual de base física y agregado en la resolución espacial con estructura matemática no lineal, y los resultados son valores medios. El modelo abcd se conceptualiza en dos almacenamientos: humedad del suelo y acuífero. De acuerdo con el balance de masas, el suelo gana recurso hídrico de la precipitación y pierde por efectos de la evapotranspiración potencial, escorrentía directa y recarga al acuífero. El almacenamiento del acuífero gana aportaciones de la recarga y pierde agua por la salida del flujo subterráneo. El caudal total es la suma de la escorrentía directa y el

flujo subterráneo (Figura 2). El modelo aplica la ecuación de continuidad para un volumen de control que representa la parte superior del suelo, donde se supone que ocurre la evapotranspiración cuando:

$$P_t - E_t - R_t - QU_t = \Delta XU = XU_t - XU_{t-1} \quad (1)$$

donde  $P_t$  es precipitación total mensual,  $E_t$  es la evapotranspiración actual,  $R_t$  es la recarga del almacenamiento subterráneo,  $QU_t$  es la escorrentía superficial, y  $XU_t$  y  $XU_{t-1}$  representan el contenido de humedad del suelo actual y en el paso de tiempo previo, respectivamente. Análogamente, para el almacenamiento subterráneo, se aplica el siguiente balance de masas:

$$G_t + Q_t = G_{t-1} + R_t \quad (2)$$



Figura 2. Esquema conceptual del ciclo hidrológico en el modelo abcd de Thomas.

Donde  $G_t$  es el almacenamiento subterráneo y  $Q_t$  es el caudal total. Debido a que el modelo abcd se ha utilizado ampliamente no se profundiza más en la conceptualización y el soporte matemático. Sin embargo, se puede consultar [42,39] para mayor detalle del modelo.

El modelo abcd (Thomas 1981) funciona con series históricas de precipitación, temperatura del aire mínima y máxima y el caudal en el punto de desagüe de la cuenca. Solo cuatro parámetros gobiernan el comportamiento del modelo:

- a: controla las salidas del almacenamiento del suelo, bajo condiciones de saturación;
- b: controla el nivel de saturación del suelo;
- c: define el aporte del acuífero al río; y
- d: controla el flujo subterráneo.

### 2.2.2 Calibración, validación y análisis de sensibilidad

El modelo hidrológico se implementó con una serie histórica de caudales medios mensuales observados a través de 20 años (1992–2012). La calibración y validación del modelo fue desarrollada utilizando los caudales observados en el punto de desagüe de la cuenca hidrográfica (en la estación Puente Carretera). La calibración se realizó de manera automática y se utilizó el 70% de la serie histórica de caudales observados (1993–2007). El análisis de sensibilidad paramétrico se realizó de acuerdo con una metodología propuesta [43], y para la estimación e identificación de los parámetros se utilizó la metodología “Generalized Likelihood Uncertainty Estimation” (GLUE) [44]. En general, todas las metodologías implementadas en esta sección se encuentran en el Monte Carlo Analysis Toolbox (MCAT), el cual

es una librería de Matlab para realizar análisis numérico, optimización de parámetros, análisis de sensibilidad y estimación de incertidumbre paramétrica [45]. El MCAT utiliza el método de muestreo conocido como Monte Carlo [46] para analizar la sensibilidad del modelo ante todo el espectro de posibles valores que puede adoptar el espacio paramétrico. Luego, asume que matemáticamente, no existe un único conjunto de parámetros óptimos, sino que introduce el concepto de la probabilidad de certeza de representar correctamente el sistema. Aunque las bondades del MCAT son conocidas, no se puede ocultar el problema de la equifinalidad [43]. Para comparar los caudales simulados y observados, se utilizó como métrica de desempeño el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE) [47]:

$$\text{NSE} = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - Q_i^{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \right] \quad (3)$$

Donde  $\overline{Q_{\text{obs}}}$  es igual al promedio de los caudales observados ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $Q_i^{\text{obs}}$  es igual a los caudales observados ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ); y  $Q_i^{\text{sim}}$  es igual a los caudales simulados ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ). El coeficiente de Nash–Sutcliffe mide la fracción de la varianza de los caudales observados explicada por el modelo. El NSE varía desde menos infinito hasta 1. Valores del NSE igual a 1 representan una relación perfecta entre los simulados y los observados. Valores de NSE menores a 0 indican que la media de los observados es un mejor predictor que los valores simulados. En general, los valores del NSE  $> 0$  indican un desempeño mínimo aceptable [48]. Por otro lado [42], otros clasificaron el desempeño de un modelo basado en NSE en cuatro grandes

grupos: bueno (1–0,75), aceptable (0,75–0,67), pobre (0,67–0,59) y malo (< 0,59).

### 2.3 Escenarios de cambio climático

En términos de cambio climático, es ampliamente aceptado que el clima está fuertemente influenciado por el modelo de desarrollo (consumo) que utilice una sociedad. Esta relación se expresa a través de la emisión de gases con efecto de invernadero, influenciada por la economía, la sociedad y los desarrollos tecnológicos [2]. El sistema climático global es muy complejo; sin embargo, se han realizado algunas simplificaciones en los procesos físicos para lograr modelar el sistema climático a escala global y regional. La complejidad y las simplificaciones del sistema generan mucha incertidumbre al momento de modelar el clima futuro [6,8,9,10]. La simulación de los escenarios de cambio climático se realizó teniendo en cuenta los posibles cambios sobre la temperatura y la precipitación de la cuenca del río Aipe. Tres escenarios fueron seleccionados (Tabla 2). Las proyecciones de los escenarios de cambio climático corresponden al IPCC-AR4 (2011–2040) [49]. El escenario A2 es considerado pesimista; sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones y el crecimiento económico por habitante, así como el cambio tecnológico, que están más fragmentados y son más lentos que otras líneas evolutivas. Los escenarios de extrapolación de tendencias que se analizaron permiten predecir reacciones del clima futuro usando los valores de clima presente, con los cuales se pueden hacer cálculos para obtener los valores que alcanzarían las variables climatológicas, si la tendencia se mantiene. El escenario de ensamble multi-modelo consiste en dos o más simulaciones del mismo modelo regional, usando exactamente las mismas condiciones forzantes, y en donde la única diferencia son las condiciones iniciales. El “downscaling” o rebaja de escala se realizó con el modelo PRECIS (para mayor información sobre la metodología consultar [16]). La producción de las series sintéticas de los datos de entrada para el modelo

hidrológico se realizó a través de factores de ajuste que tienen un efecto multiplicativo o aditivo, dependiendo del tipo de variable [35].

