

Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá¹

Recharge Estimation in Aquifers of the Bogota Savannah²

Estimativa do reabastecimento médio anual em los aquíferos da savana de Bogotá³

Federico Antonio-Fragala⁴
Nelson Obregón-Neira⁵

¹ Fecha de recepción: 3 de abril de 2010. Fecha de aceptación: 28 de septiembre de 2010. Este artículo se deriva del proyecto de investigación con financiación interna denominado *Simulación estocástica espacial en los acuíferos de la sabana de Bogotá* (registro No. 000938), desarrollado por el grupo de investigación Hidrociencias de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

² Submitted on April 3, 2010. Accepted on September 28, 2010. This article is derived from the research project *Spatial Stochastic Simulation in Aquifers of the Bogota Savannah*, registration number 000938, developed by the research group Hidrociencias and funded by Pontificia Universidad Javeriana, Bogota, Colombia.

³ Data de recepção: 3 de abril de 2010. Data de aceitação: 28 de setembro de 2010. Este artigo deriva do projeto de pesquisa com financiamento interno denominado *Simulação estocástica espacial nos aquíferos da Savana de Bogotá* (registro No. 000938), desenvolvido pelo grupo de pesquisa de Ciências Hídricas da Pontificia Universidade Javeriana, Bogotá, Colômbia.

⁴ Ingeniero Scienze Geologiche, Università di Catania, Italia. Máster en Hidrología General y Aplicada, CEDEX, Madrid, España. PhD in Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Reino Unido. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: fragala@javeriana.edu.co.

⁵ Ingeniero civil, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia. Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. PhD en Hidrología, University of California at Davis, Estados Unidos. Profesor titular, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: nobregon@javeriana.edu.co.

Resumen

La recarga es un factor clave para la sostenibilidad de los acuíferos. Debido al aumento de la demanda de agua y al cambio climático, existe un interés creciente en los recursos hídricos subterráneos de la sabana de Bogotá. En esta región los estudios de recarga se han enfocado en técnicas de balance hídrico del suelo basadas en la metodología de la FAO para la estimación de la evapotranspiración real. Este trabajo, en cambio, aplica un modelo parsimonioso de balance hídrico y calibra sus parámetros a través de la minimización de la función error entre caudales observados y simulados. Los resultados de la modelación indican que la recarga depende de la subcuenca analizada y que su promedio es de 112 mm/año, que se compara al rango de valores (8-81 mm/año) obtenidos en estudios previos. Esta investigación sugiere que se necesita prudencia cuando las decisiones sobre la sostenibilidad de los recursos hídricos se basan en una única metodología para la estimación de la recarga y que más de una técnica es recomendable.

Palabras clave

Acuíferos-sabana de Bogotá (Colombia), balance hídrico (hidrología)-sabana de Bogotá (Colombia), aguas subterráneas-sabana de Bogotá (Colombia).

Abstract

Recharge is a key factor for the sustainability of aquifers. In the Bogota Savannah there is an increasing interest in groundwater resources because of both the increase in water demand and climate change. Even though recharge studies in this region have traditionally focused on soil water balance approaches based on the use of the FAO methodology for determining actual evapotranspiration levels, this work applies a frugal monthly water balance model and calibrates its lumped parameters through minimization of the error function between observed and simulated discharges in each hydrological basin. Model results indicate that recharge depends on the basin analyzed, and that the average model recharge in the Bogota Savannah is 112 mm yr⁻¹, which is compared to the range of 8-81 mm yr⁻¹ found in previous studies. This study suggests that caution should be used when decisions on the sustainability of groundwater resources in the Bogotá plain are based on a recharge estimate obtained from a single methodology, and that a multiple technique approach is recommended.

Key words

Aquifers - Sabana de Bogotá (Colombia), Water balance (Hydrology) - Sabana de Bogotá (Colombia), Groundwater - Sabana de Bogotá (Colombia)

Resumo

O reabastecimento é um fator chave para a sustentabilidade dos aquíferos. Devido ao aumento da demanda de água e a mudança climática, existe um interesse crescente nos recursos hídricos subterráneos da savana de Bogotá. Nesta região os estudos de reabastecimento tem sido enfocados em técnicas de balanço hídrico do solo baseadas na metodologia da FAO para a estimativa da evapotranspiração real. Este trabalho, ao contrário, aplica um modelo parcimonioso de balance hídrico e calibra seus parâmetros através da minimização da função erro entre caudais observados e simulados. Os resultados da modelagem indicam UE o reabastecimento depende da sub-bacia analisada e que sua média de 112 mm/ano, que é comparável á faixa de valores (8-81 mm/ano) obtidos em estudos anteriores. Esta pesquisa sugere que é preciso ter prudência quando as decisões sobre a sustentabilidade dos recursos hídricos baseiam-se em uma única metodologia para a estimativa de reabastecimento e que o uso de mais de uma técnica é recomendável.

Palavras chave

Acuíferos-savana de Bogotá (Colômbia), balanço hídrico (hidrologia)-savana de Bogotá (Colômbia), águas subterráneas-savana de Bogotá (Colômbia).

Introducción

En hidrogeología, la recarga se define como el flujo de agua que llega a la zona saturada (el acuífero); así forma un volumen de agua que se adiciona a la reserva de agua subterránea (Lerner et al., 1990). La recarga es una importante componente del ciclo hidrológico, pues de esa depende el volumen de recursos hídricos subterráneos renovables. Zhou (2009), sin embargo, precisa que el desarrollo sostenible de los recursos hídricos subterráneos depende no solamente de la recarga, sino de la zona de captura inducida por los bombeos de aguas subterráneas.

Existen diferentes métodos para la estimación de la recarga y una descripción exhaustiva de ellos se encuentra en Scanlon et al. (2002). Estudios en áreas relativamente húmedas de Estados Unidos (Delin y Risser, 2007) han demostrado que no existe metodología alguna que se pueda definir como la más apropiada para la estimación de la recarga y la aplicación de diferentes técnicas. No obstante, Delin et al. (2007) reconocen que es difícil tener suficientes datos de buena calidad para aplicar más de dos o tres métodos. En el contexto mundial, varias aglomeraciones urbanas y rurales dependen en grandes proporciones de las aguas subterráneas. Este es el caso de Ciudad de México, Lima, el Avra Valley y el San Joaquin Valley, en Arizona, por citar sólo unos cuantos ejemplos. En zonas rurales las aguas subterráneas representan a menudo los únicos recursos hídricos aprovechables localmente.

La sabana de Bogotá, con una población de cerca de diez millones de habitantes, es el centro agroindustrial más importante del país, cuya demanda hídrica es atendida principalmente por los sistemas del río Bogotá y del macizo de Chingaza (Vargas et al., 2008). De acuerdo con el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas, 2002), la explotación de aguas subterráneas se ha intensificado progresivamente en los últimos quince años debido al desarrollo agroindustrial; además, el aprovechamiento de aguas subterráneas para consumo humano también se ha incrementado, ya que los recursos hídricos superficiales son insuficientes para satisfacer la creciente demanda, especialmente en épocas de verano prolongado. La extracción de aguas subterráneas se ha

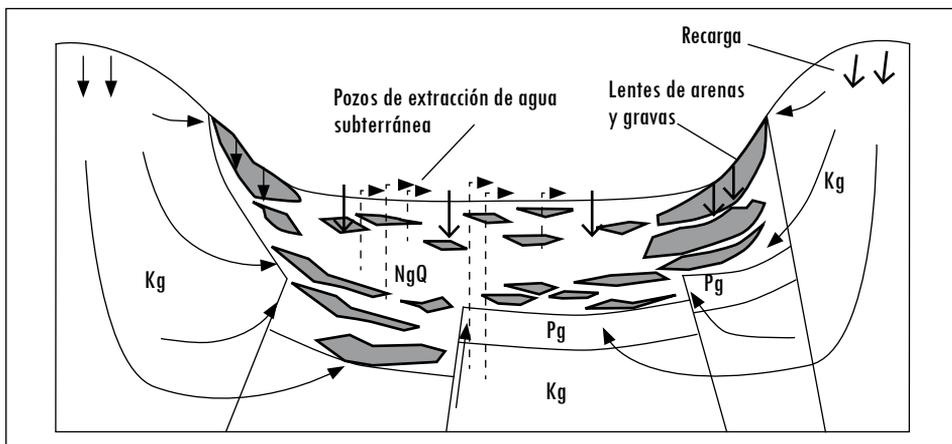
concentrado en el occidente del área de estudio, sobre todo en los municipios de Funza, Facatativá, Madrid, Tenjo y Mosquera.

