

CALIBRATION, VALIDATION AND EVALUATION OF A LUMPED HYDROLOGIC MODEL IN A MOUNTAIN AREA IN SOUTHERN ECUADOR

CALIBRACIÓN, VALIDACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO CONCENTRADO EN UN ÁREA MONTAÑOSA AL SUR DEL ECUADOR

Fernando Oñate-Valdivieso¹, Joaquín Bosque-Sendra², Antonio Sastre-Merlin³, V. Miguel Ponce⁴

¹Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil, Universidad Técnica Particular de Loja, C/. Marcelino Champagnat s/n, 1101608, Loja, Ecuador. (fronate@utpl.edu.ec). ²Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá, C/. Colegios 2, 28801, Alcalá de Henares, Madrid, España. (joaquin.bosque@uah.es). ³Departamento de Geología, Universidad de Alcalá, Campus Universitario, Alcalá de Henares, Madrid, España. (antonio.sastre@uah.es). ⁴Civil, Construction, and Environmental Engineering, San Diego State University, 5500 Campanile Drive, San Diego, CA 92182-1324 USA. (ponce@ponce.sdsu.edu).

ABSTRACT

In South America the density of meteorological and hydrological stations is low with a minimum number of monitored variables; this limits the application of complex hydrological models for the study of water resources. An alternative may be to use simplified models that need a small number of variables. The study performance of simplified models in scarce information conditions is important in order to know water resources availability in areas with these conditions. The performance of the Temez lumped model and the SWAT model (semi-distributed model) were evaluated with data from six basins at the border region between Ecuador and Peru, with areas that vary between 200 and 2642 km². Precipitation and temperature recorded in 43 climatological stations in the study area were considered. The model calibration and validation was performed with different portions of the observed data and these were chronologically selected (70 % for modeling 30 % for validation). The Temez model was able to reproduce flows with a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.63. The limitations may be attributed to the low station density, to the poor quality of the information, and to the difficulty of representing with a single lumped parameter, characteristics that have a wide spatial variation. The SWAT model showed better simulation capabilities with a Nash-Sutcliffe efficiency of 0.87. The Temez model presented simulation capabilities lower to those of SWAT; however, in small catchments the ability of both models could be comparable.

RESUMEN

En Sudamérica la densidad de estaciones meteorológicas e hidrológicas es baja con un mínimo de variables monitorizadas, lo cual complica la aplicación de modelos hidrológicos complejos para el estudio de los recursos hídricos. Una alternativa puede ser utilizar modelos simplificados que necesitan un reducido número de variables. Estudios sobre el desempeño de modelos simplificados bajo condiciones de información escasa son importantes para conocer la disponibilidad de los recursos hídricos en áreas con esas condiciones. El desempeño del modelo concentrado de Temez y del modelo SWAT (modelo semi-distribuido) fue evaluado con datos de seis cuencas en la región fronteriza entre Ecuador y Perú, con áreas que varían entre 200 y 2642 km². La precipitación y temperatura registradas en 43 estaciones climatológicas en el área de estudio fueron consideradas. La calibración y validación del modelo fue realizada con diferentes porciones de los datos observados, que fueron cronológicamente seleccionados (70 % para modelización; 30 % para validación). El modelo Temez pudo reproducir caudales con una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.63. Las limitaciones se pueden atribuir a la baja densidad de estaciones, la calidad baja de la información y la dificultad de representar, con un solo parámetro concentrado, características que presentan una amplia variación espacial. Las capacidades de simulación del modelo SWAT fueron superiores con una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.87. El modelo Temez presentó capacidades de simulación inferiores al modelo SWAT, pero en cuencas pequeñas la capacidad de ambos modelos podría ser comparable.

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: April, 2015. Approved: November, 2015.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 50: 945-963. 2016.

Palabras clave: Temez, modelo hidrológico concentrado, comparación de modelos, SWAT.

Keywords: Temez, lumped hydrological model, hydrological models comparison, SWAT.

INTRODUCTION

A hydrological model may be defined as the mathematical representation of the water cycle on a portion of the Earth, in order to perform rainfall-runoff transformations. Hydrological models can be classified into lumped, and distributed (Carpenter and Georgakakos, 2006). A lumped model performs a simplified water balance, using single parameters that represent an average of spatial variability of the characteristics of a relatively large area. Distributed models divide the basin into smaller subareas, considering the spatial variability of the data and model parameters (García *et al.*, 2008). The concepts of lumped and distributed models, while opposite in meaning, are not necessarily exclusive, because a lumped model may be used as components of a distributed model (Ponce, 1989).

The time scale of simulation may be hourly, daily, weekly, or monthly. When the simulation is performed continuously in an hourly or daily time scale, the majority of the processes involved in the water cycle require a large number of parameters. By contrast, simulations based on weekly or monthly time intervals require fewer parameters (García *et al.*, 2008).

The implementation of a model requires an initial phase to collect the set of variables necessary for the mathematical representation of the physical phenomena. The number of parameters increases depending on the detail of the mathematical model used in the representation of the physical phenomena. When the number of parameters is large, it is necessary to perform a sensitivity analysis prior to calibration.

Through the systematic change of the values of the model parameters, and a detailed observation of the effects that these changes have on the results, a small number of calculation-relevant "sensitive" parameters are selected. In turn, these are tuned in during calibration until the model is able to reproduce the historical record in an acceptable manner.

After calibration, the model may be used to study different scenarios of climate change, land use, and so on. When a model is lumped and of monthly time scale, a low volume of information is required

INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico se define como la representación matemática del ciclo del agua sobre una determinada porción de territorio, con la finalidad de realizar transformaciones lluvia-escurrentía. Los modelos hidrológicos pueden clasificarse en concentrados, y distribuidos (Carpenter y Georgakakos, 2006). Un modelo concentrado realiza un balance de agua simplificado, empleando parámetros únicos que representan en promedio la variabilidad espacial y temporal de las características de una zona relativamente extensa. Los modelos distribuidos dividen la cuenca en pequeñas subáreas, considerando la variabilidad espacial de los datos y de los parámetros del modelo (García *et al.*, 2008). Los conceptos de modelos concentrados y distribuidos, opuestos en significado, no son siempre excluyentes porque los modelos concentrados se pueden usar como componentes de un gran modelo distribuido (Ponce, 1989).

La escala temporal de la simulación puede ser horaria, diaria, semanal o mensual. Cuando la simulación continua es realizada en escala temporal horaria o diaria, la mayoría de los procesos que involucra el ciclo hidrológico requieren un gran número de parámetros. Por el contrario, simulaciones basadas en intervalos temporales semanales o mensuales requieren menos parámetros (García *et al.*, 2008).

La implementación de un modelo comprende una fase inicial en la que se recopilan las variables necesarias para la representación matemática de los fenómenos físicos y el número de parámetros aumenta según el detalle del modelo matemático usado en su representación. Cuando el número de parámetros es considerable, es necesario realizar un análisis de sensibilidad previo a la calibración.

A través del cambio sistemático de los valores de los parámetros del modelo y la observación del efecto que dichos cambios tienen en los resultados obtenidos, un número reducido de parámetros "sensibles", de mayor relevancia en el cálculo, son seleccionados. Éstos son afinados en la fase de calibración hasta que el modelo pueda reproducir el registro histórico de caudales de una manera aceptable.

El modelo calibrado se puede usar en el estudio y análisis de diferentes escenarios de cambio climático, de uso de suelo, etc. Cuando un modelo es concentrado y de paso mensual, requiere volúmenes reducidos

for implementation, which; has helped to increase the popularity of the lumped models in regions with limited information. The Temez model (Temez, 1977; Estrela, 1999) is used in Ibero-America for modeling rainfall-runoff in medium-sized watersheds with different climatic and geographical conditions (Murillo *et al.*, 2005; Pizarro *et al.*, 2005; Murillo and Navarro, 2011). Meanwhile, the SWAT model is applied successfully to flow and sediment simulation, in medium-scale and large-scale basins, in regions of Latin America, with varied weather and topographic conditions (Rivera-Toral, 2013; Oñate-Valdivieso and Bosque, 2014; Salas-Martinez, 2014).

The aim of this study was to evaluate the performance of the Temez hydrological model in the prediction of runoff in six sub-basins at the border between Ecuador and Peru and compare its performance with the performance of SWAT model.

MATERIALS AND METHODS

Study area

Six basins were selected, located between 3° 30' and 5° 8' S and 79° 10' and 80° 29' W, which belong to the bi-national basins Catamayo-Chira and Puyango-Tumbes, located along the border between Ecuador and Peru.

The Catamayo-Chira Binational Basin has an extension of 17 199.19 km² and 817 968 inhabitants. The basin begins in the mountains of the Continental Divide (through Ecuador) and it ends in the Pacific Ocean (Peru). It goes through the Andes Mountain range downwards to the coast. It features tropical weather, diverse ecosystems, and various administrative/political systems. The geography of the basin is abrupt, with altitudinal variations between 0 m and 3700 masl and there are 11 life zones from tropical desert to mountain rainforest. The mean annual precipitation is about 800 mm, varying between 10 mm in the low-altitude areas to 1000 mm in the basin headwaters. Besides, 14 % of the basin surface is covered by humid forest, 41 % by dry forest, 30 % by pasture, 10 % by crops and 5 % by other uses.

The Puyango-Tumbes basin covers 5400 km² and it includes the provinces of El Oro and Loja in Ecuador and the department of Tumbes in Peru. The upper basin consists of mountainous terrain with steep slopes, which elevations between 500 m and 3700 m, and encloses wilderness areas, natural forest and crops. The upper basin is characterized by an important mining activity, especially in Calera and Amarillo. The lower basin has extensive plains and it is heavily cultivated, with rice fields; there are also

de información para su implementación, lo cual ha contribuido a aumentar su popularidad en zonas con limitada información. El modelo Temez (Témez, 1977; Estrela, 1999) se usa en Iberoamérica para modelizar lluvia escorrentía en cuencas de tamaño medio con diferentes condiciones climáticas y geográficas (Murillo *et al.*, 2005; Pizarro *et al.*, 2005, Murillo y Navarro, 2011). El Modelo SWAT se aplica con éxito para la simulación de caudales y sedimentos en cuencas de tamaño medio y grande en regiones de Latinoamérica bajo distintas condiciones climáticas y topográficas (Rivera-Toral, 2013; Oñate-Valdivieso and Bosque, 2014; Salas-Martinez, 2014).