## 3. Resultados y discusión

### 3.1. Condiciones climáticas históricas

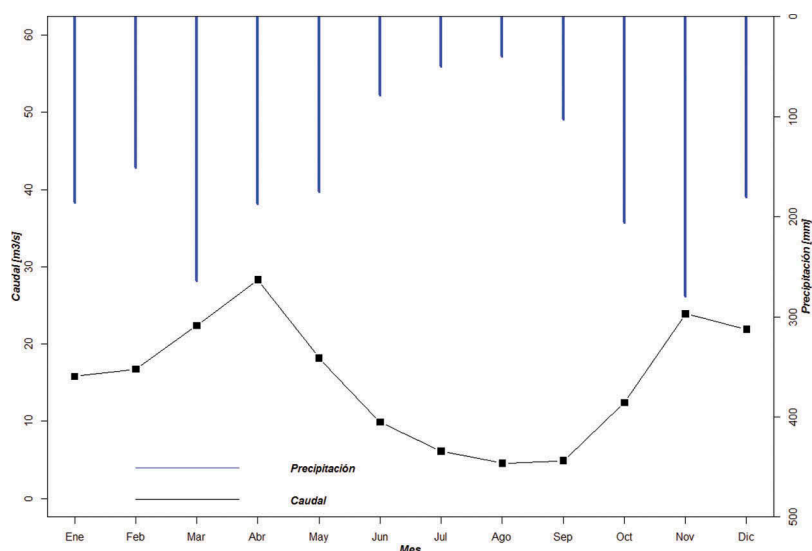
La Figura 3 representa la hidroclimatología de la cuenca hidrográfica del río Aipe, la cual corresponde al patrón típico de los Andes Colombianos. Para Colombia existen dos estaciones: verano (una temporada de menos lluvia) e invierno (la temporada de más lluvia), que están asociadas con el desplazamiento hacia el norte y sur del país de la zona de confluencia intertropical (ZCI) durante el año [50]. El patrón de lluvias está caracterizado por dos períodos de lluvias moderados y un estiaje prolongado. La primera temporada de lluvias comienza en enero y se extiende hasta mayo; los valores medios mensuales de lluvias oscilan entre 180–290 mm; y el segundo período de lluvias se presenta de octubre a diciembre, con valores medios mensuales oscilando entre 198–290 mm. De igual forma, sólo se presenta un periodo estival desde junio hasta septiembre, con valores de lluvias entre 30–120 mm. El promedio anual de lluvia corresponde a 2073 mm y de evapotranspiración potencial de 1958,08 mm, generando una escorrentía media de 114,92 mm. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen [51], el clima es tropical húmedo; el verano dura 4 meses, y el mes más seco es agosto, con solo 40 mm.

De acuerdo con Henríquez-Daza [50], los dos períodos de lluvia presentados en la Figura 3 se pueden explicar por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI). En otras palabras, en el trimestre de marzo-abril-mayo el eje imaginario de la ZCI está básicamente sobre el centro del país, lo cual causa la primera temporada invernal del año, mientras que en los meses de mitad del año (de los meses junio-julio-agosto) el eje sube hasta la costa del Caribe, en Colombia. De igual forma, desde el mes de agosto la ZCI comienza a bajar hacia el centro del país, instalándose allí nuevamente su eje desde septiembre y hasta noviembre, lo cual produce la segunda temporada de lluvias. Por otro lado, se puede

**Tabla 2.** Proyecciones de cambio climático para el Huila en el período 2011–2040, expresado en términos de incrementos de precipitación y temperatura.

Escenario (2011-2040)	Precipitación %	Temperatura °C			HR %
		Mínima	Media	Máxima	
Extrapolación de tendencias	-3,00	0,3	0,4	0,4	1,3
Ensamble multi-modelo	-14,70	1,1	1,6	1,6	-2,2
A2	-24,50	3	3	5	-5

Fuente: [16]. HR: Humedad relativa.



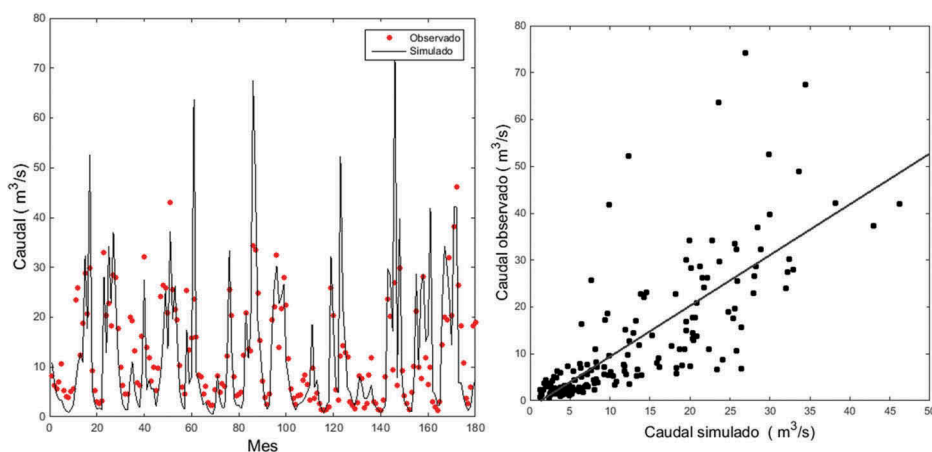
**Figura 3.** Relación de la lluvia con la escorrentía, observación multianual para el periodo 1992–2012 en la cuenca del río Aipe, en Huila, Colombia.

identificar una marcada influencia de la precipitación sobre el caudal medio de la cuenca (Figura 3). Efectivamente, la variabilidad de la precipitación influye en las fluctuaciones de los caudales medios.

### 3.2 Evaluación del modelo en el punto de desagüe

La Figura 4 muestra la habilidad del modelo para simular los caudales medios mensuales en el punto de desagüe del río Aipe. La inspección visual, pese a ser una medida subjetiva, muestra una idea de la precisión del modelo hidrológico. Por ejemplo, el modelo abcd creada por Thomas realiza una mala representación de los caudales máximos observados; ya que en la mayoría

de casos, sobreestima el caudal máximo. Por el contrario, se ajusta bastante bien a los caudales medios y mínimos. Las causas de los errores pueden ser varias: Primero, que los modelos no son perfectos; son una representación de los sistemas reales que tienen suposiciones, y esto se conoce como el error estructural o epistémico [52,53]. Segundo, las entradas del modelo no son precisas, tienen errores de medición que se transmiten al modelo hidrológico [54]. Tercero, errores en las condiciones iniciales del modelo [21]; y cuarto, que hay errores en la identificación de los parámetros óptimos [55,56,57]. Evidentemente, la incertidumbre de un proceso de modelación hidrológica es muy alta, dado la gran cantidad de errores que se pueden



**Figura 4.** Evaluación del modelo hidrológico en el punto de desagüe de la cuenca del Río Aipe. La figura de la izquierda muestra los caudales mensuales simulados y observados para el periodo 1992–2012. A su derecha, otra figura muestra el diagrama de dispersión para los caudales observados y simulados, durante el mismo período de tiempo.



**Tabla 3.** Valores óptimos de parámetros del modelo abcd de Thomas.

Parámetro				Valores de entrada		NSE	
a	b	c	d	Sgo	Swo	Calibración	Validación
0,992	700	0,1	0,6	200	100	0,7681	0,893

NSE: índice de eficiencia de Nash–Sutcliffe

presentar durante el proceso. Sin embargo, este estudio utilizó la herramienta “Monte Carlo Analysis Toolbox” (MCAT) [44], para poder identificar los parámetros óptimos del modelo. Es difícil asegurarse que los parámetros son los óptimos, dados los problemas de equifinalidad ya mencionados. En la *Tabla 3* se muestran los valores óptimos encontrados para cada uno de los parámetros, como también se relacionan los valores del índice de NSE, tanto en la calibración como en la validación de los modelos.

Además del problema de la equifinalidad, análisis de la parte derecha de la *Figura 4* evidencia que no se cumple la tercera condición del teorema de Gauss–Markov, el cual exige que la varianza de los errores sea constante (homocedasticidad) para ajustar una función de verosimilitud [58,53]. Una alternativa para resolver estos problemas sería utilizar un modelo de error aditivo [59], tratar de aproximar el comportamiento hidrológico a través de firmas hidrológicas [58], pero estas soluciones son relativamente novedosas; todavía están en fase de investigación y están fuera del alcance de este trabajo.