En este contexto, la estimación de la recarga natural a los acuíferos resulta un tema de suma prioridad en hidrogeología, bien sea por sus implicaciones socioeconómicas o por su inherente incertidumbre científica. Varias entidades como Japan International Cooperation Agency-Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (JICA-EAAB, 2003), Ingeominas (2002), la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (Castro et al., 2003) y el Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA, 2000) han realizado estudios sobre la recarga en los acuíferos de la sabana de Bogotá que han alimentado debates sobre el modelo hidrogeológico conceptual de la región y la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos renovables. Los objetivos de este artículo son estimar la recarga directa media anual en la sabana de Bogotá mediante la calibración de un modelo de balance hídrico y discutir los resultados a la luz de estudios anteriores, especialmente el realizado por (JICA-EAAB, 2003).

1. Características hidrogeológicas del área de estudio

La sabana de Bogotá, que incluye la cuenca alta del río Bogotá, es una cuenca intramontana de origen tectonosedimentario, en la cual se han identificado diferentes complejos hidrogeológicos (Figura 1). Cortes geológicos realizados por Ingeominas (2000), respaldados por datos de pozos y geofísicos, muestran que en varias zonas el complejo Guadalupe estaría en contacto directo con el complejo neógeno-cuaternario.

Figura 1. Corte hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá



NgQ: complejo acuífero neógeno-cuaternario; Pg: complejo acuífero del paleógeno; Kg: complejo acuífero Guadalupe.

Fuente: adaptado de (Ingeominas, 2002).

El complejo acuífero Guadalupe —constituido prevalentemente por areniscas cuarzosas con menores proporciones de lilitas, limolitas y arcillositas— es el más productivo y es un acuífero artesiano, donde las áreas de recarga se identifican con sus afloramientos —se destacan los cerros orientales de la sabana de Bogotá—. Por otra parte, el complejo acuífero neógeno-cuaternario se compone de sedimentos no consolidados, esencialmente arcillas y limos con lentes de arenas y gravas, y recibe una recarga directa limitada. Esta aumenta hacia los bordes de la planicie, donde los depósitos cuaternarios son generalmente más permeables.

Según Ingeominas (2002), la extracción de aguas subterráneas en la sabana de Bogotá históricamente se ha realizado de manera descontrolada, lo cual ha producido importantes descensos en los niveles acuíferos, con la consecuente desaparición de manantiales y disminución de niveles en ríos, quebradas y humedales; además, un incremento del costo de energía, debido a la necesidad de aumentar las profundidades de bombeo. De Bermoudes y Quiroz (2002) e Ingeominas (2002) han identificado como zonas de descarga de aguas subterráneas del complejo acuífero artesiano de Guadalupe los manantiales y limitadamente las corrientes superficiales de la zona de piedemonte. JICA-EAAB (2003) ha desarrollado un modelo numérico de los acuíferos de la sabana de Bogotá, en el cual la salida de aguas subterráneas de la sabana de Bogotá se realiza en el sector suroccidental, hacia el río Magdalena. Las otras salidas están representadas esencialmente por la extracción de agua subterránea.

Contrario a JICA-EAAB, que identifica una diferente forma de descarga del agua subterránea, el modelo conceptual de la sabana de Bogotá propuesto por Rodríguez (1986) es el de una cuenca hidrogeológica cerrada, saturada de agua, con una infiltración tendiente a cero, es decir, la recarga tiende a cero. De otra opinión es Loboguerrero-Uscátegui (1992), que considera que el acuífero Guadalupe no sigue saturado de agua, ya que se están agotando sus reservas, como se demuestra en los descensos de niveles en los pozos de Madrid y Facatativá.

Trabajos recientes han adaptado técnicas de balance hídrico del suelo que se apoyan en la metodología de la Organización para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para la estimación de la evapotranspiración real. Dichas técnicas utilizan datos de precipitación y caudal observado (o estimado) en el río como datos de entrada. Los resultados de estos estudios se resumen en la Tabla 1. Las diferencias en la estimación de la recarga anual pueden deberse parcialmente a las diferentes bases de cálculo utilizadas (JICA-EAAB, 2003).

Tabla 1. Comparación de la recarga anual

	JICA	Ingeominas	DAMA*	CAR
Recarga (mm/año)	81	30	13	8

* El estudio de recarga cubre un área de 2.184 km².

Nota: Los valores originales de JICA (72 mm/año) e Ingeominas (31 mm/año) se han recalculado teniendo en cuenta las áreas de las subcuencas (promedio ponderado).

Fuente: adaptado de (Vargas et al., 2008).

En un estudio realizado por el DAMA (2000), la firma Hidrogeocol Ltda. realizó también un balance hídrico del suelo para estimar la evapotranspiración real. En este estudio la infiltración real, es decir, la recarga (Rg en el modelo *abcd*), fue determinada como un porcentaje de la infiltración potencial mediante un modelo que considera la pendiente y permeabilidad del terreno y el tipo de cobertura del suelo. Se encontró que la infiltración real fluctuaba entre valores cercanos a cero en la zona plana arcillosa, hasta valores de 200-250 mm/año en las áreas montañosas (DAMA, 2000).

El modelo hidrogeológico conceptual propuesto por Rodríguez (1986) se sustentaría en la recarga de 8 mm/año estimada por la CAR (Castro et al., 2003) y de 13 mm/año del DAMA (2000). Estas tasas son más típicas de climas semiáridos, donde la recarga es del orden de unos pocos milímetros por año. Scanlon et al. (2002) consideran que los métodos de balance hídrico tienen limitaciones cuando la magnitud de la recarga es pequeña, en comparación con otras variables hidrológicas, especialmente la evapotranspiración real, y la recarga puede verse afectada por errores en la medida o estimación de estas variables. En la región, la precipitación media anual es de aproximadamente 800 mm/año y la evapotranspiración real es del orden de unos 350-450 mm/año, que es una cantidad grande cuando la comparamos con la recarga estimada por la CAR y el DAMA.