El objetivo de este estudio fue evaluar el desempeño del modelo hidrológico de Témez en el pronóstico de la producción de escorrentía de agua en seis subcuencas hidrográficas en la frontera entre Ecuador y Perú y comparar su desempeño con el modelo SWAT.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Seis subcuencas hidrográficas se seleccionaron entre 3° 30' y 5° 8' S y 79° 10' y 80° 29' O, que pertenecen a las cuencas binacionales Catamayo-Chira y la Puyango-Tumbes ubicadas en la frontera entre Ecuador y Perú.

La cuenca Catamayo Chira tiene 17 199.19 km² y 817 968 habitantes. Esta cuenca nace en las cumbres de la divisoria continental de aguas (Ecuador) y desemboca en el Océano Pacífico (Perú), atraviesa escenarios montañosos y costaneros, con climas tropicales, ecosistemas diversos, y varios usos y sistemas administrativos. La geografía de la cuenca es abrupta y con altitudes de 0 y 3700 msnm y tiene 11 zonas de vida, desde el desierto tropical hasta el bosque pluvial montano. La precipitación media anual es 800 mm y varía desde 10 mm en la zona baja, hasta 1000 mm en su cabecera. Esta cuenca está cubierta en 14 % por bosque húmedo, 41 % por bosque seco, 30 % por pastizales, 10 % por cultivos y 5 % por otros usos.

La cuenca Puyango Tumbes tiene 5 400 km² y comprende las provincias de El Oro y Loja en Ecuador y el departamento de Tumbes en Perú. La cuenca alta del río Puyango Tumbes está formada por terrenos montañosos, con fuertes pendientes y altitudes desde 500 m hasta 3 700 m, y presenta zonas de páramo, bosque natural y cultivos. La cuenca alta se caracteriza por una actividad minera importante, en especial en las cuencas de los ríos Calera y Amarillo. La cuenca baja tiene amplias llanuras y es cultivada con intensidad, con plantaciones de arroz; además hay zonas grandes de bosque seco, pastizales y cultivos agrícolas. La

large areas of dry forests, grasslands, and agricultural crops. The lower basin in the Peruvian portion suffers from frequent floods. Precipitation in the basin ranges from 200 mm to 1150 mm per year, with average temperatures between 13 °C and 25 °C. Three main tributaries compose the basin: the Calera river, the Yellow River, and the Pindo river. On average, the total volume of water produced by the basin (average annual mass) is approximately 3,400 million m³.

The availability of hydrometric information and geographic characteristics determined the choice of six sub-basins: the basins from the Amarillo and Pindo rivers pertaining to the Puyango-Tumbes basin, and the basins from the Catamayo, Macará, Quiroz and Alamor rivers pertaining to the Catamayo-Chira basin (Table 1). The geographic location of the basins is shown in Figure 1.

Temez Model

The Temez Model (Temez, 1977; Estrela, 1999; Murillo and Navarro, 2011) is a lumped hydrologic model that assumes that the soil profile is divided into an unsaturated upper zone and a saturated lower zone. The model behavior is similar to that of an underground reservoir that drains into the surface network.

Rainfall (*P*) is divided into evapotranspiration (*ET*) and excess (*T*). The excess is decomposed into a fraction that flows over the surface (*E*) (surface runoff), and into another fraction that infiltrates into the ground (*I*). The first fraction evacuates through the channel within the established period of time, whereas the second will remain in the underground reservoirs to be released at a later time. The excess is calculated through the following expression:

$$T_i = 0 \text{ if } P_i \leq P_0 \tag{1}$$

$$T_i = (P_i - P_0) / (P_i + \delta - 2P_0)^{-1} \text{ if } P_i > P_0 \tag{2}$$

cuenca baja en la zona peruana sufre inundaciones con frecuencia. La precipitación en la cuenca varía de 200 mm a 1150 mm anuales con temperaturas medias de 13 °C a 25 °C. La cuenca está formada por tres tributarios principales: el río Calera, el río Amarillo y el río Pindo, y el volumen total anual de agua que produce la cuenca (masa anual promedio) es cerca de 3 400 millones m³.

La disponibilidad de información hidrométrica y características geográficas determinaron la selección de seis subcuencas: las cuencas de los ríos Amarillo y Pindo pertenecientes a la cuenca Puyango-Tumbes, y las cuencas de los ríos Catamayo, Macará, Quiroz y Alamor de la cuenca Catamayo-Chira (Cuadro 1). La ubicación geográfica de las cuencas se muestra en la Figura 1.

Modelo de Temez

El modelo de Temez (Temez, 1977, Estrela Monreal, 1999) es un modelo hidrológico concentrado que supone que el perfil del suelo está dividido en una zona superior insaturada y otra inferior saturada, y su comportamiento semeja un embalse subterráneo que desagua en la red superficial.

La lluvia (*P*) se divide en evapotranspiración (*ET*) y excedente (*T*). El excedente se descompone en una parte que discurre en la superficie, *E* (escorrentía superficial), y otra que se infiltra hasta el acuífero (*I*). La primera evacua por el cauce dentro del período de tiempo considerado, mientras que la segunda permanece en los reservorios subterráneos y se libera después. El excedente se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_i = 0 \text{ if } P_i \leq P_0 \tag{1}$$

$$T_i = (P_i - P_0) / (P_i + \delta - 2P_0)^{-1} \text{ if } P_i > P_0 \tag{2}$$

en la cual:

$$\delta = H_{\max} - H_{i-1} + EP_i \tag{3}$$

Table 1. Hydrographic basins chosen for model validation.
Cuadro 1. Cuencas hidrográficas seleccionadas para validación del modelo.

Basin	Sub-basin	Gauging Station	Gaugin Station Coordinates	Basin area (km ²)	Average flow (m ³ s ⁻¹)
Catamayo-Chira	Alamor	Alamor en Saucillo	4° 15' 31" S 80° 11' 42" W	607.67	7.3
	Catamayo	Puente Boqueron	4° 03' 16" S 80° 22' 25" W	1209.18	20.9
	Macará	Puente International	4° 23' 00" S 79° 56' 60" W	2641.69	37.1
	Quiroz	Paraje Grande	4° 37' 48" S 79° 54' 48" W	2275.76	15.3
Puyango-Tumbes	Amarillo	Amarillo en Portovelo	3° 42' 44" S 79° 36' 45" W	262.31	14.32
	Pindo	Pindo Aj. Amarillo	3° 45' 40" S 79° 38' 01" W	512.13	23.43

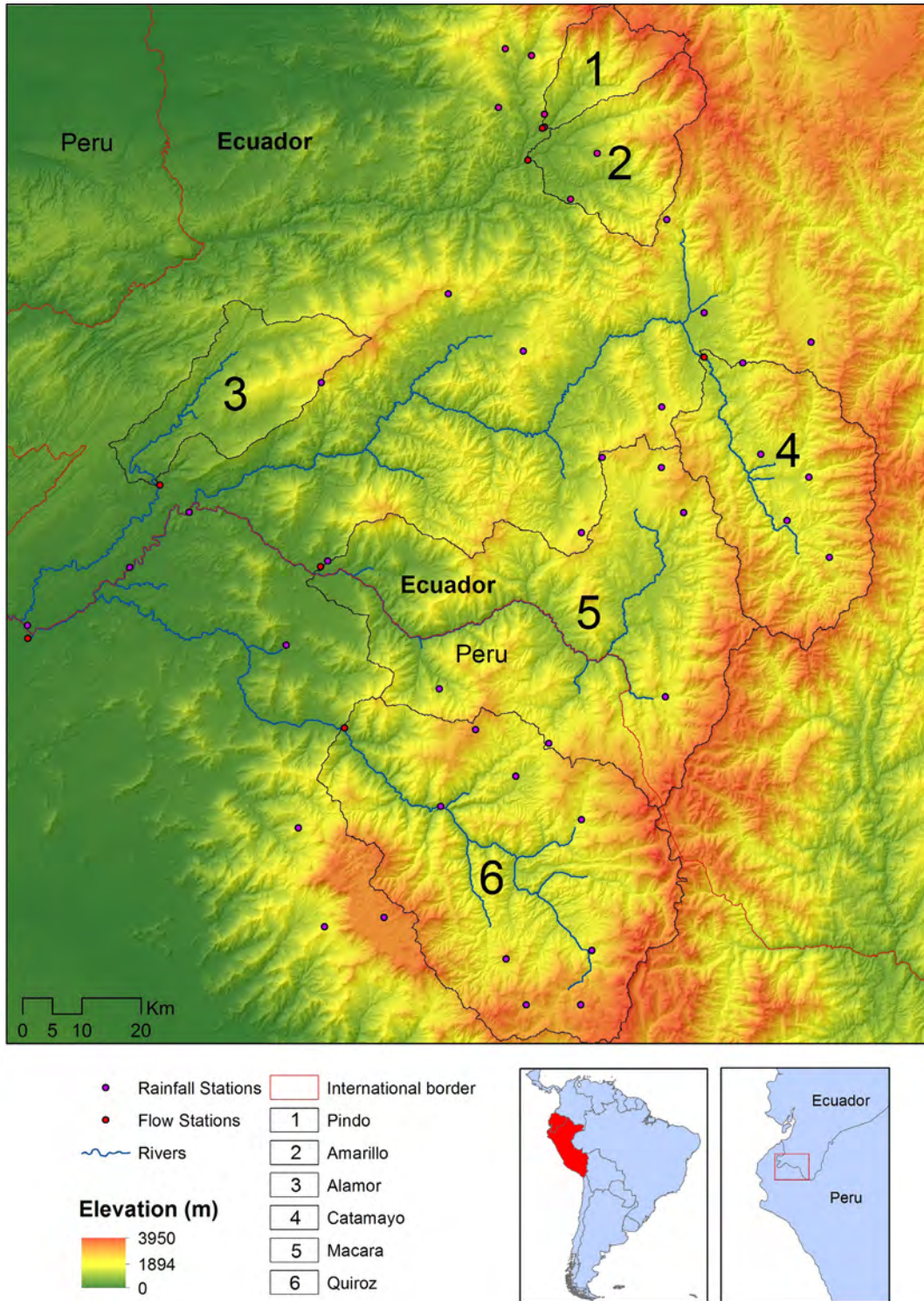


Figure 1. Digital elevation model of the sub-basins location, within the study area along the border between Ecuador and Peru.
 Figura 1. Modelo de elevación digital de seis subcuencas, dentro del área de estudio a lo largo de la frontera entre Ecuador y Perú.