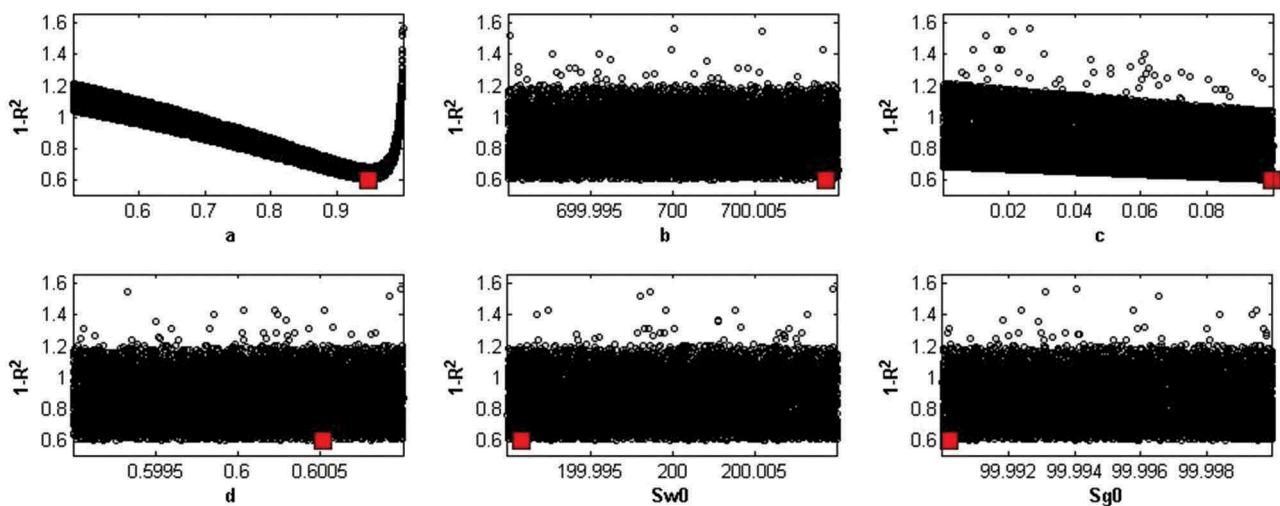
Aunque el índice de NSE tiene inherentes limitaciones [60], es el criterio más utilizado para evaluar modelos hidrológicos. Esto permite una comparación relativa con otros estudios. En este sentido, teniendo en cuenta los valores encontrados para NSE (*Tabla 3*), se puede decir que el modelo es capaz de representar

adecuadamente los caudales mensuales observados en el punto de desagüe de la cuenca. Se encontró un buen ajuste tanto en la calibración como en la validación (*Tabla 3*). Sin embargo, demostraron que tener altas métricas de desempeño no necesariamente implica un modelo más realista del comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica [61].

### 3.2.1 Análisis de sensibilidad e identificabilidad

*Figura 5* muestra los resultados del análisis de sensibilidad regional para los parámetros del modelo y la función objetivo. El análisis de sensibilidad del modelo tiene como objetivo evaluar el impacto generado por el cambio de los parámetros en la respuesta de un modelo matemático. Por lo tanto, esta metodología permite determinar qué parámetro domina la respuesta y cuál podría ser eliminado por su baja sensibilidad o influencia en los resultados obtenidos en la simulación. De acuerdo con la *Figura 5*, se identifica la sensibilidad de los parámetros **a** y **c**. La amplitud del parámetro **a**, con un valor cercano a 1, significa que la escorrentía en la cuenca se da antes de la saturación de los suelos. Nótese que a medida que las probabilidades acumuladas varían con mayor gradiente, el parámetro analizado **a** es más sensible en un determinado rango; por el contrario, los demás parámetros son poco sensibles. La sensibilidad del parámetro **c** indica que sólo el valor encontrado es el que calibra el modelo, que al ser un valor bajo muestra el poco aporte que tiene el agua subterránea hacia el caudal del río.

Adicionalmente, la *Figura 6* muestra el comportamiento de los parámetros en la calibración del modelo abcd de Thomas. La exploración del espacio paramétrico se realizó con el muestreo de Monte Carlo [46]. La superficie cóncava en un único vértice de los parámetros **a** y **c**

**Figura 5.** Análisis de sensibilidad regional de los parámetros del modelo abcd de Thomas.

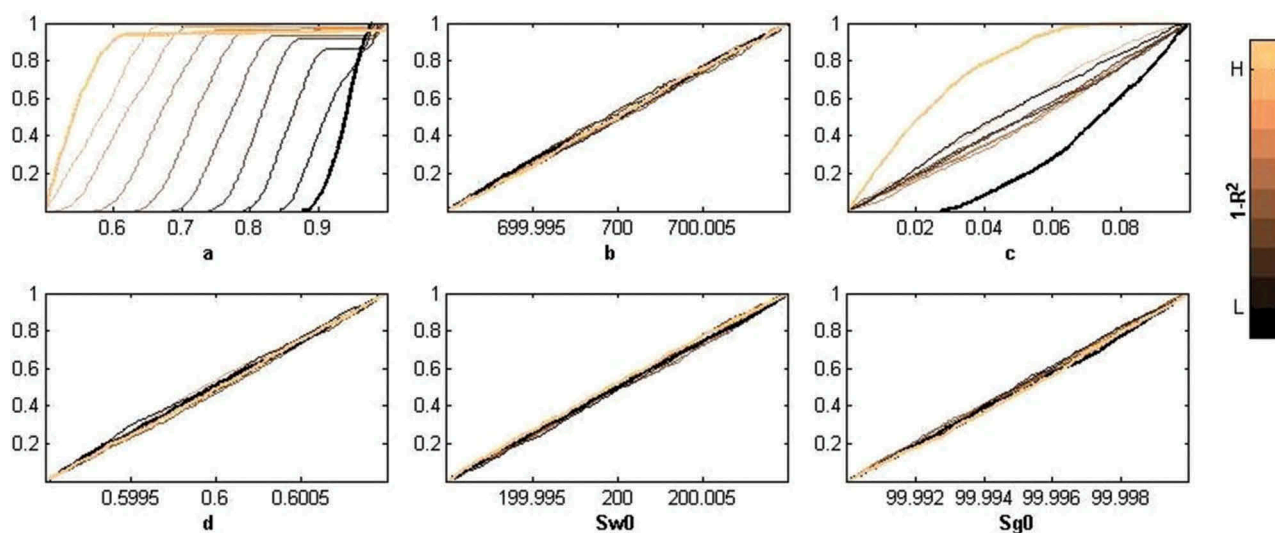


Figura 6. Diagrama de dispersión para la función objetivo del modelo abcd Thomas

son sinónimos de identificabilidad; por el contrario, los demás parámetros presentan superficies muy planas a lo largo del eje  $x$ , lo cual sugiere problemas de interacción paramétrica  $y$ , por lo tanto, baja identificabilidad. Por otro lado [42], encontraron que los parámetros con poca identificabilidad durante el proceso de calibración son  $c$  y  $d$ .

Debido a que no se utilizó un periodo de calentamiento previo a la calibración del modelo, se decidió

calibrar las condiciones iniciales del modelo ( $S_{w0}$ ,  $S_{g0}$ ). Este procedimiento asume las condiciones iniciales como si fueran parámetros del modelo hidrológico. Esta metodología permite identificar las condiciones iniciales del modelo hidrológico. Finalmente, debido a que las condiciones iniciales no son parámetros del modelo, no se realiza ninguna interpretación durante el análisis de sensibilidad regional.