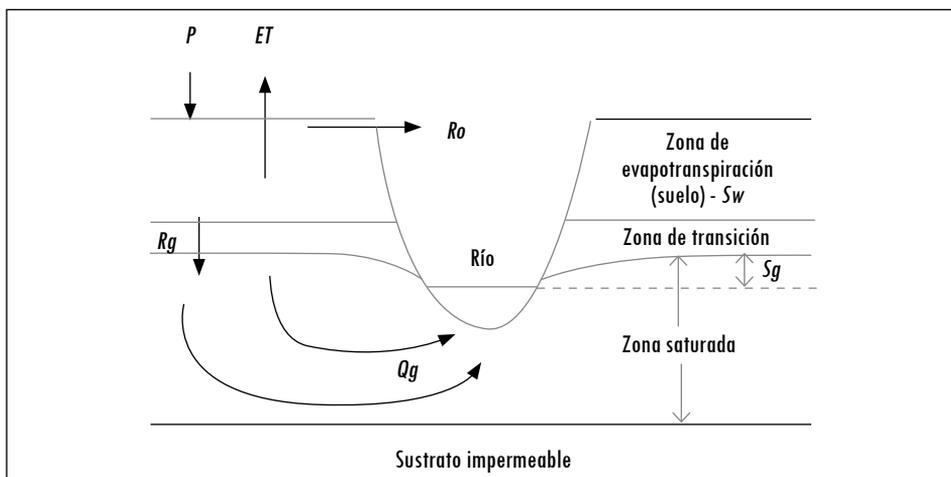
2. Metodología

2.1 Modelo *abcd*

El modelo *abcd* (Thomas, 1981; Thomas et al., 1983; Alley, 1984; Serrano, 1998; Obregón et al., 2002; Fragalá y Obregón, 2002) es un modelo de balance hídrico de carácter agregado y de cuatro parámetros. Este considera dos compartimentos para el análisis del balance hídrico: el suelo o zona de evapotranspiración, con almacenamiento S_w , y la zona saturada, con almacenamiento S_g (Figura 2). Por

efectos de modelación, la componente de flujo subsuperficial en la parte superficial de la zona de evapotranspiración se puede incluir en la escorrentía directa (R_o). El modelo considera despreciable el flujo lateral profundo (Q_{lat}) en la zona no saturada, de tal forma que la recarga potencial (infiltración según Thomas) es igualada a la recarga real (R_g).

Figura 2. Conceptualización del modelo *abcd*



Fuente: adaptado de (Fragalá y Obregón, 2003).

De esta forma, aplicando la ecuación de continuidad a un volumen de control Sw tenemos:

$$P_i - ET_i - R_{g_i} - R_{o_i} = \Delta Sw = Sw_i - Sw_{i-1} \tag{1}$$

Donde P_i es la precipitación; ET_i , la evapotranspiración real; R_{g_i} , la recarga; R_{o_i} , la escorrentía directa; ΔSw , el cambio en el almacenamiento del suelo entre el período de cálculo i (Sw_i) y el período inmediatamente anterior (Sw_{i-1}). Thomas (1981) y Thomas et al. (1983) definen, además, las variables W_i (agua disponible) e Y_i como:

$$W_i = P_i + Sw_{i-1} \tag{2}$$

$$Y_i = ET_i + R_i + Sw_i \tag{3}$$

En cada intervalo de tiempo se asume que la humedad disminuya según la siguiente ley de decaimiento exponencial, asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo Y_i , donde ETP_i es la evapotranspiración potencial y $b(L)$ es un parámetro del modelo:

$$Sw_i = Y_i e^{-\frac{ETP_i}{b}} \quad (4)$$

Thomas (1981) define la variable de estado Y_i como una función no lineal del agua disponible según los parámetros a (adimensional) y b :

$$Y_i = \frac{W_i + b}{2a} - \left[\left(\frac{W_i + b}{2a} \right)^2 - \frac{W_i b}{a} \right]^{0,5} \quad (5)$$

Donde a y b son parámetros que se determinan a partir de mediciones de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo en la cuenca. Esta función asegura que $Y_i \leq W_i$, $Y_i'(0) = 1$ y $Y_i'(\infty) = 0$ (Alley et al., 1984).

El límite superior de Y_i es representado por el parámetro b . Thomas et al. (1983) hacen notar que, a excepción de estas propiedades, la función Y_i no tiene algún significado particular. Entonces, al sustituir las ecuaciones (5) y (6) en la (4) se obtiene:

$$W_i - Y_i = Ro_i + Rg_i \quad (6)$$

Para diferenciar la escurrentía de la recarga se asume un coeficiente de reparto c :

$$Ro_i = (1 - c)(W_i - Y_i) \quad (7)$$

$$Rg_i = c(W_i - Y_i) \quad (8)$$

El caudal subterráneo (Qg_i), es decir, aquella fracción del caudal observado en el río que proviene del almacenamiento en la zona saturada (Sg_i), es:

$$Qg_i = d Sg_i \quad (9)$$

El almacenamiento Sg_i tiene que interpretarse como un almacenamiento dinámico, expresión de la conectividad entre el río y el acuífero (Figura 2).

Por lo tanto, al aplicar la ecuación de continuidad a un volumen de acuífero de almacenamiento Sg_i , tenemos:

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg_i = Sg_i - Sg_{i-1} \quad (10)$$

Donde ΔSg_i es el cambio en almacenamiento de la zona saturada y Sg_{i-1} es el almacenamiento de aguas subterráneas en el período inmediatamente anterior. Al sustituir la ecuación (9) en la (10) y resolver por Sg_i , tenemos:

$$Sg_i = \frac{Rg_i + Sg_{i-1}}{d + 1} \quad (11)$$

El caudal total, es decir, el caudal observado en el río, es:

$$Qs_i = Ro_i + Qg_i \quad (12)$$

De acuerdo con Thomas et al. (1983), los parámetros a , b , c , y d se pueden interpretar de la siguiente forma:

a ($0 < a \leq 1$): “refleja la tendencia de la escorrentía a ocurrir antes de que el suelo esté completamente saturado”. Valores de a menores a 1 generan escorrentía cuando $W_i < b$ (Alley et al., 1984).

b : es el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y la humedad del suelo.

c : es la fracción del caudal promedio del río que proviene del agua subterránea.

d : es “el recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea”.

En JICA-EAAB (2003), la expresión *recarga de agua subterránea* (total de infiltración del agua subterránea en el acuífero menos el flujo base) se refiere a la variación anual de almacenamiento en el acuífero según el modelo *abcd*, equivalente a la diferencia entre la recarga (Rg) y caudal subterráneo que descarga al río (Qg o flujo base). El modelo *abcd* asume un sistema hidrogeológico cerrado; sin embargo, en los sistemas hidrológicos analizados la diferencia $Rg - Qg$ puede producir descarga en la red de drenaje aguas abajo de la subcuenca modelada, a través de los depósitos cuaternarios, o puede convertirse en recarga al acuífero profundo (por ejemplo: complejo acuífero Guadalupe).

La recarga determinada por el modelo *abcd* no discrimina entre afloramientos del complejo acuífero neógeno-cuaternario y el complejo acuífero Guadalupe.

El modelo *abcd* es de carácter agregado y asume que la recarga estimada en cada subcuena es igualmente distribuida en toda la superficie de la subcuena. Sin embargo, es posible que en cada subcuena la recarga sea heterogénea, con las áreas de recarga preferencial coincidentes con las cabeceras de las subcuenas.

