



Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú

Hydrological modeling with a semi-distributed approach in the Chillan River Basin, Peru

MIGUEL ANGEL ASTORAYME VALENZUELA ^{*1}, JAVIER GARCÍA HERNÁNDEZ², WILSON SUAREZ¹, OSCAR FELIPE¹, CHRISTIAN HUGGEL³ & WALTER MOLINA⁴

¹Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú

²Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin

³Universidad de Zúrich

⁴Servicio de Agua Potable y Alcantarillados de Lima

RESUMEN

El presente artículo está orientado al análisis comparativo de diferentes modelos hidrológicos en la cuenca del río Chillón. Esta cuenca, ubicada aproximadamente a 130 kilómetros al sur de la ciudad de Lima, fue seleccionada para evaluar la capacidad de simulación de los modelos Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), Soil Contribution (SOCONT), Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) y Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC); considerando un enfoque de modelización conceptual semidistribuida. Se utilizó para ello el programa de modelización hidrológica e hidráulica RS MINERVE. Para los análisis comparativos de los modelos (GR4J, SOCONT, HBV y SAC) se delimitó un área de aproximadamente 1253 km² de la cuenca del río Chillón, denominado Cuenca Magdalena. Esta área se dividió en 25 subcuencas y 122 unidades hidrológicas aportantes llamadas "bandas altitudinales", con una superficie media de 10 km². Para la modelización hidrológica se consideró información hidrometeorológica a paso de tiempo diario desde septiembre del 2004 hasta febrero del 2014. Además, las series simuladas han sido evaluadas respecto a los caudales diarios observados mediante 4 criterios de eficiencia: Nash, Nash-ln, Coeficiente de Pearson (r) y Error relativo de la raíz cuadrática media (RRMSE). Las series simuladas por los modelos HBV y SAC, con un mayor número de parámetros, presentan mejores resultados tanto en épocas de avenidas (Nash entre 0.91 a 0.80) como en estiaje (Nash-ln entre 0.92 a 0.78). Sin embargo, las variaciones en los indicadores estadísticos de bondad de los modelos GR4J y SOCONT no muestran una gran variación estadística respecto a los anteriores (Nash entre 0.88 a 0.73 y Nash-ln entre 0.87 a 0.62). Por otro lado, los modelos GR4J y SOCONT con menores parámetros tienden a representar con mayor detalle sus periodos de avenida respecto a los meses de estiaje.

Palabras claves: Cuenca Chillón, Modelización hidrológica, RS MINERVE, GR4J, SOCONT, HBV, SAC.

ABSTRACT

This paper focuses on the comparative analysis of different hydrological models in the Chillan River basin. This basin, located approximately 130 kilometers south of Lima, was selected to evaluate the ability of simulation of the Genie Rural à 4 Paramètres Journalier (GR4J), the Soil Contribution (SOCONT) hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) and the Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC) models, considering a semi-distributed conceptual modeling approach. To this end, the program of hydrological and hydraulic modeling MINERVE RS was used. For the comparative analysis of the models (GR4J, SOCONT, HBV and SAC) an area of approximately 1253 km² of Chillan river basin, called Magdalena Basin was delimited. This area was divided into 25 sub-basins and 122 hydrological contributing units called "altitudinal bands", with a mean area of 10 km². For the hydrological modeling at daily time-step it was considered information from September 2004 until February 2014. In addition, simulated series have been evaluated in relation to the observed daily discharge, considering four efficiency criteria: Nash, Nash-ln, Coefficient Pearson (r) and relative root mean squared error (RRMSE). The simulated series using the HBV and SAC models, with a greater

*M.astoraymev@pucp.pe

number of parameters, have shown better results both in times of floods (Nash between 0.91 to 0.80) and low water level (Nash-ln between 0.92 to 0.78). However, variations in the statistical skills indicators of the GR4J and SOCONT models do not show a great statistical variation from the previous ones (between 0.88 to 0.73 Nash and Nash-ln between 0.87 to .62). On the other hand, GR4J and SOCONT models, with less parameters, tend to represent in detail their floods periods in relation to the low water level months.

Keywords: Chillón Basin, Hydrological modeling, RS MINERVE, GR4J, SOCONT, HBV, SAC.

INTRODUCCIÓN

La expansión demográfica ha generado que actualmente más del 30.8% de la población (INEI, 2007) esté situada en el departamento de Lima, principalmente en la ciudad y alrededores. Como consecuencia, existe un déficit hídrico en épocas de estiaje para las principales cuencas de la costa, siendo la cuenca del río Chillón una de ellas (INRENA, 2003). Por otro lado, en los últimos años, la ocurrencia de eventos extremos asociados al agua se viene intensificando en el Perú por efecto del cambio climático. La cuenca del río Chillón, al igual que otras cuencas de la costa, revela una alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de huaycos (deslizamientos *landslides*), crecidas e inundaciones que ocasionan fuertes impactos en la población, infraestructura, servicios, transportes, etc. (INDECI, 2010). En este contexto el modelamiento hidrológico en el Perú toma gran relevancia desde inicios de la década pasada; durante esta década se realizaron diversos estudios de modelamiento meteorológico e hidrológico en el contexto del cambio climático (SENAMHI, 2009 y MINAM, 2010).