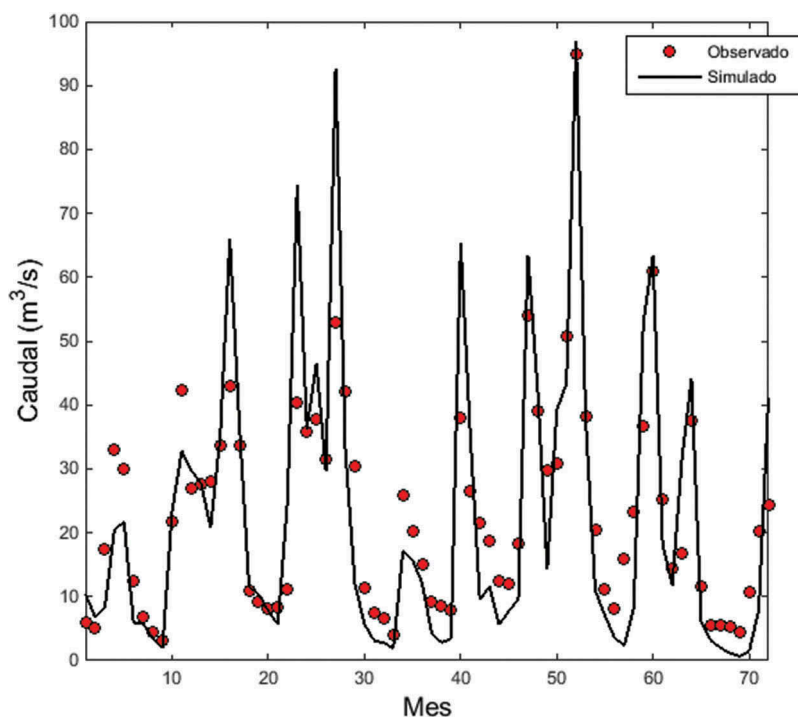


Figura 7. Caudales observados y simulados en la estación de desagüe durante el período de validación del modelo abcd de Thomas (2008–2012).

### 3.2.2 Validación del modelo hidrológico

La Figura 7 representa la validación del modelo desde el año 2008 hasta el 2012; y el índice de NSE de 0,89 demuestra que el modelo representa adecuadamente los datos observados en la estación de cierre de la cuenca. Visualmente, el ajuste de los caudales observados con respecto a los simulados es aceptable; con lo que se confirma la correlación positiva del caudal simulado con respecto al observado y el buen desempeño del modelo.

Sin embargo, es difícil encontrar un modelo que sea tan versátil y general que se adapte a las diferentes condiciones climáticas y comportamientos hidrológicos presentes en la naturaleza. En particular, cada modelo tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, los modelos diseñados para pronóstico de caudales máximos fallan cuando se usan para el estimando de caudales medios y mínimos. De igual forma, para un modelador es difícil conocer *a priori* la estructura del modelo que describa correctamente el sistema real. De acuerdo con lo anterior, está ganando importancia el esquema de modelación con múltiples modelos en paralelo [62]. El esquema de modelación en paralelo propuesto reconoce que cada modelo tiene su ventaja sobre el proceso a modelar y los datos observados. Por otro lado, algunos autores expresan que los modelos tienen desempeños opuestos, dependiendo de las condiciones climáticas (como si es húmeda o seca): en este sentido se recomienda un modelo para cada condición climática, porque los modelos varían en su desempeño dependiendo de la condición o el gradiente climático: en otras palabras, se recomienda el esquema de modelación de ensamble multi-modelo [63]. Adicionalmente, se ha encontrado [42] que en las cuencas de USA, el modelo abcd de Thomas del 1981 tiene mejores desempeños en cuencas húmedas y semi-húmedas; y que por el contrario, en cuencas con escasez hídrica es necesario mejorar la conceptualización del modelo.

### 3.3 Simulación de la oferta hídrica futura para tres escenarios de cambio climático

Con el modelo abcd de Thomas calibrado y validado para las condiciones ambientales de la cuenca hidrográfica del río Aipe, perturbamos el modelo con las series de precipitación, temperatura y humedad relativas mensuales para tres escenarios climáticos: la

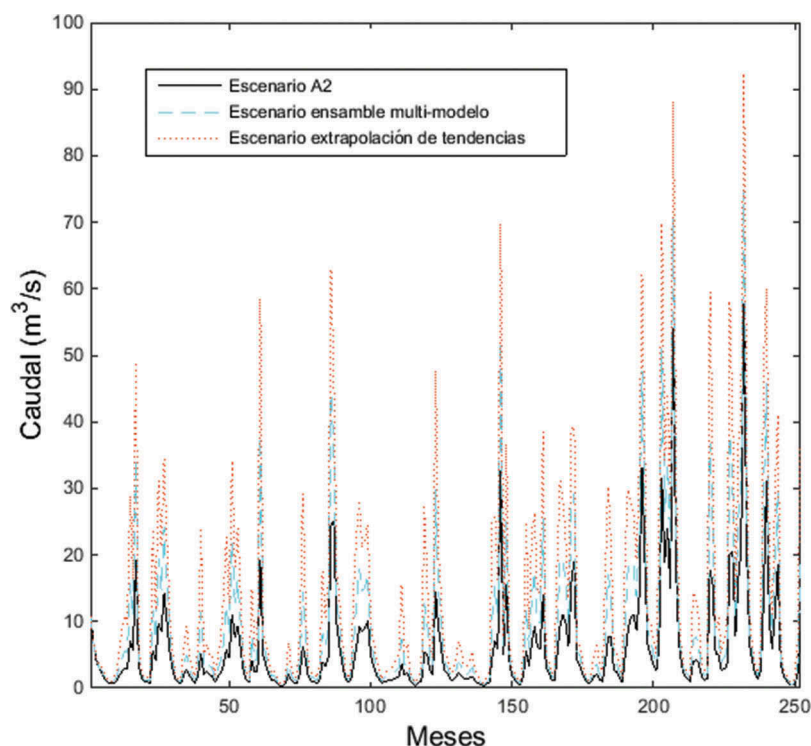
extrapolación de tendencias, A2 y ensamble multi-modelo. En la Tabla 4 se muestra el promedio de la oferta hídrica para el período simulado (2013–2033), según cada modelo y escenario, como también se indica la variación de los mismos con respecto al período de referencia utilizado para la simulación 2002–2012.

A partir de las proyecciones de los escenarios de cambio climático, se analizó el efecto sobre la oferta hídrica del río Aipe. El resultado es un descenso significativo del caudal medio mensual (Tabla 4). Es importante señalar que los descensos en la oferta hídrica serán mayores que los previstos en precipitación, evidenciando el comportamiento no lineal del ciclo hidrológico. Este resultado también se encontró [7] en cuencas semiáridas de España. El escenario A2 (pesimista) presenta el mayor descenso en la oferta hídrica futura; A2 supone al mismo tiempo disminución de la precipitación, aumento de temperatura y constantes intervenciones antropogénicas que elevarían la emisión de gases con efecto de invernadero. Por el contrario, el menor descenso en la oferta hídrica se presenta para el escenario de extrapolación de tendencias, el cual supone que las variables climatológicas presenten un comportamiento similar al observado en el pasado y que la oferta promedio del caudal para los años 2013–2033 sería de  $13,797 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , es decir, disminuirá en un 10,64%. Además, para el escenario ensamble multi-modelo, la disminución será de 39,47% durante el período simulado. La Figura 8 presenta el régimen de caudales; es importante analizar la frecuencia de los caudales extremos y específicamente, el escenario de extrapolación de tendencias, donde se muestra un incremento en la intensidad de los caudales máximos.