2.2 *Diseño experimental*

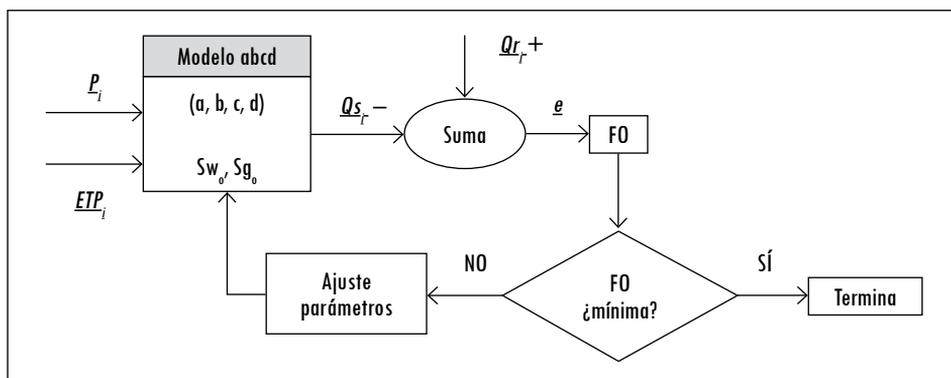
Las subcuenas modeladas, así como sus datos hidroclimatológicos medios mensuales (período de observación entre 5 y 30 años), son los mismos del estudio de JICA-EAAB (2003); sin embargo, el análisis de la calidad de estos datos va más allá del alcance de este trabajo. El modelo *abcd* requiere unos datos de entrada (P_i , PE_i), del valor de los cuatro parámetros (a , b , c y d), además del almacenamiento inicial en el suelo (Sg_o) y en el acuífero (Sg_a). Los parámetros del modelo no se conocen a priori; pero se sabe el valor del caudal mensual a la salida de cada subcuena (Qr_i). Por lo tanto, se pueden calcular los parámetros del modelo con base en su calibración automática (problema inverso), que busca la combinación óptima de parámetros que minimice la diferencia entre los caudales conocidos y los simulados por el modelo.

El esquema conceptual del problema inverso se ilustra en la Figura 3. El algoritmo de optimización utilizado fue la búsqueda exhaustiva (o fuerza bruta), mientras que la función objetivo utilizada fue la RSR (*RMSE-observations standard deviation ratio*; Moriasi et al., 2007), según la siguiente expresión:

$$FO = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (Qr_i - Qs_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{12} (Qr_i - Qr_{mean})^2}} \quad (13)$$

Donde Qr_{mean} es el promedio del caudal observado.

Figura 3. Esquema del proceso de calibración



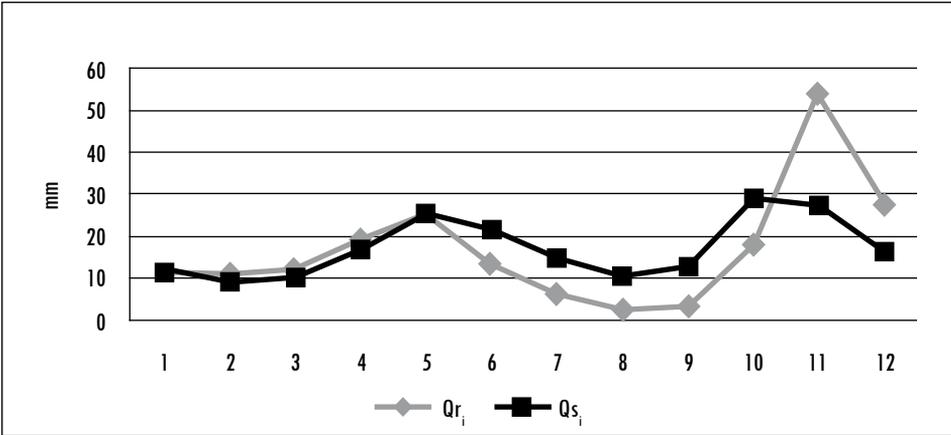
P_i : vector de precipitación; ETP_i : vector de evapotranspiración potencial; Qs_i : vector caudal simulado; Qr_i : vector caudal conocido a la salida de la subcuenca; e = vector error; FO: función objetivo.

Fuente: presentación propia de los autores.

3. Resultados

Los resultados de la calibración del modelo *abcd* se muestran en las figuras 4 a 13. Considerando todas las subcuencas, el promedio (ponderado por área de las subcuencas) de la diferencia entre recarga y el caudal subterráneo es de 112 mm/año. La recarga es comparativamente alta en las subcuencas de Subachoque y Neusa; baja en las subcuencas de Bojacá, Chicú y Tominé; mientras resulta moderada en las demás subcuencas. La comparación gráfica de los caudales conocidos y simulados indica que la calibración es aceptable en la mayoría de las subcuencas, a excepción de la subcuenca de Bojacá.

Figura 4. Subcuenca Bojacá

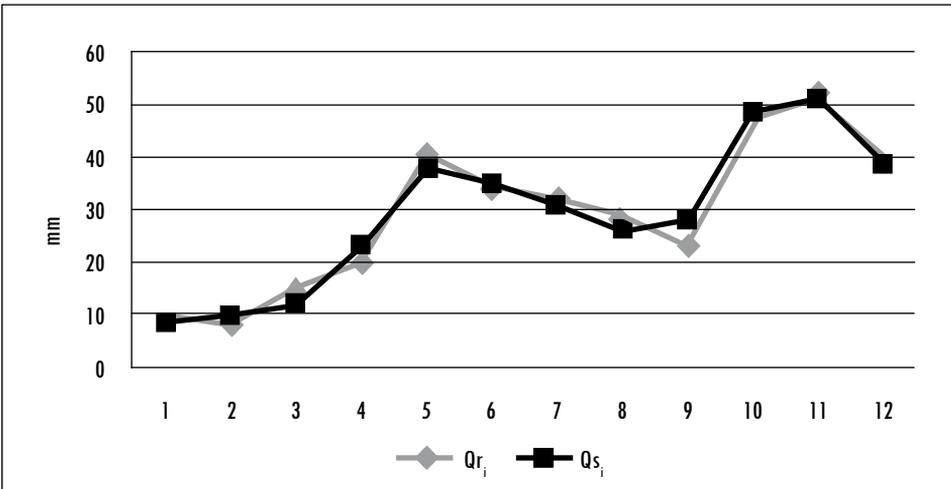


$a=0,95; b=215; c=0,00; d=0,95; Sw_0=100; Sg_0=10, Rg-Qg=-10.$
 $a=0,90; b=285; c=0,65; d=0,95; Sw_0=80; Sg_0=10, Rg-Qg=18.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 5. Subcuenca Chicú

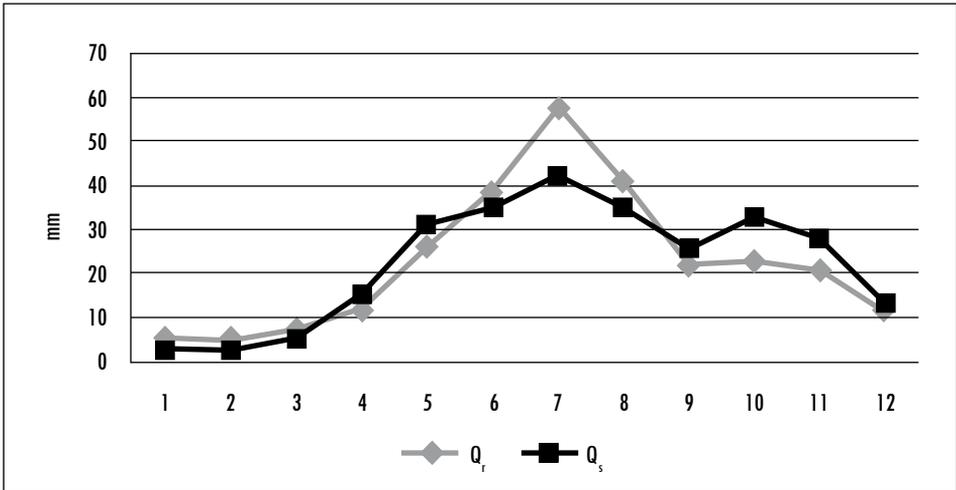


$a=0,95; b=215; c=0,00; d=0,95; Sw_0=100; Sg_0=10, Rg-Qg=-10.$
 $a=0,90; b=285; c=0,65; d=0,95; Sw_0=80; Sg_0=10, Rg-Qg=18.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 6. Subcuenca Chocontá