En la actualidad, no existe un sistema de monitoreo hidrológico que pueda simular y predecir el comportamiento a futuro de la escorrentía en la cuenca del río Chillón a fin de poder monitorear y dar aviso a la población de eventos hidrológicos extremos que podrían acontecer, así como mejorar la gestión del recurso hídrico en la cuenca. Por lo que el objetivo de este artículo es evaluar y comparar la capacidad de respuesta de los modelos de lluvia-escorrentía bajo un enfoque espacial semidistribuido, y conocer qué modelos son los más adecuados para aplicarlos en la elaboración futura de un sistema de alerta temprana en la cuenca del río Chillón. Al respecto, se prevé como objetivo futuro y final la implementación de una plataforma integrada de monitoreo y predicción hidrológica de la cuenca del río Chillón "como ya se utiliza en el Canton de Valais en Suiza (García Hernández et al., 2014)" para la previsión y gestión de avenidas.

Para la modelización se ha utilizado la plataforma integrada de modelamiento RS MINERVE (Routing System MINERVE, Foehn et al., 2015; García Hernández et al., 2015), que es un software diseñado para el modelamiento hidrológico e hidráulico, estructurándose con un esquema conceptual semidistribuido.

ZONA DE APLICACIÓN

La cuenca del río Chillón se ubica en la vertiente del Pacífico y sus aguas discurren de este a suroeste, se localiza entre los paralelos 11°20'S–12°00'S y 76°20'O–77°10'O, y altitudinalmente varía de 0 a 5260 m s.n.m; de los 2210 km² de extensión aproximada, 966 km² (42%) corresponden a la cuenca húmeda. Su nacimiento se encuentra en las inmediaciones del flanco occidental de la cordillera La Viuda, de la cual recibe sus deshielos. El río Chillón recibe aportes de agua principalmente de los ríos Yamacoto, Huancho, Ucaña y Quisquichaca. La cuenca comprende a 19 distritos de las provincias de Lima, Canta y la provincia Constitucional de Callao.

Área de estudio: Subcuenca Magdalena

Para el área de estudio se ha delimitado una subcuenca que llamaremos Magdalena tomando en cuenta tanto la estación hidrológica de Obrajillo como la estación hidrológica Puente Magdalena (Figura 1). Esta última ha sido definida como la desembocadura del área de estudio, con una extensión aproximada

de 1253 km². La zona alta, desde 4000 hasta 5260 m s.n.m., presenta temperaturas medias anuales por debajo de los 6 °C y precipitaciones medias del orden de 700 mm/año. La zona media (3100 a 4000 m s.n.m.) presenta temperaturas medias anuales entre 6 y 12 °C, con precipitaciones medias de 500 mm/año. Finalmente, la zona baja, de 970 hasta 3100 m s.n.m., presenta temperaturas en un rango entre 18 y 24 °C y precipitaciones de 200 mm/año. La escorrentía presente en el área de estudio es la más relevante para la cuenca del río Chillón, siendo el caudal medio multianual de 5.6 m³/s.

Información hidrometeorológica disponible

De la red pluviométrica administrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) se han considerado 19 estaciones meteorológicas circunscritas al área de estudio, elevaciones con 14 estaciones con datos de precipitación y 7 de temperatura (Figura 1). Además, la cuenca del río Chillón cuenta con dos estaciones hidrológicas. La primera denominada Obrajillo se ubica a una altitud de 2710 m s.n.m. y cuenta con registros históricos diarios desde el año 1968, con una interrupción de 12 años entre 1984 y 1996. Aguas abajo, en el distrito de Santa Rosa de Quives y a una altitud de 930 m s.n.m., se ubica la estación Puente Magdalena, con registro de aforo discontinuo (años hidrológicos 1947–1984; 2004–2010 y 2012–2013).

Para el análisis se ha considerado información hidrometeorológica disponible desde el año 2004 hasta 2014, porque tiene un registro homogéneo con algunos vacios diarios de información (solo Puente Magdalena presenta un vacío de información de septiembre del 2012 hasta agosto del 2013).