De igual forma, la Figura 8 muestra la fuerte influencia de la precipitación y su variación interanual en el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Aipe. Este resultado también se evidencia en la mayoría de cuencas tropicales en África [22]. También fue encontrada [37] la fuerte influencia que tiene la precipitación sobre la respuesta hidrológica de la cuenca del río Aipe. Estos resultados son consistentes con otros estudios realizados en condiciones similares [34,35,36,64]. De acuerdo con los resultados encontrados, la oferta hídrica futura de la cuenca del río Aipe será menor que la actual (Tabla 4). Estos resultados se encuentran

**Tabla 4.** Caudal simulado con el modelo abcd de Thomas, según los escenarios de cambio climático

Escenario	Caudal simulado durante el período 2002–2012 ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Promedio del caudal simulado para el período 2013–2033 ( $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ )	Reducción respecto al período 2002–2012 (%)
A2	15,44	5,774	–62,6
Ensamble multi-modelo		9,344	–39,47
Extrapolación de tendencias		13,797	–10,64



**Figura 8.** Variación del caudal medio mensual según las proyecciones de los escenarios de cambio climático evaluadas sobre la cuenca del río Aipe, en Huila, Colombia (2013–2033).

en concordancia con Del Moral, Arrojo y Herrera [65], quienes argumentan que el suponer que la disponibilidad hídrica futura será igual a la actual es poco confiable en las condiciones de un mundo cambiante. Esta afirmación trae por lo menos dos desafíos para los gestores del agua: Primero, implementar metodologías de evaluación de estrategias de gestión basadas en escenarios; y segundo, proponer estrategias de adaptación que mitiguen los efectos potenciales del cambio climático. En este sentido, una de las ventajas de los modelos hidrológicos es la exploración de las consecuencias de distintas condiciones y alternativas de gestión hídrica [66,67,68].

A pesar de los resultados encontrados, la intención de esta investigación no es enviar un mensaje de alerta a la comunidad, especialmente teniendo en cuenta el alto grado de incertidumbre que se maneja en las proyecciones del cambio climático. Incertidumbres como las emisiones futuras de gases con efecto de invernadero [10], el modelo global del clima [6], el proceso de “downscaling” o reducción (con un modelo regional del clima) [11], la estimación de parámetros [53], y el error epistémico del modelo hidrológico [58]. Por el contrario, la intención de la investigación es de promover el paradigma de gestión del recurso hídrico, basado en escenarios para apoyar la toma de decisiones robustas y la formulación temprana de medidas de adaptación al cambio climático.

### 3.4 Medidas de adaptación al cambio climático

Es evidente que el hombre se ha convertido en una nueva fuerza geológica [70]. La sociedad global transforma a un ritmo acelerado tanto el territorio como sus recursos naturales. El deterioro ambiental incrementa a tasas impensables por el modelo económico depredador instalado en los últimos 2 siglos [71]. Un mundo dominado por la economía global donde se evidencian profundas diferencias sociales, y contrastes de riqueza y poder [65]. El calentamiento global es uno de los efectos del modelo de desarrollo imperante. De los efectos negativos del cambio climático, el IPCC ha generado bastante información [50,72,65,37]. Por el contrario, este artículo centra sus esfuerzos en la búsqueda de soluciones.

El calentamiento global es un problema de orden mundial donde confluyen variables tan complejas y diversas como: crecimiento demográfico, cambio de uso del suelo, crecimiento económico, consumo energético, transporte, soluciones tecnológicas, políticas públicas, etc. En resumen, todas estas variables y sus interacciones se traducen en unas emisiones de gases con efecto de invernadero que perturban el sistema climático global, generando un incremento de la frecuencia de fenómenos climáticos extremos que afectan a las comunidades (sequías prolongadas o inundaciones súbitas). Paradójicamente, para un problema



global las soluciones más prometedoras se plantean a escala local, o máximo a nivel regional.

Las medidas de adaptación al cambio climático deben aprovechar las características de las comunidades, su capacidad de resiliencia y el saber ancestral. En este sentido, las medidas de adaptación no son nada nuevo; por el contrario, pueden representar el rescate del conocimiento ancestral. Por ejemplo, el concepto de equilibrio natural entre la oferta y la demanda. Actualmente el equilibrio se ha perdido, sólo prima los intereses productivos. En el caso específico de los recursos hídricos, lo explican adecuadamente La Roca y Ferrer [73]: el modelo productivista de la oferta hídrica considera al agua como un puro “recurso productivo” capaz de traer riqueza y progresar globalmente las condiciones de vida de la sociedad. Este enfoque generó la idea de disponibilidad hídrica con potencial ilimitada que borró el concepto de “escasez natural” tan importante para las comunidades indígenas. Actualmente, el modelo productivista del recurso hídrico genera desequilibrios hidrológicos. Las comunidades originarias utilizaban la observación de los ecosistemas y analizaban las complejas y frágiles relaciones del ecosistema para evitar los desequilibrios hidrológicos.

La cuenca del río Aipe juega un papel fundamental para el desarrollo del municipio que lleva su mismo nombre. Las actividades que más demandan recursos hídricos son: cultivo de arroz (30,09%), piscicultura (6,08%), abastecimiento (0,51%), ganadería (0,11%) y el cultivo de café (0,032%). Actualmente la demanda hídrica ocupa el 13,38% de la oferta hídrica. Por otro lado, en el escenario de cambio climático más pesimista (A2) se proyecta un incremento de la demanda hídrica del 36,83%. Este escenario incrementaría el conflicto por el uso del agua, básicamente porque las demandas incrementan y la oferta hídrica es la misma y/o por el contrario, disminuye debido a fenómenos de variabilidad y cambio climático. Además, bajo el escenario A2, prevemos una disminución del caudal ecológico por efectos de incremento de la demanda. Para el caso concreto de estudio y de acuerdo con la simulación hidrológica, se recomiendan las siguientes medidas de adaptación:

- (i) promoción de cultivos con requerimientos hídricos menos exigentes, debido a que actualmente las apuestas productivas son el cultivo de arroz por inundación y la piscicultura, ambas actividades demandan mayor cantidad de recurso hídrico;

- (ii) aprovechamiento de las semillas y variedades nativas que están adaptadas a las condiciones climáticas y son más resistentes a la sequía;
- (iii) incrementar la capacidad de infiltración y recarga de la cuenca para alimentar el acuífero a través de mayores tiempos de retención hídrica;
- (iv) promover prácticas de cosecha de aguas de lluvia;
- (v) establecer prácticas de diseño hidrológico para retener agua aprovechando la topografía de la cuenca y evitando la erosión hídrica (línea clave);
- (vi) disminución del uso de fertilizantes y pesticidas que promuevan la emisión de gases con efecto de invernadero;
- (vii) promover el uso multipropósito del agua (reducción, reciclaje y reutilización) para cerrar el ciclo de vida de los sistemas productivos;
- (viii) rotación y diversificación de cultivos para mantener el equilibrio ecológico del agrosistema;
- (ix) aprovechar la estacionalidad de las zonas de inundación para establecer cultivos de ciclo corto;
- (x) establecer un sistema de información de red pluviométrica participativo comunitario;
- (xi) establecer un plan de educación y comunicación para promover el cambio de conciencia en la forma y la promoción del consumo de productos locales;
- (xii) promover canales cortos y justos de comercialización;
- (xiii) incentivar el ahorro del recurso hídrico y castigar el derroche; y
- (xiv) creación de un observatorio de cambios ambientales y extremos hidrológicos.