in which:

$$\delta = H_{\max} - H_{i-1} + EP_i \quad (3)$$

$$P_0 = C(H_{\max} - H_{i-1}) \quad (4)$$

P_i is the precipitation in the period between the instant $i-1$ to the instant i (mm); P_0 is the runoff threshold that defines the height of precipitation, under which no runoff is produced (mm); T_i is the excess in the period between the instant $i-1$ to the instant i (mm); H_{\max} is the maximum capacity of soil moisture (mm); H_{i-1} is the soil moisture at the instant $i-1$ (mm); EP is the potential evapotranspiration from the instant $i-1$ (mm); and C is a parameter from the model.

The soil moisture, H_i , at the end of the period will result:

$$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_p, EP) \quad (5)$$

An actual evapotranspiration ER_i (mm) is produced and it is equal to:

$$ER_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_p, EP) \quad (6)$$

Equation 6 shows that all the water available can be evapotranspired, with the potential evapotranspiration as an upper limit.

The model adopts an infiltration amount (I_i) as a function of the excess, T_p , and of the maximum infiltration parameter, I_{\max} .

$$I_i = I_{\max} T_i (T_i + I_{\max})^{-1} \quad (7)$$

T_p , I_i and I_{\max} will be in mm.

The infiltration increases with the excess, being asymptotic for its higher values, having as a limit the I_{\max} value.

This infiltration, I_p , becomes recharge to the aquifer, R_i , whereas the rest of the excess ($E_i = T_i - I_p$) will become surface water. The model assumes that the time step in the unsaturated zone is lower than the simulation time step.

The draining of the aquifer is modeled by an exponential function of the following type:

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha, t} \quad (8)$$

where Q_i is the discharge at the instant, i , α is the coefficient of the discharge branch of the aquifer that depends on the particular conditions of the basin being studied and t the time interval between instants $i-1$ and i .

$$P_0 = C(H_{\max} - H_{i-1}) \quad (4)$$

P_i es la precipitación en el periodo desde el instante $i-1$ al instante i (mm); P_0 es el umbral de escorrentía que define la altura de precipitación, por debajo de la cual no se produce escorrentía (mm); T_i es el excedente en el periodo desde el instante $i-1$ al instante i (mm); H_{\max} es la capacidad máxima de humedad en el suelo (mm); H_{i-1} la humedad en el suelo en el instante $i-1$ (mm); EP_i es la evapotranspiración potencial desde el instante $i-1$ (mm) y; C es un parámetro del modelo.

La humedad en el suelo, H_i , al final del período resultará:

$$H_i = \text{Max}(0, H_{i-1} + P_i - T_p, EP) \quad (5)$$

Una evapotranspiración real E_i (mm) se produce y es igual a:

$$ER_i = \min(H_{i-1} + P_i - T_p, EP) \quad (6)$$

La ecuación 6 muestra que se puede evapotranspirar toda el agua disponible con la evapotranspiración potencial como el límite superior.

El modelo adopta una cantidad de infiltración (I_i) como una función del excedente T_i y del parámetro de infiltración máxima I_{\max} :

$$I_i = I_{\max} T_i (T_i + I_{\max})^{-1} \quad (7)$$

T_p , I_i and I_{\max} will be in mm.

La infiltración aumenta con el excedente, es asintótica para sus valores altos y tiene como límite el valor I_{\max} .

Esta infiltración, I_p , se convierte en recarga al acuífero, R_i , en tanto que el resto del excedente ($E_i = T_i - I_p$) será agua superficial. El modelo asume que el tiempo de paso por la zona no saturada es menor al tiempo de paso de la simulación.

El drenaje del acuífero es modelado por una función exponencial del tipo siguiente:

$$Q_i = Q_{i-1} e^{-\alpha, t} \quad (8)$$

donde Q_i es la descarga en el instante i , α es el coeficiente de la rama de descarga del acuífero, que depende de las condiciones particulares de la cuenca en estudio y t el intervalo de tiempo entre los instantes $i-1$ e i .

La relación entre el caudal de descarga, Q_i y el volumen, V_i , almacenado en el acuífero es igual a:

$$Q_i = \alpha V_i \quad (9)$$

The relation between the discharge Q_i and the volume V_p stored in the aquifer is equal to:

$$Q_i = \alpha V_i \quad (9)$$

The discharge for the infiltration is assumed to be concentrated in half of the time step; therefore, the law of the groundwater flow is:

$$Q_i = Q_{i-1}e^{-\alpha t} + \alpha R_i e^{-\frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

in which R_i is the discharge to the aquifer in the period between $i-1$ and i , coinciding with infiltration, I_i .

The groundwater contribution throughout the period, A_{SUBi} , is:

$$A_{SUBi} = V_{i-1} - V_i + R_i t \quad (11)$$

The total contribution, A_T , is given by surface runoff ($T_i - I_i$) and the groundwater contribution:

$$A_T = T_i - I_i + A_{SUBi} \quad (12)$$

There are four parameters of the model: $Hmax$, which is the maximum capacity of the soil moisture; $Imax$, maximum capacity of infiltration; C is the parameter of excess; α is the coefficient of the discharge of the aquifer. These four parameters are particular to each basin and are subject to calibration.

Soil and water assessment tool (SWAT)

SWAT is a continuous simulation model used to predict the impact of land management practices in the production of water, sediments, and nutrients in a watershed (DiLuzio *et al.*, 2002). Besides, it is a semi-distributed continuous model based on the equation of water balance in the land profile and it simulates the precipitation, infiltration, runoff, evapotranspiration, lateral flow, and percolation processes. The equation of water balance is:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (13)$$

where SW_t is the final soil water content (mm H₂O), SW_0 is the initial soil water content on day i (mm H₂O), t is the time (days), R_{day} is the amount of precipitation on day i (mm H₂O), Q_{surf} is the amount of surface runoff on day i (mm H₂O), E_a

La descarga por la infiltración se supone concentrada en la mitad del período, por lo cual la ley de los caudales subterráneos es:

$$Q_i = Q_{i-1}e^{-\alpha t} + \alpha R_i e^{-\frac{\alpha}{2}} \quad (10)$$

en la cual R_i la recarga al acuífero en el periodo $i-1$ a i , coincidente con la infiltración I_i .

La aportación subterránea a lo largo del período, A_{SUBi} es:

$$A_{SUBi} = V_{i-1} - V_i + R_i t \quad (11)$$

La aportación total, A_T , es dada por la escorrentía superficial ($T_i - I_i$) y la aportación subterránea.

$$A_T = T_i - I_i + A_{SUBi} \quad (12)$$

Los parámetros del modelo son cuatro: $Hmax$, la capacidad máxima de humedad del suelo; $Imax$, la capacidad máxima de infiltración; C el parámetro de excedente; α es el coeficiente de la rama de descarga. Todos estos parámetros son particulares para cada cuenca y están sujetos a calibración.

Soil and water assessment tool (SWAT); Herramienta de evaluación de agua y suelo)

SWAT es un modelo continuo de simulación usado para pronosticar el impacto de las practicas de manejo del suelo en el agua, sedimentos y nutrientes en una cuenca (Di Luzio *et al.*, 2002). Además, es un modelo continuo semi-distribuido basado en la ecuación de balance hídrico en el perfil del suelo y simula los procesos de precipitación, infiltración escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo lateral y percolación. La ecuación de balance hídrico es:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (13)$$

donde SW_t es el contenido de humedad final en el suelo (mm H₂O), SW_0 es el contenido de humedad inicial en el suelo en el día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H₂O), E_a es el nivel de evapotranspiración en el día i (mm H₂O), w_{seep} es la cantidad de agua en la zona de saturación del perfil del suelo en el día i (mm H₂O), y Q_{gw} es el flujo de retorno en el día i (mm H₂O).

is the amount of evapotranspiration on day i (mm H₂O), w_{seep} is the amount of water entering the vadose zone from the soil profile on day i (mm H₂O), and Q_{gw} is the amount of return flow on day i (mm H₂O).

The SWAT model accomplishes a topographic division of the basin into sub-basins based on threshold of area; in turn, the sub-basins are subdivided into one or more homogeneous hydrological response units (HRU) that represent a unique combination of soil type and land use. The response to each HRU in water, sediments, nutrients, and pesticides are individually determined; then, they are added to a sub-basin level and moved toward the basin exit through its river network (Bouraoui *et al.*, 2005).

The surface runoff is estimated from daily precipitation data using the curve number methodology or Green-Ampt equation (Neitsch *et al.*, 2002). The evapotranspiration is determined applying the methodologies proposed by Hargreaves, Priestley-Taylor and Penman-Monteith (Neitsch *et al.*, 2002). A kinematic reservoir that considers variations in hydraulic conductivity, prevailing slope, and soil moisture is used to predict the lateral flow in each one of its layers. Groundwater is divided in two aquifer systems: 1) a non-confined aquifer, which is shallow and contributes to the backflow; 2) a confined aquifer, which is deep and disconnected from the system, unless groundwater pumping is being considered (Bouraoui, *et al.*, 2005). The sedimentation rate is estimated by applying the modified universal equation of soil loss (Neitsch *et al.*, 2002), using for that purpose the surface runoff, peak flow rate, erodibility of soil, slope length, its inclination, crop factor, and the management practice in the zone. Neitsch *et al.* (2002) explained the theoretical basis of the SWAT model.