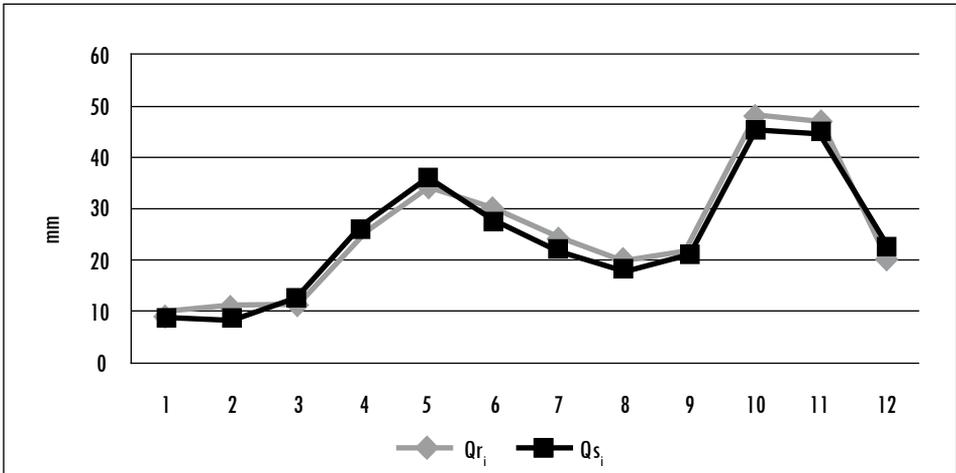
$a=0,95; b=215; c=0,20; d=0,00; Sw_o=80; Sg_o=0; Rg-Qg=68.$

$a=0,95; b=225; c=0,20; d=0,00; Sw_o=120; Sg_o=0; Rg-Qg=73.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b , Sw_o y Sg_o son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 7. Subcuenca Frío



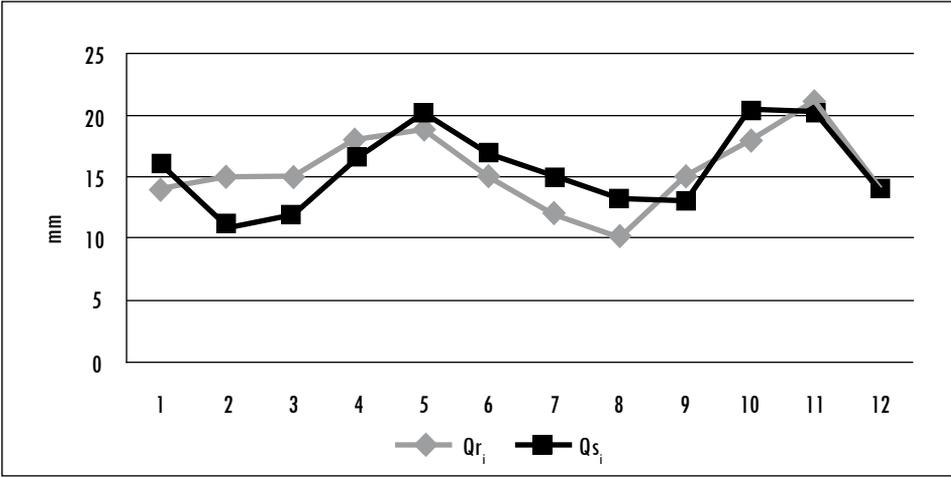
$a=0,95; b=215; c=0,20; d=0,00; Sw_o=80; Sg_o=0; Rg-Qg=68.$

$a=0,95; b=225; c=0,20; d=0,00; Sw_o=120; Sg_o=0; Rg-Qg=73.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b , Sw_o y Sg_o son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 8. Subcuenca Neusa

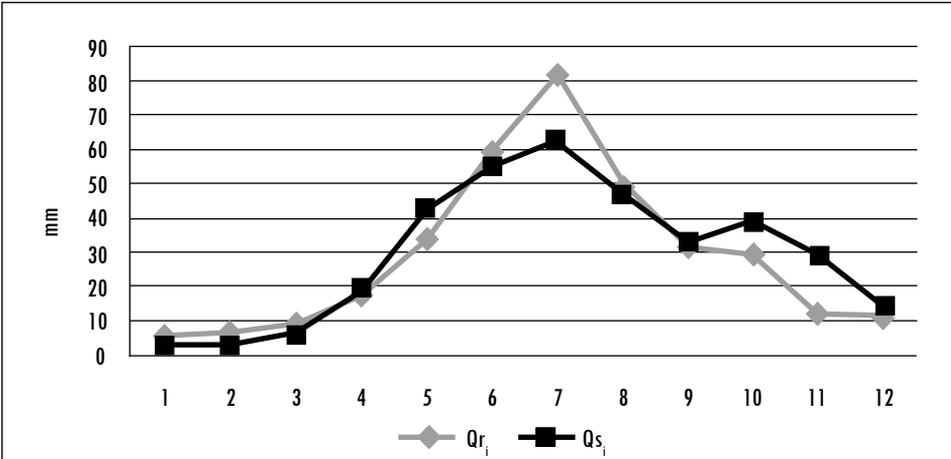


$a=0,85; b=345; c=0,65; d=0,00; Sw_0=220; Sg_0=0; Rg-Qg=351.$
 $a=0,95; b=185; c=0,10; d=0,00; Sw_0=70; Sg_0=0; Rg-Qg=39.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Q_{r_i} es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Q_{s_i} es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 9. Subcuenca Sisga

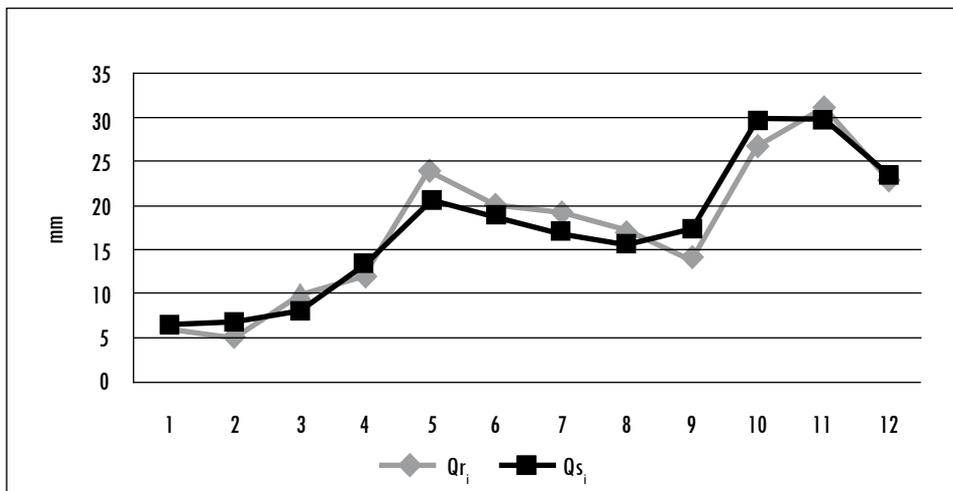


$a=0,85; b=345; c=0,65; d=0,00; Sw_0=220; Sg_0=0; Rg-Qg=351.$
 $a=0,95; b=185; c=0,10; d=0,00; Sw_0=70; Sg_0=0; Rg-Qg=39.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Q_{r_i} es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Q_{s_i} es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 10. Subcuenca Subachoque