Finalmente, se presentan especiales recomendaciones para los gestores del recurso hídrico: la sociedad requiere de herramientas conceptuales, metodológicas y tecnológicas que contribuyan a orientar la toma de decisiones de manera robusta; no hay gestión del agua sin gestión del territorio y esta relación es inseparable; el clima no es una cuestión de mercado, muchos planes de cambio climático se enfocan en cuantificar los servicios ecosistémicos para hacer negocios, sin pensar en el desarrollo humano ni el bienestar del ecosistema. La complejidad de la gestión del recurso hídrico requiere atacar los problemas desde visiones transdisciplinarias de construcción colectiva, evitando el enfoque sectorial y promoviendo un acceso responsable y equitativo del agua.

## 4. Conclusiones

Se implementó el modelo hidrológico abcd de Thomas para evaluar el impacto potencial de los escenarios de cambio climático del IPCC-AR4 (2011–2040) en el caudal medio mensual de la cuenca hidrográfica del río Aipe (688,9 km<sup>2</sup>), en Huila, Colombia. En general, el ajuste del modelo hidrológico a los datos en el punto de desagüe de la cuenca (en la estación Puente Carretera) es bueno (NSE de 0,89). Se concluye del análisis de sensibilidad regional e identificabilidad que los parámetros más influyentes son: **a** (controla las salidas del almacenamiento del suelo bajo condiciones de saturación) y **c** (define el aporte del acuífero al río). Respecto a la simulación de los escenarios, la línea base (1992–2012) estimó un caudal medio de 15,44 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, el escenario de extrapolación de tendencias estimó un caudal de 13,79 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (-10,64%), el escenario de ensamble multi-modelo de 9,34 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (-39,47%) y escenario A2 de 5,74 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (-62,60%). Además, se propone una batería de medidas de adaptación al cambio climático que apuestan por la gestión integral del recurso hídrico, la recuperación del saber ancestral de las comunidades originarias, soluciones locales para problemas globales atacados desde una visión transdisciplinaria, la promoción de la resiliencia social frente a los cambios globales y el aprendizaje colectivo desde la gestión comunitaria del agua. Finalmente, se recomienda a los gestores del agua el paradigma de gestión del recurso hídrico basado en escenarios, para tomar decisiones robustas en un mundo cambiante.

## Bibliografía

- [1] Vo, N. D., Gourbesville, P., Vu M. T., et al. (2016). A deterministic hydrological approach to estimate climate change impact on river flow: Vu Gia-Thu Bon catchment, Vietnam. [Una forma determinística hidrológica para estimar el impacto del cambio climático sobre el flujo de ríos: Colección de aguas en el Vu Gia-Thu Bon, Vietnam]. *Journal of Hydro-environment Research*, 11, 59–74.
- [2] Magrin, G., Marengo, J., Boulanger, J., et al. (2015) Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Contribución del Grupo de Trabajo II al Quinto Reporte de Asesoramiento del Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático] En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability* [Cambio climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad]. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [3] Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., et al. (2015). Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century:

- model results and implications [Cambio climático impacta las descargas del río Rhone en Lyon al final del siglo XXI: Resultados de los modelos e implicaciones] *Regional Environmental Change*, 15, 505–515.
- [4] Abid, M., Schilling, J., Scheffran, J., et al. (2016) Climate change vulnerability, adaptation and risk perceptions at farm level in Punjab, Pakistan. [Vulnerabilidad, adaptación y percepción de riesgo por cambio climático al nivel de la granja en Punjab, Pakistan.] *Science of The Total Environment*, 547, 447–460.
  - [5] Peel, M.C., & Bloschl, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world [Modelando hidrografía en un mundo cambiante]. *Progress in Physical Geography*, 35, 249–261.
  - [6] Bastola, S., Murphy, C., & Sweeney, J. (2011) The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. [El papel que juegan las incertidumbres del cambio climático en los modelos hidrológicos en el asesoramiento de cuencas de almacenamiento de los ríos irlandeses] *Advances in Water Resources*, 34, 562–576.
  - [7] Francés, F., & Bussi, G. (2014) Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *Revista Iberoamericana del Agua*, 1, 14–25.
  - [8] Prudhomme, C., & Davies, H. (2007) Comparison of different sources of uncertainty in climate change impact studies in Great Britain. [Comparación de diferentes fuentes de incertidumbre sobre el impacto del cambio climático en estudios ingleses.] En: *Climatic and Anthropogenic Impacts on the Variability of Water Resources* [Impactos Climáticos y Antropogénicos sobre la Variabilidad de los Recursos del Agua]. 90–183.
  - [9] Gosling, S. N., Taylor, R. G., Arnell, N.W., et al. (2011) A comparative analysis of projected impacts of climate change on river runoff from global and catchment-scale hydrological models. [Análisis comparativo de los impactos proyectados para el cambio climático sobre el escurrimiento del agua en modelos globales de almacenamiento hidrológico.] *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 279–294.
  - [10] Sá, E., Martins, H., Ferreira, J., et al. (2016) Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal. [Cambio climático e impacto de emisiones contaminantes sobre la calidad del aire en 2050 sobre Portugal.] *Atmospheric Environment*, 131, 209–224.
  - [11] Stoll, S., Hendricks Franssen, H.J., Butts, M., et al. (2011) Analysis of the impact of climate change on groundwater related hydrological fluxes: a multi-model approach including different downscaling methods. [Análisis del impacto del cambio climático sobre cambios hidrológicos relacionados con aguas almacenadas en el subsuelo: técnica del uso de modelos múltiples incluyendo métodos de rebaja] *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 21–38.
  - [12] Vrugt, J. A., Diks, C. G. H., Gupta, H. V., et al. (2005) Improved treatment of uncertainty in hydrologic modeling: Combining the strengths of global optimization and data assimilation. [Mejor trato de las