Implementation, calibration, and validation of the model

For each basin, the lumped modeling was performed considering as input data the average spatial rainfall in the basin and the monthly potential evapotranspiration. For calibration purposes, the monthly average flows recorded in the downstream station of each basin included in Table 1 were considered. The precipitation data in 24 stations in Ecuador and in 19 in Peru stations as well as the temperature data in 10 stations in Ecuador and 4 stations in Peru were considered. The correspondence of the data series was verified through double-mass curve analysis. By regression analysis between stations that present geographical closeness, the same climatic regime, and the compatibility of records, data were homogenized to the common period 1970-2000 in the stations of the Catamayo-Chira basin, and 1965-1995 in the station of the Puyango-Tumbes basin. The

El modelo SWAT realiza una división topográfica de la cuenca en subcuencas en base a un umbral de área, para después subdividir las subcuencas en una o varias unidades de respuesta hidrológicas (HRU) que representan la combinación única de tipo y uso del suelo. La respuesta de cada HRU en términos de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas son determinadas individualmente para luego ser agregadas a nivel de subcuenca y movidas a la salida de la cuenca a través de su red hídrica (Bouraoui *et al.*, 2005).

La escorrentía superficial es estimada con datos diarios de precipitación usando la metodología del número de la curva o la ecuación de Green-Ampt (Neitsch *et al.*, 2002). La evapotranspiración se determina aplicando las metodologías propuestas por Hargreaves, Priestley-Taylor o Penman-Monteith (Neitsch *et al.*, 2002). Un reservorio cinemático que considera variaciones en conductividad hidráulica, pendiente y humedad del suelo, es usado para predecir el flujo lateral en cada una de sus capas. El agua subterránea se divide en dos sistemas de acuíferos: uno no confinado, poco profundo, que contribuye al flujo de retorno; y uno confinado, profundo, desconectado del sistema a menos que se considere agua subterránea (Bouraoui *et al.*, 2005). La tasa de sedimentación es estimada aplicando la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (Neitsch *et al.*, 2002), para lo cual se usa la escorrentía superficial, la tasa pico de flujo, la erodabilidad del suelo, la longitud de la pendiente, su inclinación, el factor de cultivo y las prácticas de manejo en la zona. Neitsch *et al.* (2002) explicaron las bases teóricas del modelo SWAT.

Implementación, calibración y validación del modelo

Para cada cuenca, la modelación concentrada fue realizada considerando como datos de entrada la precipitación media en la cuenca y la evapotranspiración media. Para fines de calibración se consideró los caudales medios mensuales registrados en la estación de cierre de cada una de las cuencas incluidas en el Cuadro 1. Los datos de precipitación en 24 estaciones ecuatorianas y en 19 estaciones peruanas, así como datos de temperatura en 10 estaciones ecuatorianas y 4 peruanas fueron considerados. La correspondencia de las series de datos fue verificada mediante análisis de curvas de doble masa. Mediante un análisis de regresión entre estaciones que presentaban vecindad geográfica, mismo régimen climático y correspondencia de sus registros, los datos se homogenizaron al período común 1970-2000 en las estaciones de la cuenca Catamayo-Chira, y 1965-1995 en las estaciones de la cuenca Puyango Tumbes. Con el método de Thornthwaite (Thornthwaite y Mather, 1957) se calculó la evapotranspiración potencial en cada una de las 14 estaciones con registros de datos de temperatura.

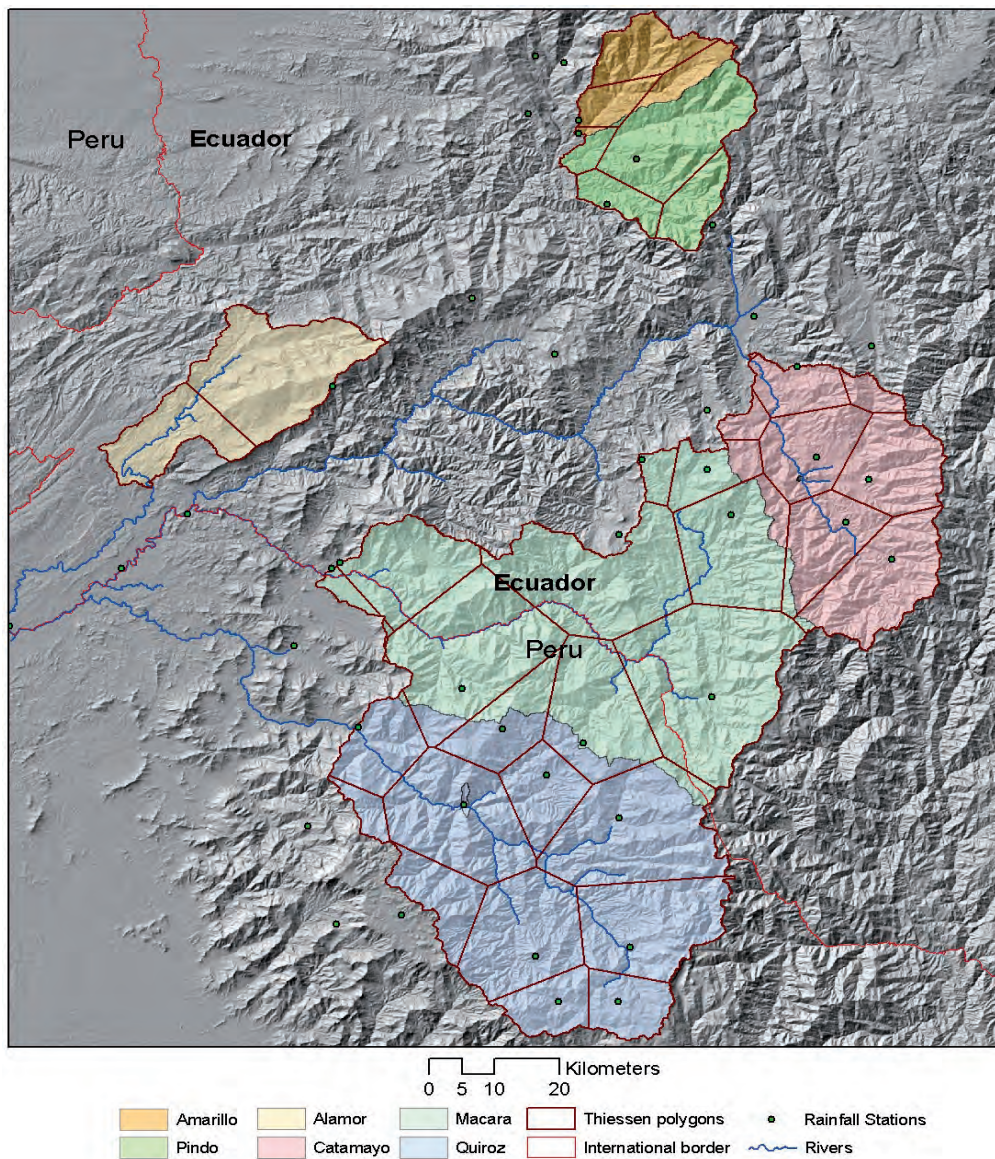


Figure 2. Thiessen polygons in the study area.
Figura 2. Polígonos de Thiessen en el área de estudio.

Thornthwaite method (Thornthwaite and Mather, 1957) was used to calculate potential evapotranspiration in each one of the 14 stations for which the temperature data was recorded.

The average precipitation and evapotranspiration for each one of the basins were calculated by Thiessen polygons (Figure 2).

In each one of the selected basins, manual calibration of four parameters (C , Hma , I_{max} , α) of the Temez model was carried out based on successive approximations. For this calibration, 70 % of the measured records were used; the flows calculated by the model were compared to the recorded flows in the stations included in Table 1. In the calibration process, the parameters values were changed to no more than 12 %. Once the model

La precipitación y la evapotranspiración media para cada una de las cuencas analizadas se calculó con base en polígonos de Thiessen (Figura 2).

En cada una de las cuencas seleccionadas se realizó la calibración de los cuatro parámetros del modelo de Temez con base (C , Hma , I_{max} , α) en aproximaciones sucesivas. Para esta calibración se usaron 70 % de los registros recopilados; los caudales calculados por el modelo se calcularon con los caudales registrados en las estaciones incluidas en el Cuadro 1. Una vez calibrados los parámetros del modelo se realizó su validación generando valores de caudal para un período correspondiente al restante 30 % del registro histórico. La bondad de ajuste entre los valores calcula-

parameters were calibrated, they were validated, generating flows for a period covering the remaining 30 % of the historical record. The goodness of fit between the calculated and observed values was measured by calculating the correlation coefficient (R), the Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (EF) (Nash and Sutcliffe, 1970) and the root-mean-square error ($RMSE$). The correlation coefficient will measure the fit of the observed and calculated data to a straight line, the EF efficiency will measure the 1 to 1 relation of the observed data, and the $RMSE$ will allow the evaluation of the average difference between observed and calculated values.

The application of the Temez model was performed by using the CHAC software which was developed by CEDEX of Spain. The Temez model may be found in <http://hercules.cedex.es/Chac/>.

For comparison purposes, the SWAT model was implemented in each one of the sub-basins. A DEM from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) of the study area was used for the delimitation of contributing basins and the calculation of the different morphometric parameters required by the model. Also, the information regarding the type of soil was gathered, and the soil parameters were determined by laboratory tests. Land use was extracted from a LANDSAT7 ETM+ image of October 2, 2011 through a supervised classification; in this extraction the minimum spectral angle (Chuvieco, 2002; Richards and Jia, 2006) was applied. The land use parameters were taken from the SWAT model database, with minor modifications. An existing soil type map (Valarezo, 2007) was validated and adapted for SWAT model implementation. The validation was done through perforations and pits in each of the edaphologic units identified. The infiltration test was performed in situ. Unaltered soil samples and general characteristics of soil horizons were taken. With all the collected data and the laboratory tests, the soil type parameters were determined for each of the edaphologic units identified.