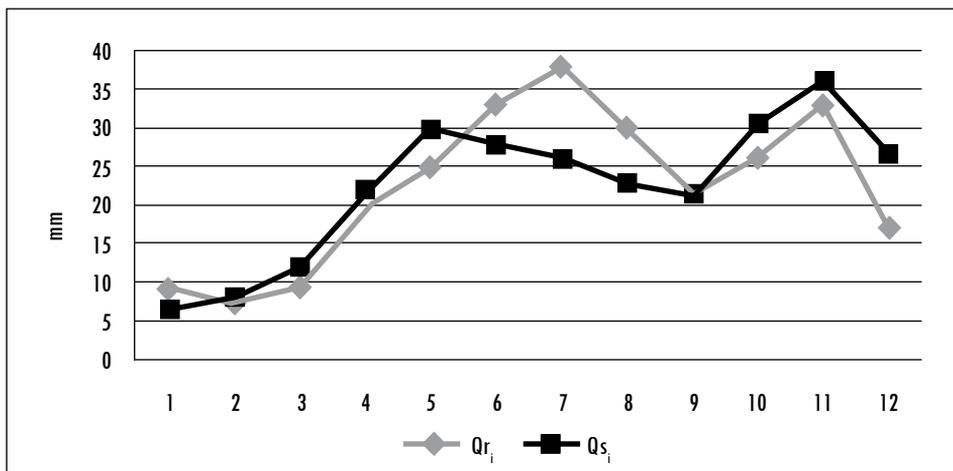
$a=0,90; b=350; c=0,65; d=0,05; Sw_o=160; Sg_o=0; Rg-Qg=210.$

$a=0,90; b=350; c=0,25; d=0,00; Sw_o=110; Sg_o=0; Rg-Qg=90.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_o y Sg_o son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Q_{r_i} es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Q_{s_i} es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 11. Subcuenca Teusacá



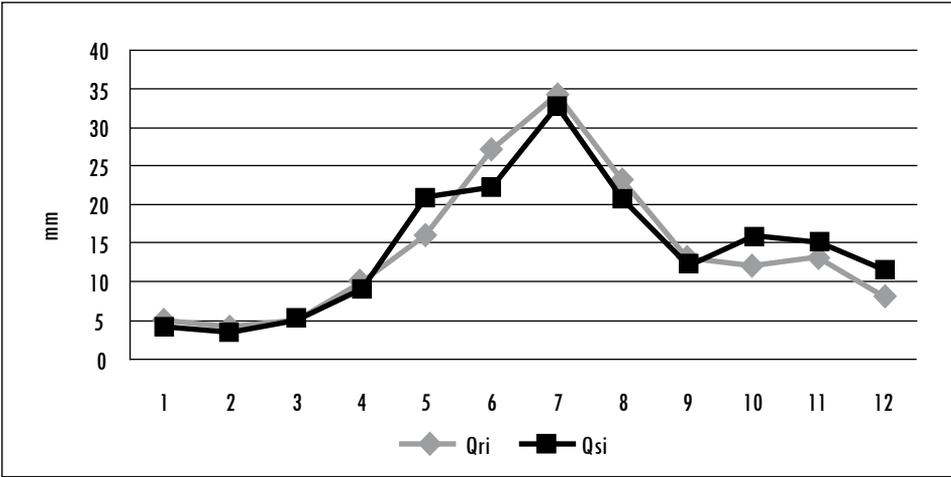
$a=0,90; b=350; c=0,65; d=0,05; Sw_o=160; Sg_o=0; Rg-Qg=210.$

$a=0,90; b=350; c=0,25; d=0,00; Sw_o=110; Sg_o=0; Rg-Qg=90.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_o y Sg_o son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Q_{r_i} es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Q_{s_i} es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 12. Subcuenca Tominé



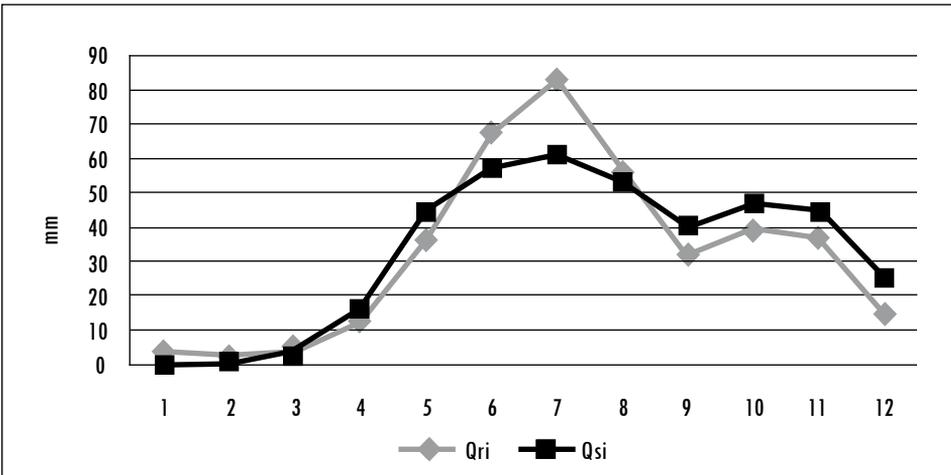
$a=0,95; b=245; c=0,10; d=0,00; Sw_0=70; Sg_0=0; Rg-Qg=19.$

$a=0,90; b=250; c=0,10; d=0,00; Sw_0=0; Sg_0=0; Rg-Qg=44.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

Figura 13. Subcuenca Tunjuelito



$a=0,95; b=245; c=0,10; d=0,00; Sw_0=70; Sg_0=0; Rg-Qg=19.$

$a=0,90; b=250; c=0,10; d=0,00; Sw_0=0; Sg_0=0; Rg-Qg=44.$

En las abscisas se representan los meses del año promedio. Los parámetros b, Sw_0 y Sg_0 son expresados en mm. $Rg-Qg$ es la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo anuales, expresada en mm/año. Qr_i es el caudal observado o estimado a la salida de la cuenca; Qs_i es el caudal simulado.

Fuente: presentación propia de los autores.

En la Tabla 2 esta subcuenca presenta un valor del RSR (*RMSE-observations standard deviation ratio*) cercano al límite superior del rango aceptable, mientras que el *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) se encuentra por fuera de los rangos recomendados en la literatura (Moriassi et al., 2007).

Tabla 2. Estadística cuantitativa de la calibración

Subcuenca	RSR		NSE	
	Calculado	Aceptable	Calculado	Aceptable
Bojacá	0,69	0,00-0,70	0,52	0,65-1,00
Chicú	0,13		0,98	
Choconta	0,34		0,89	
Frío	0,11		0,99	
Neusa	0,27		0,93	
Sisga	0,31		0,90	
Subachoque	0,18		0,97	
Teusacá	0,39		0,85	
Tominé	0,24		0,95	
Tunjuelito	0,30		0,91	

Nota: Los valores óptimos de RSR y NSE son 0 y 1, respectivamente.

Fuente: presentación propia de los autores. Rangos aceptables basados en (Moriassi et al., 2007).

4. Discusión

Se considera que el modelo *abcd* produce una recarga media (112 mm/año) que no es muy disímil del valor estimado por JICA-EAAB (81 mm/año), en este estudio ponderado por área de las subcuencas. La recarga de JICA-EAAB (diferencia entre la infiltración y el flujo base) es comparada con la diferencia $Rg - Qg$ según el modelo *abcd* (Tabla 3), para cada subcuenca. Estas dos cantidades resultan similares en tres de las diez subcuencas analizadas, precisamente en las de Chocontá, Frío y Sisga. En las remanentes la diferencia está entre aproximadamente el 65% (Subachoque) y el 300% (Tunjuelito). Es importante resaltar que la evapotranspiración real anual del modelo *abcd* resulta inferior a la estimada por JICA-EAAB (2003), en todas las subcuencas, y esto se ve reflejado en los valores de la recarga.

La diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo es muy baja, inferior a los 20 mm/año, en las subcuencas de Bojacá, Chicú y Tominé, que ocupan una superficie total de 759 km² (25% del área total de las subcuencas analizadas).

Esta cantidad podría ser también igual a cero, considerando que pueden existir errores en las variables de entrada al modelo, como la precipitación y la evapotranspiración potencial o el caudal observado en el río.

Esta consideración es consistente con las observaciones de Rodríguez (1986), según las cuales la infiltración en la sabana de Bogotá tiende a cero. Sin embargo, en las demás subcuencas la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo fluctúa entre los 39 mm/año (Sisga) y los 351 mm/año (Neusa). Esta diferencia en la subcuenca de Neusa es equivalente al 42% de la precipitación. Este resultado disímil sugiere una mayor investigación, bien sea en el aspecto de la modelación o en la estimación de la precipitación, evapotranspiración potencial y análisis de los registros de caudales. Cabe destacar también que cuando el ajuste entre Q_r y Q_s no es bueno (por ejemplo, subcuenca de Bojacá), es posible que existan diferentes combinaciones de parámetros que generan un ajuste de calidad similar. En este caso, el valor de la recarga tiene que ser tomado con precaución. El modelo de la subcuenca de Bojacá genera un valor negativo de $R_g - Q_g$ que puede estar relacionado con la calidad de la calibración.

Es interesante notar que en la mayoría de las subcuencas el parámetro d , y por ende el caudal subterráneo, resulta igual a cero. Esto sugiere que la zona saturada está hidráulicamente desconectada del río. Dicha hipótesis, aunque parcialmente respaldada por De Bermoudes y Quiroz (2002) e Ingeominas (2002), según los cuales los cauces por encima de 2600 metros sobre el nivel del mar están desconectados de los principales horizontes acuíferos del Complejo Neógeno-Cuaternario, debería ser comprobada con datos experimentales de campo.

Aunque no se analizan eventuales problemas de nonunicidad de la solución relacionados con la aplicación del problema inverso, el procedimiento de optimización basado en la búsqueda exhaustiva sugiere que, en términos generales, la superficie de respuesta de la función objetivo se haya explorado de forma aceptable. Estos resultados tienen claras implicaciones en la estimación de los recursos hídricos subterráneos renovables de la sabana de Bogotá. Por lo tanto, al considerar la totalidad del área de estudio (3000 km² aproximadamente), la diferencia entre 112 mm/año (modelo *abcd*) y 8 mm/año (recarga según la CAR), es de 312 millones de m³/año, que es equivalente al abastecimiento doméstico urbano anual de una población de aproximadamente tres millones de habitantes.

Tabla 3. Comparación de la recarga y evapotranspiración real

Cuenca	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Bojacá (233 km ²) Precipitación = 576 mm/año	ET _i modelo <i>abcd</i>	27,7	25,0	29,7	29,0	31,8	31,4	30,9	28,8	31,2	36,5	33,0	33,4	368,4
	ET _i JICA-EAAB	17,0	18,0	25,0	32,0	36,0	38,0	36,0	31,0	36,0	42,0	36,0	22,0	369,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	8,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	-4,9	-2,5	-1,3	-0,7	-0,3	-0,2	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Chicó (154 km ²) Precipitación = 789 mm/año	ET _i modelo <i>abcd</i>	20,0	22,3	26,6	30,1	32,7	29,6	28,9	28,4	29,6	35,6	35,8	32,8	352,3
	ET _i JICA-EAAB	27,0	31,0	34,0	42,0	39,0	38,0	28,0	21,0	27,0	41,0	42,0	34,0	404,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	11,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	39,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	-3,0	-0,4	1,1	6,0	8,9	0,9	-2,0	-2,5	-0,1	10,4	4,1	-5,1	18,3
Chocontá (281 km ²) Precipitación = 772 mm/año	ET _i modelo <i>abcd</i>	27,3	26,0	31,9	33,9	36,4	31,1	29,7	33,1	34,7	41,2	40,2	37,2	402,5
	ET _i JICA-EAAB	35,0	27,0	34,0	41,0	39,0	33,0	30,0	33,0	38,0	44,0	45,0	44,0	443,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	7,0	28,0	11,0	0,0	0,0	0,0	3,0	9,0	0,0	58,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	0,8	0,8	1,4	3,7	7,8	8,9	10,5	8,8	6,5	8,2	7,0	3,3	67,6

Continúa

Cuenca	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual	
Frío (193 km ²) Precipitación = 787 mm/año	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	32,3	30,2	33,9	35,9	35,1	31,1	31,0	30,0	32,1	37,0	38,3	36,8	403,6	
	ET ₁ JICA-EAAB	40,0	32,0	37,0	42,0	36,0	33,0	36,0	33,0	36,0	36,0	39,0	41,0	441,0	
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	10,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	11,0	0,0	48,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	2,2	2,1	3,1	6,5	9,0	6,9	5,5	4,6	5,3	5,3	11,3	11,2	5,7	73,3
Neusa (429 km ²) Precipitación = 840 mm/año	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	34,8	29,4	31,5	28,6	30,7	26,1	25,8	26,3	27,1	31,4	30,2	31,1	353,0	
	ET ₁ JICA-EAAB	43,0	31,0	40,0	42,0	39,0	36,0	36,0	39,0	42,0	42,0	42,0	44,0	476,0	
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	20,0	36,0	17,0	13,0	8,0	7,0	7,0	45,0	31,0	2,0	179,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	29,5	20,5	22,2	30,7	37,5	31,5	27,9	24,8	24,2	24,2	37,9	37,7	25,9	350,5
Siaga (154 km ²) Precipitación = 808 mm/año	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	24,8	23,7	29,5	35,1	35,5	33,1	32,2	33,3	33,6	38,4	36,8	33,9	389,9	
	ET ₁ JICA-EAAB	35,0	24,0	30,0	41,0	36,0	33,0	30,0	33,0	35,0	39,0	42,0	40,0	418,0	
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	0,0	26,0	9,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	43,0	
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	0,4	0,4	0,7	2,1	4,7	6,1	7,0	5,3	3,6	4,3	3,2	1,5	39,2	

Continúa

Cuenca	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Subachoque (409 km ²) Precipitación = 804 mm/año	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	27,8	25,7	28,6	28,5	31,3	29,3	28,7	27,1	28,8	34,3	34,5	32,6	357,2
	ET ₁ JICA-EAAB	40,0	35,0	39,0	42,0	39,0	39,0	39,0	35,0	39,0	39,0	42,0	41,0	469,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	21,0	35,0	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	46,0	23,0	0,0
Teusacá (366 km ²) Precipitación = 801 mm/año	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	10,2	9,7	10,6	18,2	27,4	21,0	15,3	11,2	13,1	31,2	27,7	13,9	209,6
	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	23,0	23,6	27,7	31,3	34,2	31,5	31,4	31,3	31,6	34,9	34,8	35,3	370,6
	ET ₁ JICA-EAAB	47,0	39,0	42,0	45,0	45,0	42,0	37,0	30,0	31,0	42,0	45,0	47,0	492,0
Tomimé (372 km ²) Precipitación = 691 mm/año	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	12,0	16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	12,0	0,0	40,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	2,1	2,7	3,9	7,2	9,9	9,3	8,7	7,6	7,1	10,2	12,0	8,9	89,8
	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	28,8	27,0	32,0	35,3	42,4	41,4	45,7	42,8	37,4	40,8	38,9	39,6	452,1
	ET ₁ JICA-EAAB	45,0	35,0	36,0	46,0	51,0	51,0	51,0	47,0	34,0	39,0	44,0	41,0	520,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	0,5	0,4	0,6	1,0	2,3	2,5	3,6	2,3	1,4	1,8	1,7	1,3	19,3

Continúa

Cuenca	Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Tunjuelito (411 km ²) Precipitación = 946 mm/año	ET ₁ modelo <i>abcd</i>	4,3	10,5	17,4	31,0	35,4	38,8	36,3	37,0	37,6	39,0	35,4	33,8	356,6
	ET ₁ JICA-EAAB	39,0	38,0	36,0	42,0	36,0	39,0	36,0	36,0	41,0	39,0	39,0	39,0	460,0
	Recarga JICA-EAAB	0,0	0,0	2,0	50,0	49,0	15,0	4,0	8,0	9,0	18,0	18,0	1,0	174,0
	Rg-Qg (modelo <i>abcd</i>)	0,0	0,1	0,4	1,7	4,9	6,4	6,8	5,9	4,5	5,1	4,9	2,8	43,6

Fuente: presentación propia de los autores con base en datos de JICA-EAAB tomados de (Vargas et al., 2008).