- incertidumbres en el modelaje hidrológico: Combinación de las fuerzas de la optimización global y la asimilación de datos.] *Water Resources Research*, 41, W01017.
- [13] Ajami, N. K., Duan, Q., & Sorooshian, S. (2007) An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction. [Una combinación integrada de modelos Bayésicos hidrológicos: Confrontando incertidumbres de datos, parámetros y estructuras de modelos en predicciones hidrológicas] *Water Resources Research*, 43, W01403.
- [14] Renard, B., Kavetski, D., Kuczera, G., et al. (2010) Understanding predictive uncertainty in hydrologic modeling: The challenge of identifying input and structural errors. [Entendiendo incertidumbre predictiva en modelos hidrológicos: Retos en identificar errores de datos y estructura.] *Water Resources Research*, 46, W05521.
- [15] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, IDEAM.
- [16] Arango, C., Dorado, J., Guzmán, D., et al. (2012) Cambio climático más probable para Colombia a lo largo del siglo XXI respecto al clima presente. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático, Subdirección de Meteorología, IDEAM, Bogota.
- [17] Thompson, J.R., Green, A.J., Kingston, D. G., et al. (2013) Assessment of uncertainty in river flow projections for the Mekong River using multiple GCMs and hydrological models. [Asesoramiento de incertidumbres en proyecciones del flujo del agua en el río Mekong, usando múltiples modelos hidrológicos] *Journal of Hydrology*, 486, 1–30.
- [18] Vansteenkiste, T., Tavakoli, M., Ntegeka, V., et al. (2014) Intercomparison of hydrological model structures and calibration approaches in climate scenario impact projections. [Comparación de estructura y calibración entre modelos hidrológicos de proyecciones de escenarios del impacto climático.] *Journal of Hydrology*, 519, 743–755.
- [19] Raghavan, S. V., Tue, V. M., Shie-Yui, L. (2014) Impact of climate change on future stream flow in the Dakbla river basin. [Impacto del cambio climático sobre el flujo futuro en la cuenca del río Dakbla] *Journal of Hydroinformatics*, 16, 231–244.
- [20] Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., et al. (2014) Multimodel assessment of water scarcity under climate change. [Asesoramiento de la falta de agua bajo condiciones de cambio climático] *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 111, 3245–3250.
- [21] Li, H., Luo, L., Wood, E. F., et al. (2009) The role of initial conditions and forcing uncertainties in seasonal hydrologic forecasting. [La función de condiciones iniciales y forzando incertidumbres en predicciones hidrológicas para estaciones] *Journal of Geophysical Research*, 114, D04114.
- [22] Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., & Gasse, F. (2003) Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in Tropical Africa: Case study South Central Ethiopia. [Respuesta hidrológica de almacenamiento de agua con cambios el el clima y el uso de la tierra en el Africa tropical: Caso de estudio en el surcentro de Etiopia] *Journal of Hydrology*, 275, 67–85.
- [23] Montenegro, S., & Ragab, R. (2012) Impact of possible climate and land use changes in the semi-arid regions: A case study from North Eastern Brazil. [Impacto de cambios de clima y uso de tierras en regiones semiáridas: Estudio del caso para el Noreste de Brasil] *Journal of Hydrology*, 434, 55–68.
- [24] Molina-Navarro, E., Hallack-Alegría, M., Martínez-Pérez, S., et al. (2016) Hydrological modeling and climate change impacts in an agricultural semiarid region. Case study: Guadalupe River basin, Mexico. [Modelaje hidrológico e impacto del cambio climático sobre una region semiárida agricultora. Estudio de caso en la cuenca del río Guadalupe, Mexico] *Agricultural Water Management*, 175, 29–42.
- [25] Herrera-Pantoja, M., Hiscock, K. M. (2015) Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. [Impactos proyectados debido al cambio climático sobre indicadores del agua usable en una region semi-árida de Mexico central] *Environmental Science & Policy*, 54, 81–89.
- [26] Najafi, M. R., & Moradkhani, H. Multi-model ensemble analysis of runoff extremes for climate change impact assessments. [Análisis de múltiples modelos juntos para determinar los extremos del desague en asesoramientos de cambio climático] *Journal of Hydrology*, 525, 352–361.
- [27] Karlsson, I. B., Sonnenborg, T. O., Refsgaard, J. C., et al. (2016) Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. [Efectos combinados de modelos climatológicos, estructuras de modelos hidrológicos y escenarios del uso del terreno sobre los impactos hidrológicos debido al cambio climático] *Journal of Hydrology*, 535, 301–317.
- [28] Dams, J., Nossent, J., Senbeta, T.B., et al. (2015) Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. [Asesoramiento con múltiples modelos para determinar el impacto del cambio climático sobre escurrimiento] *Journal of Hydrology*, 529, 1601–1616.
- [29] Fry, L. M., Watkins, D. W., Reents, N., et al. (2012) Climate change and development impacts on the sustainability of spring-fed water supply systems in the Alto Beni region of Bolivia. [Cambio climático y el impacto de construcción sobre la sustentabilidad del almacenamiento de aguas provenientes de fuentes naturales en la región del alto Beni en Bolivia] *Journal of Hydrology*, 468, 120–129.
- [30] García-González, M. L., Carvajal-Escobar, Y., & Jiménez-Escobar, H. (2007) La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería y Competitividad*, 9, 19–29.
- [31] Pabón J. D. (2012) Cambio climático en Colombia: tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista Academia Colombiana Ciencias*, 36, 261–278.
- [32] García, M.C., Piñeros, A.B., Bernal, F.A., et al. (2012) Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 0, 60–64.

- [33] Montoya, A. F. H., & Sánchez, Ó. J. M. Climate change and space-time variability of precipitation in Colombia. [Cambio climático y la variabilidad de precipitación dependiendo del espacio y tiempo en Colombia] (2015) *Revista EIA*, 12, 131–150.
- [34] Rodríguez, E. A., González, R. A., Medina, M. P., et al. (2007) Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del río Las Ceibas, Neiva-Huila. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 0, 65–78.
- [35] Córdova, J.R., & Camacho, R. (2013) Estimación del efecto del cambio climático sobre la cuantificación del recurso hídrico, en la cuenca del Río Suaza, tributario del río Magdalena, Huila. Abt asociados. Informe final. Bogotá, Colombia.
- [36] Forni, L.G., Galaiti, S.E., Mehta, V.K., et al. (2016) Exploring scientific information for policy making under deep uncertainty. *Environmental Modelling & Software*, 86, 232–247.
- [37] Labrador, A. F., Zúñiga, J. M., & Romero, J. (2016) Desarrollo de un modelo para la planificación integral del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica del Río Aipe, Huila, Colombia. *Revista Ingeniería y Región*, 15, 23–35.
- [38] Gobernación del Huila. (2014) Plan de cambio climático Huila 2050: Preparándose para el cambio climático, Neiva, Huila. disponible en: <http://www.planhuila2050.com/>.
- [39] Thomas, H. A. (1981) *Improved Methods for National Water Assessment*. Report, Contract: WR15249270. US Water Resource Council, Washington, DC.
- [40] Restrepo, J.D., Kjerfve, B., Hermelin, M., et al. (2006) Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. *Journal of Hydrology*, 316, 213–232.
- [41] Turc, L. (1961) Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climatic formula evolved up to date. [Estimación de requerimientos de irrigación del agua y potencial de evapotranspiración: Una fórmula climática simple, evolucionada hasta hoy] *Journal of Ann. Agron.*, 12, 13–14.
- [42] Martínez, G. F., & Gupta, H. V. (2010) Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the “abcd” monthly water balance model for the conterminous United States. [Hacia la mejor identificación de modelos hidrológicos: Una evaluación diagnóstica del modelo “abcd” para el balance mensual del agua continental en EUA.] *Water Resources Research*, 46, W08507.
- [43] Freer, J., Beven, K., & Ambrose, B. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: An application of the GLUE approach. [Estimación Bayesiana en predicción de incertidumbre en el escurrimiento y el valor de datos: Una aplicación del GLUE.] (1996) *Water Resources Research*, 32, 2161–2173.
- [44] Beven, K., & Freer, J. (2001) Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. [Equifinalidad, asimilación de datos, y estimación de incertidumbre en modelaje mecanístico de sistemas complejos medioambientales usando la metodología del GLUE] *Journal of Hydrology*, 249, 11–29.
- [45] Wagener, T., & Kollat, J. (2007) Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox [Evaluación numérica y visual de modelos hidrológicos y del medio ambiente, usando la caja de instrumentos Monte Carlo]. *Environmental Modelling & Software*, 22, 1021–1033.
- [46] Metropolis, N., & Ulam, S. (1949) The Monte Carlo Method [El método Monte Carlo]. *Journal of the American Statistical Association*, 44, 335–341.
- [47] Nash, J.E., & Sutcliffe, J.V. (1970) River flow forecasting through conceptual models Part I. A discussion of principles [Parte I: Predicción del flujo de ríos a través de modelos conceptuales: Una discusión de principios]. *Journal of Hydrology*, 10, 282–290.
- [48] Yapo, P. O., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (1996) Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data [Calibración automática de modelos conceptuales de lluvia y escurrimiento: sensibilidad a datos de calibración]. *Journal of Hydrology*, 181, 23–48.
- [49] Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000) IPCC Special Report Emissions Scenarios [Reporte especial del IPCC de escenarios de emisiones] Summary for Policymakers Emissions Scenarios, Cambridge, UK.
- [50] Henríquez-Daza, M. (2012) Climatología ambiental de Colombia: una guía sobre la relación clima-ambiente para los estudiantes y profesionales de las carreras ambientales. Universidad Santo Tomás, Departamento de Publicaciones.
- [51] Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., et al. (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated [Mapamundi actualizado de la clasificación climática Köppen-Geiger]. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263.
- [52] Gupta, H. V, Wagener, T., & Liu, Y. (2008) Reconciling theory with observations: elements of a diagnostic approach to model evaluation [Reconciliando la teoría con las observaciones: elementos diagnósticos en la evaluación de modelos]. *Hydrological Processes*, 22, 3802–3813.
- [53] Vrugt, J. A., & Sadeh, M. (2013) Toward diagnostic model calibration and evaluation: Approximate Bayesian computation [Hacia la calibración y evaluación de modelos diagnósticos: Computación aproximada Bayesiana]. *Water Resources Research*, 49, 4335–4345.
- [54] Weiland, F. C., Vrugt, J. A., Beek, R. A., et al. (2015) Significant uncertainty in global scale hydrological modeling from precipitation data errors [Incertidumbre significativo en el modelaje hidrológico a escala global, debido a errores de datos de precipitación]. *Journal of Hydrology*, 529, 1095–1115.
- [55] Beven, K. (2006) A manifesto for the equifinality thesis [Un manifiesto para la tesis de equifinalidad]. *Journal of Hydrology*, 320, 18–36.
- [56] Duan, Q., et al. (2006) Model Parameter Estimation Experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshops [El experimento de estimación de parámetros