The combination of soil type and land use allowed the determination of hydrological response units (HRU). The soil type information was used to characterize the non-confined aquifer. Additionally, precipitation and daily temperature data, as well as temperature parameters, solar radiation, wind speed, monthly relative humidity for each one of the stations were assembled to calculate evapotranspiration using the Penman Monteith method. The precipitation missing data were estimated by orthogonal correlation analysis between geographically neighboring stations with similar climatic conditions. In the case of temperature, an elevation-temperature equation was determined. A similar process was used for other climatic variables.

Before calibration, an analysis of model sensitivity was made by systematically changing the values of the model parameters and

dos y observados se midió calculando el coeficiente de correlación (R), la eficiencia de Nash - Sutcliffe (EF) (Nash y Sutcliffe, 1970) y el error cuadrático medio ($RMSE$). El coeficiente de correlación medirá el ajuste de los datos observados y calculado a una línea recta, la eficiencia EF medirá la relación 1 a 1 de los datos observados y calculados, y el $RMSE$ permitirá cuantificar las diferencias medias entre los valores observados y calculados.

La aplicación del modelo de Temez se realizó usando el software CHAC, desarrollado por el CEDEX de España. El modelo Temez se puede encontrar en <http://hercules.cedex.es/Chac/>.

Con fines de comparación se implementó el modelo SWAT en cada una de las subcuencas. Un DEM SRTM del área de estudio se empleó para la delimitación de cuencas de aportación y el cálculo de los diferentes parámetros morfométricos requeridos por el modelo. La información respecto al tipo de suelo se reunió y los parámetros del suelo se determinaron con pruebas de laboratorio. El uso del suelo se obtuvo de una imagen LANDSAT7 ETM+ del 2 de octubre de 2011, mediante una clasificación supervisada aplicando el criterio del mínimo ángulo espectral (Richards y Jia, 2006; Chuvieco, 2002). Los parámetros de uso del suelo se tomaron de la base de datos del modelo SWAT, con modificaciones menores. Un mapa de tipo de suelo (Valarezo, 2007) fue validado y adaptado para implementar el modelo SWAT y esta validación se realizó mediante perforaciones y pozos en cada una de las unidades edafológicas identificadas. La prueba de infiltración se realizó in situ. Muestras inalteradas de suelo fueron obtenidas y las características generales de los horizontes de los suelos fueron registradas. Con todos los datos y los resultados de los análisis de laboratorio, los parámetros del tipo de suelo fueron determinados para cada unidad edafológica identificada.

La combinación del uso y tipo de suelo permitió determinar unidades de respuesta hidrológica (UHR). La información de tipo de suelo se utilizó para caracterizar el acuífero no confinado. Además, datos de precipitación y temperatura diaria, así como de precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa mensual para cada una de las estaciones fue usada para calcular la evapotranspiración empleando el método de Penman-Monteith. Los datos faltantes de precipitación fueron estimados mediante un análisis de correlación ortogonal entre estaciones vecinas geográficamente y con similares condiciones climáticas. En el caso de la temperatura, una ecuación de regresión entre elevación-temperatura fue determinada. Un proceso similar se aplicó para las otras variables.

Antes de la calibración, un análisis de sensibilidad fue realizado mediante el cambio sistemático de los valores de los parámetros del modelo y observando el efecto dichos cambios en los resultados obtenidos, seleccionando un número reducido de parámetros sensibles de importancia más alta en el cálculo y optimizándolos en la fase de calibración. El análisis de sensibilidad se realizó con el módulo que el modelo SWAT tiene para ello,

watching for the effect that such changes have on the obtained results, by selecting a reduced number of sensitive parameters of a higher relevance in the calculation and optimizing them in the calibration phase. The sensitive analysis was made using the module that the SWAT model has for this purpose, which combines the Latin hypercube sampling method with the one factor at a time (OAT) simulation (van Griensven *et al.* 2006). The Latin hypercube sampling method, in opposition to the conventional Monte Carlo method, makes a stratified sampling between the rank of possible values of each parameter; moreover, the OAT simulation assures that changes in the model can be attributed to a change made to the entrance variable in each simulation (van Griensven *et al.* 2006).

The SWAT model was calibrated manually, adjusting the values of the most sensitive parameters changing its initial values to no more than 12 %, using 70 % of the gathered records, and optimizing *R*, *EF*, and *RMSE*. The SWAT model parameters about soil loss were not considered in the calibration process, because the Temez model does not reproduce sediment losses, so the comparison between Temez model and SWAT model was made only with flow data. The validation was performed with the 30 % remaining from the record. Finally, a graphic comparison of calculated and observed flows was carried out. See Oñate-Valdivieso and Bosque (2014) for additional information on the implementation of the SWAT model for basins study.

RESULTS AND DISCUSSION

Calibration of parameters for the Temez model

The calibrated parameters for the Temez model in each one of the basins are shown in Table 2.

The maximum capacity of soil moisture (H_{max}) allows the definition of the threshold runoff (P_o), *i.e.*,

Table 2. Parameters for the Temez model calibrated for the studied basins.

Cuadro 2. Parámetros para el modelo Temez calibrado para las cuencas en estudio.

Sub basins	Excedance <i>C</i>	Maximum Humidity (<i>Hmax</i>)	Maximum Infiltration (<i>Imax</i>)	Branch of discharge <i>α</i>
Alamor	0.1	400	400	0.01
Amarillo	0.3	80	200	0.03
Catamayo	0.3	200	400	0.01
Macará	0.1	200	380	0.08
Pindo	2.0	150	230	0.02
Quiroz	0.8	150	200	0.01

y combina el método de muestreo del hipercubo Latino con la simulación de un factor a la vez (OAT) (van Griensven *et al.*, 2006). El muestreo mediante el hipercubo Latino, y en contraposición al método tradicional de Monte Carlo, realiza un muestreo estratificado entre el rango de los valores posibles de cada parámetro; además, la simulación OAT asegura que los cambios en el modelo se pueden atribuir a los cambios realizados en la variable de entrada en cada simulación (van Griensven *et al.*, 2006).

El Modelo SWAT fue calibrado manualmente ajustando los valores de los parámetros más sensibles cambiando su valor inicial no más de 12 % usando el 70 % de los registros recopilados y optimizando *R*, *EF* y *RMSE*. Los parámetros del modelo SWAT relativos a la pérdida de suelo no fueron considerados en el proceso de calibración porque el modelo Temez no reproduce pérdida de suelo; así, la comparación entre los modelos solo se realizó con datos de caudal. La validación se realizó con el 30 % restante de los registros. Después se efectuó una comparación gráfica de los caudales observados y calculados. En Oñate-Valdivieso y Bosque (2014) hay información adicional de la implementación del modelo SWAT en las cuencas en estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calibración de parámetros del modelo Temez

Los parámetros calibrados del modelo Temez para cada cuenca en estudio se presentan en el Cuadro 2.

La humedad máxima (H_{max}) permite definir el umbral de escorrentía (P_o), es decir la altura de precipitación por debajo de la cual no se produce escorrentía y así definir el excedente (T_i) compuesto por la escorrentía superficial y la infiltración hacia los acuíferos. En el cuadro 2 se muestra que los valores de H_{max} superan los 150 mm en la mayoría de los casos, con un valor máximo de 400 mm. Los valores que alcanza este parámetro evidencian una alta capacidad de almacenamiento de los suelos de la zona de estudio, los cuales están sometidos a un considerable déficit hídrico la mayor parte del año. Esta situación puede encontrarse en la subcuenca del río Alamor; en cambio, lo contrario se presenta en la subcuenca del río Amarillo que es árida en su parte baja pero presenta niveles mayores de precipitación durante el año, por lo cual los suelos presentan mejores condiciones de humedad y una menor capacidad máxima de infiltración.

El parámetro de excedencia *C* se usa para definir el umbral de escorrentía P_o actuando como un factor de ponderación de la diferencia entre la humedad

the rainfall below which there is no runoff; thus, the excess (T_p) is defined and it is composed of the runoff and infiltration into the aquifers. Table 2 shows that the values of H_{max} surpass 150 mm in most of the cases, reaching a maximum value of 400 mm. The values of this parameter show a high storage capacity of the soils in the surveyed zone, which experience a considerable water deficit during most of the year. This situation can be found at the sub-basin of the Alamor river. The opposite can be observed at the sub-basin of the Amarillo river, which is dry in its lower section but shows higher levels of rainfall throughout the year. For this reason, soils are more humid and have a lower maximum capacity of infiltration.

The parameter of excess C is used to determine the runoff threshold P_o and acts as a weighting factor of the difference between the maximum humidity of the soil and its humidity at a given moment. The values of parameter C (Table 2) are lower than 1; thus, controlling a possible sub-estimation of the excess produced when considering relatively high humidity factors.

The actual infiltration I is directly proportional to the maximum infiltration I_{max} , the former being a fraction of the latter. Additionally, the values of this parameter, which are included in Table 2, show a level of maximum infiltration corresponding with H_{max} . Since this is an arid zone, high levels of infiltration may be expected.

The coefficient α reaches average values between 0.01 and 0.08. This parameter is related to the contributions of groundwater flow to the base flow of the basins analyzed. The higher values can be found in the basins with a larger area, since these basins extend across zones with different levels of contribution of groundwater. In higher zones, which are usually more humid and exhibit better conditions of plant growth, the contribution of groundwater is higher, unlike lower zones, where the opposite occurs. The calibrated parameter in the larger basins is representative of such conditions.