5. Conclusiones

Este trabajo utiliza un modelo de balance hídrico de cuatro parámetros (modelo *abcd*; Thomas, 1981; Thomas et al., 1983) para estimar la recarga directa media anual en la sabana de Bogotá. El proceso de calibración se basó en minimizar la diferencia entre los caudales conocidos a la salida de cada subcuenca y los simulados por el modelo. A diferencia del balance hídrico del suelo (Allen et al., 1998; JICA-EAAB, 2003), donde se tiene que asumir unos parámetros basados en las características del suelo y de la cobertura vegetal, la bondad de esta metodología es parcialmente validada por la calidad de la calibración. Esta última es aceptable en la mayoría de las subcuencas analizadas y sugiere que en el área de estudio la recarga, definida como la diferencia entre la recarga y el caudal subterráneo en el modelo *abcd*, es de 112 mm/año (equivalente al 14% de la precipitación media anual), que es del mismo orden de magnitud de la recarga obtenida por JICA-EAAB (2003), 81 mm/año. Sin embargo, estos valores difieren de los resultados obtenidos por otras entidades, que estiman una recarga entre 8 y 30 mm/año.

La variación total es más de un orden de magnitud, la cual puede estar relacionada a las diferentes escalas temporales, variables de entrada o metodologías utilizadas. Esto tiene serias implicaciones en la determinación del volumen anual de recursos hídricos subterráneos aprovechables. Todos estos estudios de recarga, incluido el presente, pueden verse afectados por errores en las variables de entrada, como la precipitación y la evapotranspiración potencial. Los errores pesan más cuando la recarga estimada es pequeña. Los resultados de esta investigación sugieren que futuros estudios en el desarrollo sostenible de los recursos hídricos subterráneos de la sabana de Bogotá deberían basarse en múltiples metodologías para la estimación de la recarga. Se recomienda también investigar la sensibilidad de los diferentes métodos en relación con potenciales errores en las variables de entrada y la variabilidad de la recarga frente a las predicciones del cambio climático. En el caso del modelo *abcd*, es oportuno enfocar trabajos futuros en la investigación de eventuales problemas de nonunicidad de la solución y, sobre todo, cuál función objetivo tiene que ser empleada, a fin de que refleje mejor la discrepancia entre lo simulado y lo observado. De esta forma se puede perfeccionar la conceptualización de la dinámica hidrogeológica de la sabana de Bogotá, que constituye un primer paso para el manejo sostenible del agua subterránea en esta región.

Referencias

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. y SMITH, M. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.
- ALLEY, W. M. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting, and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*. 1984, vol. 20, núm. 8, pp. 1137-1149.
- CASTRO A. E.; PÉREZ, H. J. y VILLALBA, T. O. *Balance hídrico del agua subterránea*. Bogotá: CAR, 2003.
- Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). *Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santafé de Bogotá D.C.* Bogotá: DAMA-PNUD-Hidrogeocol, 2000.
- DE BERMOUDES, O. y QUIROZ, M. Contribución a la hidrogeología de la sabana de Bogotá, Colombia. En: *Manejo integrado de aguas subterráneas: un reto para el futuro*. San José: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 2002, pp. 107-118.
- DELIN, G. N. y RISSER, D. W. Ground-water recharge in humid areas of the United States: A summary of ground-water resources program studies, 2003-06. s. l.: USGS Fact Sheet, 2007.
- DELIN, G. N.; HEALY, R. W.; LORENZ, D. L. y NIMMO, J. R. Comparison of local-to regional-scale estimates of ground-water recharge in Minnesota, USA. *Journal of Hydrology*. 2007, núm. 334, pp. 231-249.
- FRAGALÁ, F. y OBREGÓN, N. Modelos de simulación en el río Checua. *Revista de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (ACODAL)*. 2002, núm. 197.
- INGEOMINAS. *Mapa hidrogeológico de la sabana de Bogotá escala 1:100,000. Proyecto de evaluación y exploración de aguas subterráneas*. Bogotá, 2000.
- INGEOMINAS. *Modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de Bogotá. Proyecto de cooperación técnica internacional OIEA-Ingeominas, aplicación de técnicas isotópicas en los estudios de aguas subterráneas col-8019*. Informe técnico final. Bogotá, 2002.
- JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY-EMPRESA DE ACUEDUCTO y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ (JICA-EAAB). *Estudio del desarrollo sostenible del agua subterránea en la sabana de Bogotá en la República de Colombia*. Informe Final e Informe Principal. Bogotá, 2003.
- LERNER, D. N.; ISSAR, A. S. y SIMMERS, I. Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. *International Contributions to Hydrogeology*. 1990, vol. 8.
- LOBOGUERRERO-USCÁTEGUI, A. Geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su sabana. *Documento procedente de las VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia*. Sociedad Colombiana de Ingenieros y Sociedad Colombiana de Geotecnia, Santafé de Bogotá, octubre 30 de 1992.

- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D. y VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007, vol. 50, núm. 3, pp. 885-900.
- OBREGÓN, N.; FRAGALÁ, F.; BLANCO, A. y GÁMEZ, L. Implementación del modelo de Thomas en la cuenca alta del río Checua para la estimación de la recarga (sabana de Bogotá). *XV Seminario nacional de Hidráulica e Hidrología*. Medellín, agosto de 2002.
- RODRÍGUEZ, C. O. Evaluación cuantitativa del acuífero de la sabana de Bogotá. *Seminario Andino sobre Evaluación y Administración de Aguas Subterráneas*, Lima 10-14 de marzo de 1986.
- SCANLON, B. R.; HEALY, R. W. y COOK, P. G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*. 2002, núm. 10, pp. 18-39.
- SERRANO, S. E. *Hydrology for engineers, geologists and environmental professionals: an integrated treatment of surface, subsurface and contaminant hydrology*. s. l.: Hydrosience, 1998.
- THOMAS, H. A. Improved methods for National Water Assessment, report, contract Washington: Water Resource Council, 1981.
- THOMAS, H. A.; MARIN, C. M.; BROWN, M. J. y FIERING, M. B. *Methodology for water resource assessment, report to U.S. Geological Survey*. Springfield, Va.: Natl. Tech. Inf. Serv., 1983.
- VARGAS, C. A.; MÉNDEZ, T. H. V.; DÍAZ POLANIA, J. V. *Estudio del estado del arte e implementación de un modelo computacional para la estimación de la recarga del acuífero de la sabana de Bogotá*. Trabajo de posgrado. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2008.
- ZHOU, Y. A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of Hydrology*. 2009, núm. 370, pp. 207-213.