- del modelo MOPEX: Una revisión de estrategias científicas y resultados mayores provenientes de la segunda y tercera sesión de trabajo]. *Journal of Hydrology*, 320, 3–17.
- [57] Laloy, E., & Vrugt, J., A. (2012) High-dimensional posterior exploration of hydrologic models using multiple-try DREAM (ZS) and high-performance computing [Exploración posterior de modelos hidrológicos usando ensayos múltiples DREAM (ZS) y computación a nivel alto]. *Water Resources Research*, 48, W01526.
- [58] Sadegh, M., & Vrugt, J. A. (2014) Approximate Bayesian Computation using Markov Chain Monte Carlo simulation: DREAM<sub>(ABC)</sub> [Computación Bayésica aproximada usando la cadena Markov del simulacro Monte Carlo: DREAM<sub>(ABC)</sub>]. *Water Resources Research*, 50, 6767–6787.
- [59] Schoups, G., & Vrugt, J. A. (2010) A formal likelihood function for parameter and predictive inference of hydrologic models with correlated, heteroscedastic, and non-Gaussian errors [Una función formal de probabilidad para inferencia predictiva y parámetros, con errores corelacionados no Gáusicos]. *Water Resources Research*, 46, W10531.
- [60] Schaefer, B., Gupta, H. V. (2007) Do Nash values have value? [Los valores Nash tienen valor?]. *Hydrological Processes*, 21, 2075–2080.
- [61] Seibert, J., & McDonnell, J. J. (2002) On the dialog between experimentalist and modeler in catchment hydrology: Use of soft data for multicriteria model calibration [Acerca del diálogo entre el experimentalista y el modelador en hidrología de captura de aguas: El uso de datos suaves para la calibración del modelo de múltiples criterios]. *Water Resources Research*, 38, 23–14.
- [62] Kim, J., Mohanty, B. P., & Shin, Y. (2015) Effective soil moisture estimate and its uncertainty using multimodel simulation based on Bayesian Model Averaging [Estimados efectivos para la humedad de los suelos y su incertidumbre usando simulaciones multimodelos basados en el promedio de modelos Bayésicos]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120, 8023–8042.
- [63] Demaria, E. M., Nijssen, B., Wagener, T. (2007) Monte Carlo sensitivity analysis of land surface parameters using the Variable Infiltration Capacity model [El análisis de parámetros del suelo “Monte Carlo” usando el modelo de variabilidad de capacidad de infiltración]. *Journal of Geophysical Research*, 112, D11113.
- [64] Romero, C. J., Chavarro, J. I., Garrido, A., et al. (2014) Performance evaluation of irrigation techniques through the implementation of a fuzzy logic system [Evaluación de técnicas de irrigación usando un sistema de lógica]. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9, 1087–1093.
- [65] Del Moral, L., Arrojo, P., & Herrera, T. (2015) El agua: Perspectiva ecosistémica y gestión integrada, Zaragoza: Fundación Nueva Cultura del Agua. disponible en: <https://fnca.eu/biblioteca-del-agua/directorio/file/2767?search=1>.
- [66] Martínez-Fernández, J., Esteve-Selma, M.A., Baños-González, I., et al. (2013) Sustainability of Mediterranean irrigated agrolandscapes [Sustentabilidad de ambientes agricultores irrigados en el Mediterráneo]. *Ecological Modelling*, 248, 11–19.
- [67] Baños González, I., Martínez Fernández, J., Esteve Selma, M. (2014) Simulación dinámica de sistemas socio-ecológicos: sostenibilidad en Reservas de la Biósfera. *Revista Ecosistemas*, 22, 74–83.
- [68] Baños-González, J., Martínez-Fernández, M. A., & Esteve-Selma, M. (2016) Using dynamic sustainability indicators to assess environmental policy measures in Biosphere Reserves [Usando indicadores dinámicos de sustentabilidad para analizar medidas de políticas del medio ambiente en reservas de la biósfera]. *Ecological Indicators*, 67: 565–576.
- [69] Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000) Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods [Hacia la mejor calibración de modelos hidrológicos: Combinando fuerzas de los métodos manuales y automáticos]. *Water Resources Research*, 36, 3663–3674.
- [70] Monastersky, R. (2015) Anthropocene: The human age [Antropoceno: La edad de los humanos]. *Nature*, 519, 144–147.
- [71] Giesen, E. (2009) Voces del sur para la justicia climática, Chimaltenango, Guatemala: CEIBA - Amigos de la Tierra Guatemala. disponible en: <http://otrosmundoschiapas.org/index.php/temas-analisis/28-28-cambio-climatico/764-libro-voces-del-sur-para-la-justicia-climatica>.
- [72] Romero-Cuéllar, J., Obregón, N. N., Torrente, T. A., et al. (2013) Acople de un modelo de conductancia estomática, fotosíntesis y transpiración para el cultivo de maracuyá (*Passiflora edulis Sims*). *Acta Agronómica*, 62, 42–51.
- [73] La Roca, F., & Ferrer, G. (2010) The Water Framework Directive observatory: an assessment of the WFD implementation process in Spain. Ambientalia [El observatorio del “Water Framework Directive” (WFD): evaluación del proceso de implementación del directivo WFD en España]. *Revista Interdisciplinaria de las Ciencias Ambientales*, 1, 1–26.