Evaluation of the Temez model

The parameters used to determine the goodness of fit between the observed and calculated flows for the period of validations are included in Table 3. The graphical relation between observed and calculated flows using the Temez model is shown in Figure 3.

máxima del suelo y su humedad en un instante determinado. Los valores del parámetro C incluidos (Cuadro 2) son menores a la unidad, controlando posibles subestimaciones del excedente producidas al considerar factores de humedad relativamente altos.

La infiltración real I es directamente proporcional a la infiltración máxima I_{max} , y es una fracción de ésta. Al observar los valores de este parámetro (Cuadro 2) se observan importantes niveles de infiltración máxima, lo cual concuerda con los valores de H_{max} . Al ser una zona árida es de esperarse que existan grandes niveles de infiltración.

El coeficiente α alcanza valores medios entre 0.01 y 0.08. Este parámetro se relaciona con las aportaciones de agua subterránea al flujo base de cada una de las cuencas en análisis. Los valores mayores se presentan en las cuencas de mayor superficie que por su extensión abarcan zonas en las que hay aporte de aguas subterráneas de diferente magnitud. En las partes altas, generalmente más húmedas y en mejores condiciones de conservación vegetal, el aporte de las aguas subterráneas es mayor, a diferencia de las partes bajas donde ocurre lo contrario. El parámetro calibrado en las cuencas de mayor tamaño es representativo de dichas condiciones.

Evaluación del modelo Temez

Los parámetros usados para medir la bondad de ajuste entre los caudales observados y calculados para el período de validación se incluyen en el Cuadro 3. La relación gráfica entre los caudales observados y calculados se presenta en la Figura 3.

Table 3. Analysis of goodness of fit of Temez model. Summary of the calculated parameters.

Cuadro 3. Análisis de la bondad de ajuste del modelo Temez. Resumen de los parámetros calculados.

Sub-basin	Area (km ²)	R	EF	RMSE
Amarillo	262.00	0.64	0.63	7.32
Pindo	512.00	0.63	0.49	14.47
Alamor	607.67	0.72	0.35	9.11
Catamayo	1209.00	0.48	-0.82	10.72
Quiroz	2275.76	0.69	0.62	23.94
Macará	2641.69	0.82	0.27	53.01

In smaller basins (Amarillo, Pindo and Alamor), the model recreates the flows of the dry season better than those of the rainy season (Figure 3). As the size of the basin increases, an overestimation of the flows

En las cuencas de menor tamaño (Amarillo, Pindo y Alamor) el modelo reproduce los caudales de la temporada seca de mejor manera que en la temporada lluviosa. Al aumentar el tamaño de la cuenca se

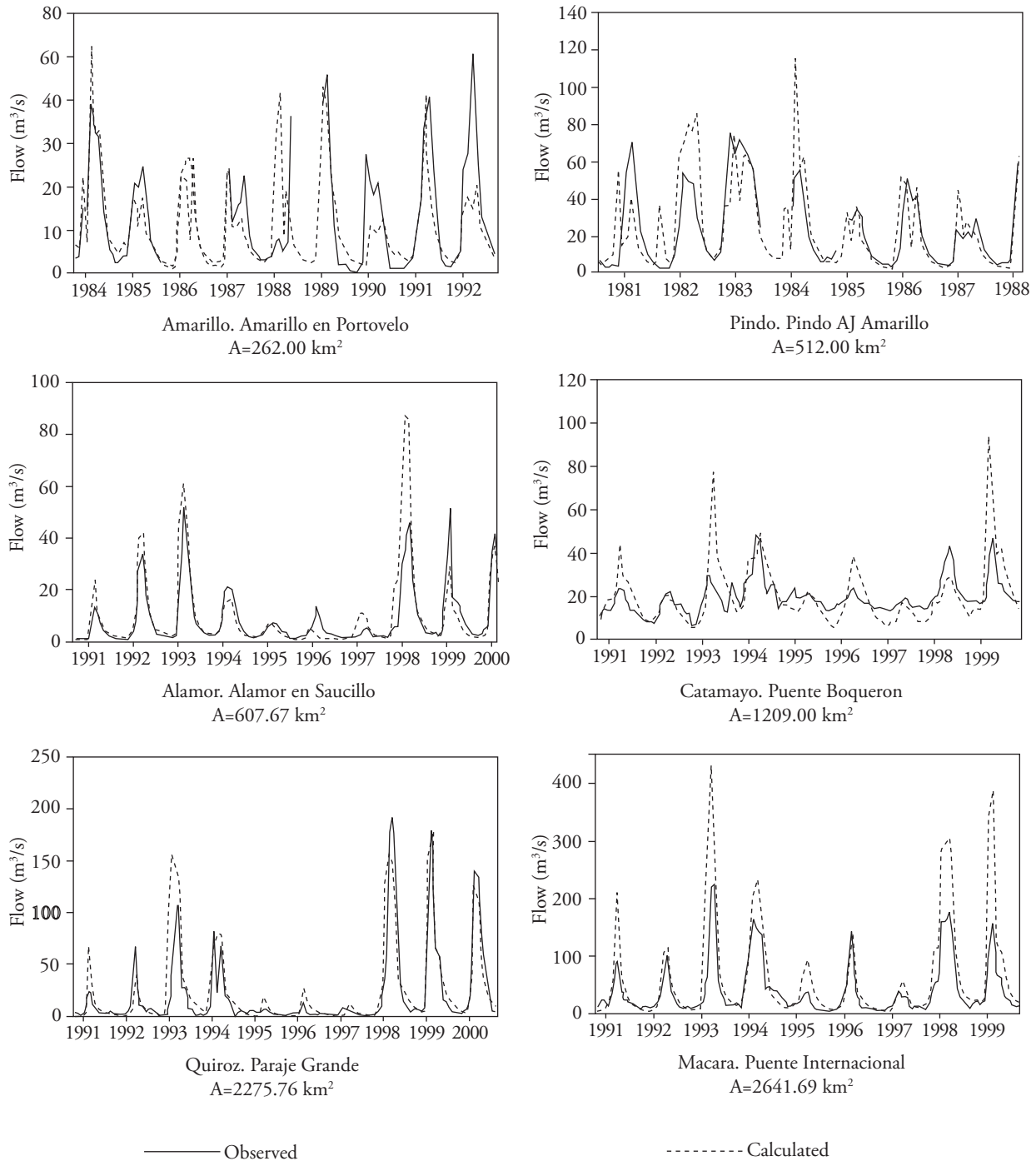


Figure 3. Flow ($m^2 s^{-1}$) observed and calculated using Temez model in the studied basins.

Figura 3. Flujo ($m^2 s^{-1}$) observado y calculado usando el modelo Temez en las cuencas estudiadas.

may be observed, and the correspondence between observed and calculated flows almost disappears. The overestimation of flows is due to the calculation of the flow as the product of the contribution (mm per month) multiplied by the area of the basin assuming that the levels of rainfall and evapotranspiration are uniform across the basin. This does not necessarily apply to medium-sized or large basins.

The Amarillo river basin shows a correlation coefficient of 0.64 and an efficiency EF of 0.63 (Table 3). These values confirm the existence of an acceptable adjustment between the observed and calculated values. The average quadratic error is $7.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which, if compared to the average flow recorded ($14.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), is excessive. In Figure 3, it is shown that the model does not accurately recreate peak flows, and the flows of the dry season are overestimated.

In the Pindo river basin, which approximately doubles the size of the Amarillo river basin, there was a correlation coefficient of 0.63 between the observed and calculated data, which is barely acceptable; besides, EF was 0.49, which is lower than that observed in the Amarillo river basin. The average quadratic error is $14.47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, which, if compared to the average flow of the Pindo river ($23.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), turns out to be excessive. The model overestimates flows. As shown in Figure 3, the best adjustment is produced in the flows of the dry season, and the peak flows shows the worst adjustment.

In the Alamor river basin (Table 3) there was a relatively good correlation between calculated and observed values ($R=0.72$); however, there is a low value of EF (0.35), with an average quadratic error of $9.11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ that surpasses the average observed flow of $7.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. It could be expected that with a high correlation coefficient $RMSE$ should be lower, but as shown in Figure 3, the model recreates the trend; therefore, the value of the correlation coefficient is satisfactory. In addition, the recorded peak flows are overestimated to a great extent by the model and this has an influence on $RMSE$. The EF exhibits a more realistic value of 0.35, which, although it is not optimal ($EF=1$), it gives an idea of the model's performance, which is, to a certain extent, acceptable.

The Catamayo river basin station (Table 3) presents the worst results, which means that there is no correlation between observed and calculated flows. A negative value of the Nash-Sutcliffe efficiency is

observa una sobreestimación de los caudales llegando casi a desaparecer la correspondencia entre los caudales observados y calculados. La sobreestimación de los caudales se debe a que el caudal se calcula como el producto de la aportación (mm/mes) por el área de la cuenca, considerando así que los niveles de precipitación y evapotranspiración son uniformes en toda la cuenca. Esto no se cumple necesariamente en cuencas de tamaño medio o grande.

La cuenca del río Amarillo presenta un coeficiente de correlación de 0.64 y una eficiencia EF de 0.63 (Cuadro 3), valores que confirman la existencia de un ajuste aceptable entre los valores observados y calculados. El error cuadrático medio es $7.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ el cual, comparado con el caudal promedio registrado ($14.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), es excesivo. En la Figura 3 se muestra que el modelo no reproduce con fidelidad los caudales picos y los caudales de la temporada seca son sobreestimados.

En la cuenca del río Pindo, aproximadamente el doble del tamaño de la del río Amarillo, hay un coeficiente de correlación entre los datos observados y calculados de 0.63 que es apenas aceptable, con una EF de 0.49 inferior a la observada en la cuenca del río Amarillo. El error cuadrático medio es $14.47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que comparado con el caudal medio en el río Pindo ($23.43 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) resulta excesivo. El modelo sobreestima los caudales y se observa en la Figura 3 que el mejor ajuste se produce en los caudales de la temporada seca, y los caudales picos muestran el peor ajuste.

En la cuenca del río Alamor (Cuadro 3) se observa una correlación relativamente buena entre los valores calculados y observados ($R=0.72$), aunque hay un valor bajo de la EF (0.35), con un error cuadrático medio de $9.11 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ que supera al caudal medio observado que es $7.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Podría esperarse que con un coeficiente alto de correlación el $RMSE$ debería ser menor, pero al observar la Figura 3 se comprueba que la tendencia es bien reproducida por el modelo, de ahí el valor satisfactorio del coeficiente de correlación. Además los caudales pico registrados son sobreestimados por el modelo (lo cual influye en el $RMSE$). La EF tiene un valor un poco más realista, con 0.35 que no es óptimo ($EF=1$), pero da una idea de que el modelo tiene un desempeño hasta cierto punto aceptable.

La cuenca del río Catamayo (Cuadro 3) presenta los peores resultados y no existe correlación entre los caudales observados y calculados. Al obtenerse un

obtained; it can be considered that the mean of the observed values is a better predictor than the model itself.

The Quiroz river basin shows acceptable values of the correlation coefficient ($R=0.69$) and the Nash-Sutcliffe efficiency ($EF=0.62$), although the excessive average quadratic error, which duplicates the average observed flow, shows the overestimation of the calculated flows.

The Macara river basin has the best correlation coefficient ($R=0.82$); however, the low value of the Nash-Sutcliffe efficiency ($EF=0.27$) implies that the model cannot recreate the hydrological behavior of the basin. In addition, the average quadratic error almost doubles the average observed flow by overestimating flows in general.

The study area is mainly mountainous, with irregular rainfall and since the average number of rainfall station is only one every 270 km², and it is assumed that the existing network of meteorological stations in the area does not have sufficient density to accurately reflect the spatial variability of precipitation. Additionally, historical records of precipitation, temperature and especially flow, showed significant information gaps that, to some extent, point to problems in the management of meteorological and hydrological stations in the area.

Like precipitation, slope, soil type, and land use present a significant spatial variation. Therefore, considering a single lumped value, representative of each condition may be strictly valid only for very uniform and small basins.

Comparison with SWAT model

Meteorological data was the most difficult to achieve in the study area, because the number of weather stations is low, only 14. Information about wind speed, solar radiation and relative humidity was the scarcest.

The sensitivity analysis reported the 35 most sensitive parameters, which were classified in a scale of 35 levels and 1 corresponds to the most sensitive parameter. Table 4 shows the first 10 parameters reported by sensitivity analysis and their influence levels in the model.

As shown in Table 4, the model turned out to be sensitive to the curve number CN2 because this parameter is used to separate effective precipitation

valor negativo de la eficiencia de Nash-Sutcliffe se considera que la media de los valores observados es mejor predictor que el modelo en sí.

La cuenca del río Quiroz presenta valores aceptables del coeficiente de correlación ($R=0.69$) y de la eficiencia de Nash-Sutcliffe ($EF=0.62$), aunque el excesivo error cuadrático medio, que duplica el caudal medio observado, evidencia la sobreestimación de los caudales calculados.

La cuenca del río Macará presenta el mejor coeficiente de correlación ($R=0.82$), pero el valor bajo de la eficiencia de Nash-Sutcliffe ($EF=0.27$) implica que el modelo no puede reproducir el comportamiento hidrológico de la cuenca. Además, el error cuadrático medio casi duplica el caudal medio observado por sobreestimar los caudales en general.

La zona de estudio es principalmente montañosa, con una distribución irregular de la precipitación y en promedio solo hay una estación pluviométrica cada 270 km², y se presume que la red de estaciones meteorológicas en la zona no posee la densidad suficiente para reflejar con precisión la variación espacial de la precipitación. Además, los registros históricos de precipitación, temperatura y sobre todo de caudal, presentaron vacíos notables de información que, hasta cierto punto, evidencian problemas en el manejo de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la zona.

Al igual que la precipitación, la pendiente, el tipo de suelo y su uso presentan una significativa variación espacial. Por lo tanto, considerar un valor único, concentrado, representativo de cada condición puede ser válido en cuencas muy uniformes y de dimensiones reducidas.

Comparación con el modelo SWAT

La obtención de datos meteorológicos en la zona de estudio fue difícil porque el número de estaciones climáticas es reducido, solamente 14 en el área de estudio. La información sobre velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa fue aún más escasa.

El análisis de sensibilidad reportó los 35 parámetros más sensibles los cuales fueron clasificados en una escala de 35 niveles en la que 1 corresponde al parámetro más sensible. El Cuadro 4 muestra los 10 primeros parámetros reportados por dicho análisis y su nivel de influencia en el modelo.

Table 4. Sensitive parameters of SWAT model.
Cuadro 4. Parámetros sensibles del modelo SWAT.

Parameter	Symbol	Ranking
Moisture condition II curve number	CN2	1
Biological mixing efficiency	BIOMIX	2
Average slope	SLOPE	3
Surface runoff lag coefficient	SURLAG	4
USLE support practice factor	USLE_P	5
Available water capacity	SOL_AWC	6
Linear parameter for calculating the maximum amount of sediment that can be reentrained during channel sediment routing	SPCON	7
Moist soil albedo	SOL_ALB	8
Soil evaporation compensation coefficient	ESCO	9
Baseflow recession constant	ALPHA_BF	10

from total precipitation. Therefore, there is a direct effect on the runoff calculation; furthermore, the available water capacity SOL_AWC determines surface runoff since it causes higher or lower infiltration. The Baseflow recession constant ALPHA_BF will regulate the contributions of groundwater to the flow. The moist soil albedo SOL_ALB and the soil evaporation compensation coefficient ESCO regulated losses by evapotranspiration. An important influence was observed in the average slope SLOPE and the surface runoff lag coefficient SURLAG, thus directly affecting the concentration time of each sub-basin and varying the temporal occurrence of peak flows. The soil loss parameters were not considered.

A graphical analysis of the relationship between the observed flow and calculated flow with the SWAT model is presented in Figure 4. As seen in that figure, the SWAT model provides a better representation of trends and better fit with the observed values, even when considering the peak flows of the wet season and the low flows in the dry season.

Comparative analysis of SWAT/ Temez model performance by validation parameters is summarized in Table 5. There it is observed that in all cases the SWAT model presents better correlation coefficient, reaching in most cases values higher than 80 %. The Nash-Sutcliffe efficiency is significantly higher when calculated with the values obtained with the SWAT model. Similarly, the RMSE was significantly smaller on values calculated with the SWAT model.

As a semi-distributed SWAT model, a better performance in all of basins may be expected. However, even though in the smaller basins, the

En el Cuadro 4 se observa que el modelo fue muy sensible al número de la curva CN2, porque este parámetro permite separar la precipitación efectiva de la precipitación total, y por ende tiene un efecto directo en el cálculo de la escurrentía. Además, el contenido de humedad del suelo SOLAWC condiciona el escurrimiento superficial porque causa mayor o menor infiltración. La constante de recesión del flujo base ALPHA_BF regula las aportaciones de las aguas subterráneas al caudal. El albedo del suelo húmedo SOL_ALB y el coeficiente de compensación de la evaporación del suelo ESCO regularon las pérdidas por evapotranspiración. Una influencia importante presentaron la pendiente media SLOPE y el de retardo de la escurrentía superficial SURLAG, afectando directamente el tiempo de concentración de cada subcuenca y variando la ocurrencia temporal de los caudales picos. Los parámetros de pérdida de suelo no fueron considerados.

Un análisis gráfico de la relación entre los caudales observados y calculados con el modelo Temez y el modelo SWAT se presenta en la figura 4. Allí se observa que el modelo SWAT presenta una mejor representación de las tendencias y un ajuste mayor con los valores observados, incluso si se consideran los caudales de crecida de la temporada húmeda, así como los de estiaje en la temporada seca.

El análisis comparativo del desempeño del modelo Temez con el modelo SWAT se resume en el Cuadro 5. Allí se observa que en todos los casos el modelo SWAT presenta un mejor coeficiente de correlación y en la mayoría de los casos alcanza valores superiores al 80 %. La eficiencia de Nash-Sutcliffe

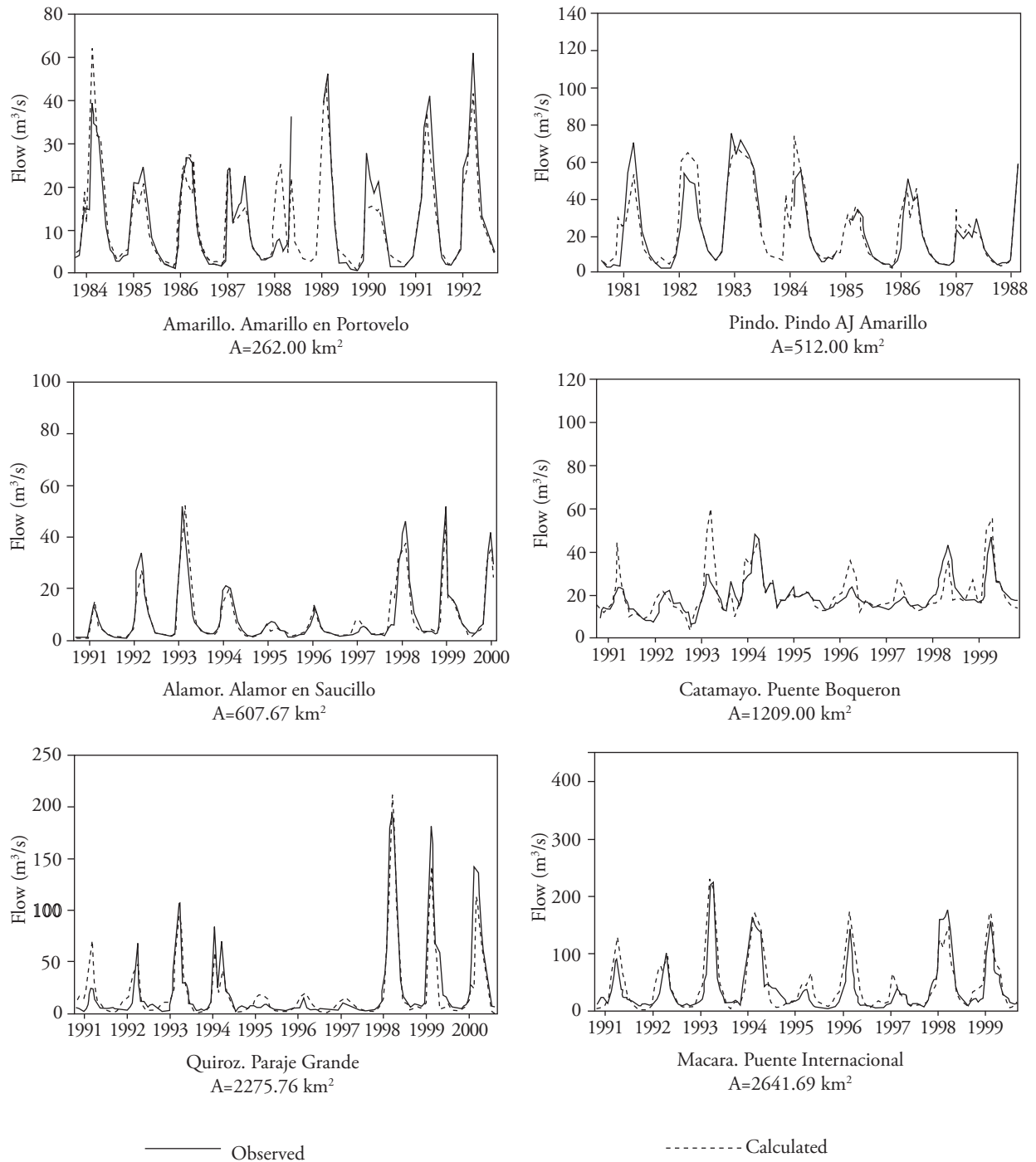


Figure 4. Flow (m² s⁻¹) observed and calculated using SWAT model in the studied basins.
Figura 4. Flujo (m² s⁻¹) observado y calculado usando el modelo SWAT en las cuencas estudiadas.

Temez model performance is lower to that of the SWAT model, which could be acceptable considering the lower amount of information required for implementation of the Temez model.

es significativamente al calcular con los valores obtenidos con el modelo SWAT. De manera similar, el error cuadrático medio fue significativamente menor en los valores calculados con el modelo SWAT.

Table 5. Comparative analysis of SWAT/ Temez model performance by validation parameters.
Cuadro 5. Análisis comparativo del desempeño del medelo SWAT/Temez mediante parámetros de validación.

Sub basin	Gauging Station	Model	R ²	EF	RMSE
Pindo	Pindo Aj.	TEMEZ	0.63	0.49	14.47
		SWAT	0.86	0.80	9.07
Amarillo	Amarillo en Portovelo	TEMEZ	0.64	0.63	7.32
		SWAT	0.88	0.87	4.29
Alamor	Alamor en Saucillo	TEMEZ	0.72	0.35	9.11
		SWAT	0.85	0.84	4.43
Quiroz	Paraje Grande	TEMEZ	0.69	0.62	23.94
		SWAT	0.83	0.83	16.19
Catamayo	Pte. Boqueron	TEMEZ	0.48	-0.82	10.72
		SWAT	0.55	0.20	7.07
Macará	Pte. Internacional	TEMEZ	0.82	-0.27	53.01
		SWAT	0.81	0.77	22.64

Considering that in many places the lack of information is a reality, the Temez model may be a viable option when applied to a relatively small watershed. Additionally, the Temez model could be used as a basis for a semi-distributed model applicable to larger watersheds.

CONCLUSIONS

The Temez model showed some effectiveness in reproducing the flow in dry seasons, with very low effectiveness in reproducing the flows in the rainy season. The correlation coefficient, the efficiency of Nash-Sutcliffe and RMSE were less than satisfactory in most of the basins studied.

The overall accuracy of the results decreased with an increase in watershed area. The moderate effectiveness shown by the Temez model can be attributed to the low density of the network of weather stations, which are unable to properly characterize precipitation and temperature. A lumped model with monthly intervals over simplifies the natural process and it does not reproduce correctly the behavior of the basin.

The SWAT model showed better simulation capabilities, due to the nature of its semi-distributed simulation, but its implementation required a large amount of information, which in some cases may not be readily available.

The Temez model showed simulation capabilities lower to those of SWAT model with a large number of parameters. The Temez model may be efficient in

El SWAT es un modelo semidistribuido y se podría esperar un mejor desempeño en todas las cuencas, pero aún en las cuencas más pequeñas el desempeño del modelo Temez es menor al del modelo SWAT, lo cual podría aceptarse dada la menor cantidad de información requerida para implementar.

Si se considera que en muchos lugares la carencia de información es una realidad, el modelo Temez puede ser una opción viable en cuencas relativamente pequeñas. Además, el modelo Temez se podría usar como base de un modelo semidistribuido aplicable a cuencas más grandes.

CONCLUSIONES

El modelo mostró cierta eficacia para reproducir los caudales en temporada seca, pero con eficiencia muy baja al reproducir los caudales en la época de lluvias. El coeficiente de correlación, la eficiencia de Nash-Sutcliffe y el *RMSE* fueron menos que satisfactorios en la mayoría de las cuencas estudiadas.

La precisión global de los resultados decrece al aumentar la superficie de la cuenca. La efectividad moderada mostrada por el modelo Temez se puede deber a la baja densidad de la red de estaciones climáticas, la cual no puede caracterizar apropiadamente la lluvia y la temperatura. Un modelo concentrado de paso mensual, realiza simplificaciones del proceso natural, por lo que no reproduce correctamente el comportamiento de la cuenca.

El modelo SWAT presentó mejores capacidades de simulación, debido a su naturaleza de simulación

areas with low spatial variability of input data and model parameters, so its use in small basins may be indicated.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to the Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación of Ecuador (SENESCYT) for funding this research through its scholarships program.

LITERATURE CITED

- Bouraoui, F., S. Benabdallah, A. Jrad, and G. Bidoglio. 2005. Application of the SWAT model on the Medjerda river basin (Tunisia). *Phys. Chem. Earth* 30: 497–507.
- Carpenter, T. M., and K. P. Georgakakos. 2006. Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *J. Hydrol.* 329: 174–185.
- Chuvienco, E. 2002. *Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel, Barcelona, España. 586 p.
- DiLuzio, M., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and S. L. Neitsch. 2002. *ArcView Interface for Swat2000, User's Guide*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. 345 p.
- Estrela, T. 1999. Los modelos de simulación integral de cuenca y su utilización en estudios de recursos hídricos. *Ing. Civil* 72: 83-95.
- García, A., A. Sainz, J. A. Revilla, C. Alvarez, J. A. Juanes, and A. Puente. 2008. Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain. *J. Hydrol.* 356: 312–326.
- Murillo J. M., I. C. Rodríguez, J. C. Rubio, y J. A. Navarro. 2005. Mantenimiento hídrico de cursos fluviales y uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Aplicación al sistema de explotación Quiebrajano-Víboras (Jaén). *In: VI Simposio del Agua en Andalucía*. López-Geta, J. A., J. C. Rubio, y M. Martín M. (eds). Sevilla 1 a 3 de junio. Instituto Geológico y Minero de España. pp: 787-798.
- Murillo, J. M., and J. A. Navarro. 2011. Aplicación del modelo de Témez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación de un modelo de uso conjunto. *Bol. Geol. Minero* 122: 363-368.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282–290.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King. 2002. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000*. Texas Water Resources Institute, College Station, Texas. pp: 506.
- semidistribuida, pero su implementación requirió gran cantidad de información que en otros casos puede no estar disponible fácilmente.
- El modelo Témez mostró capacidades de simulación menores al modelo SWAT con un gran número de parámetros. El modelo Témez podría ser eficiente en zonas con baja variabilidad espacial de los datos de entrada y de los parámetros del modelo, por lo que su uso en cuencas pequeñas puede ser adecuada.
- Fin de la versión en Español—
- *—
- Oñate-Valdivieso, F., and J. Bosque. 2014. Semidistributed hydrological model with scarce information: Application to a large South American binational basin. *J. Hydrol. Eng.* 19: 1006-1014.
- Pizarro R., M. Soto, C. Farias, y C. Jordan. 2005. Aplicación de dos modelos de simulación integral hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque (Valdivia)* 26: 123-129.
- Ponce, V. M., 1989. *Engineering Hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ. 640 p.
- Richards, J. A., and X. Jia. 2006. *Remote Sensing Digital Image Analysis*, 4th edition. Springer, Berlin, Germany. 439 p.
- Rivera-Toral, F., S. Pérez-Nieto, L. A. Ibáñez-Castillo, and F. R. Hernández-Saucedo. 2012. Applicability of SWAT model for estimating water erosion in México's watersheds. *Agrociencia* 46: 101-105.
- Salas-Martínez, R., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, M. R. Martínez-Menes, and D. S. Fernández-Reynoso. 2014. Hydrological modelling of Mixteco River watershed in the State of Oaxaca, México. *Agrociencia* 48: 1-15.
- Temez, J. R. 1977. *Modelo matemático de transformación. Precipitación. Aportación*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica ASINEL, Madrid. 39 p.
- Thornthwaite, C. W., and J. R. Mather. 1957. *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology. *Publications Climatol.* 10: 185-311.
- Valarezo, J. I. 2007. Validación y complementación de los estudios de suelos de la cuenca binacional Catamayo Chira con miras a implementar el modelo SWAT. *Proyecto Binacional Catamayo Chira-Proyecto 621 TWINLATIN, Loja-Piura, Spain*. 68 p.
- Van Griensven, A., T. Meixner, S. Grunwald, T. Bishop, M. Diluzio, and R. Srinivasan. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* 324: 10–23.