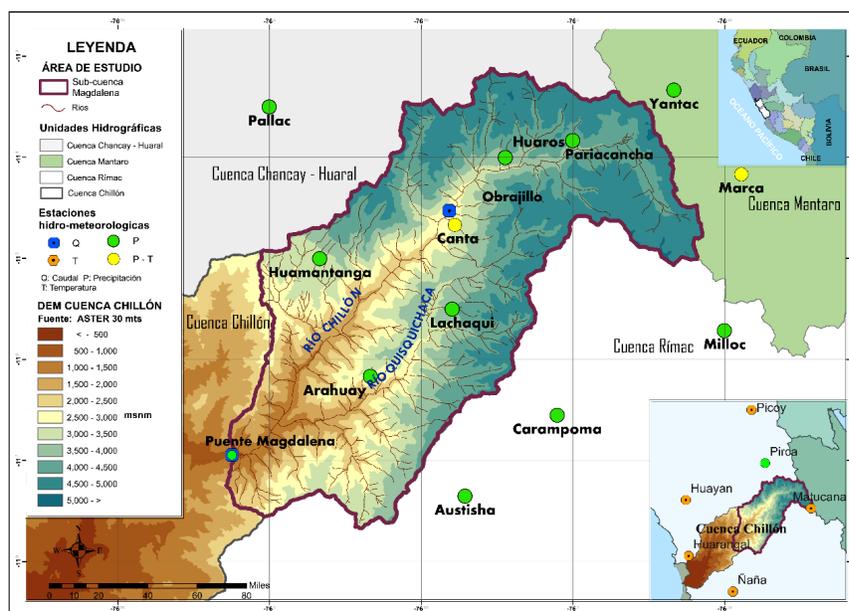


Fig. 1. Zona de aplicación, área de estudio y ubicación de estaciones hidrometeorológicas

MODELOS HIDROLÓGICOS

El programa hidrológico e hidráulico RS MINERVE fue desarrollado por el "Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin" (CREALP) junto con la Oficina de Ingeniería HydroCosmos S.A., con la colaboración de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) en Suiza, la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) en España y la Asociación Hydro10.

El RS MINERVE está diseñado para usarse como una herramienta en el modelamiento hidrológico e hidráulico, basado en un esquema conceptual semidistribuido. La innovación de este programa

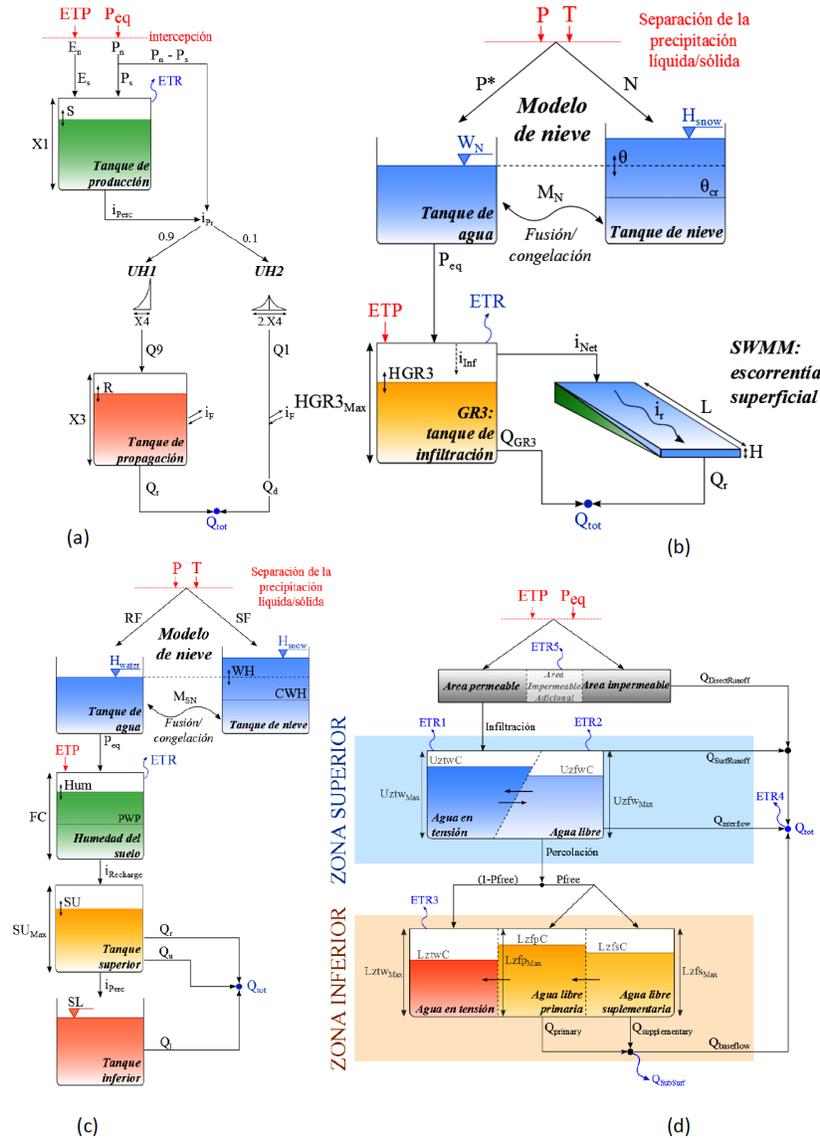


Fig. 2. Esquema de los modelos lluvia–escorrentía: (a) GR4J, (b) SOCONT, (c) HBV y (d) SAC Fuente: García et al.

consiste en su capacidad para modelar no solo sistemas hidrológicos complejos con fusión de la nieve y derretimiento de los glaciares o escorrentía superficial y subterránea, sino también estructuras hidráulicas con centrales hidroeléctricas, embalses, derivaciones o consumos de agua, entre otros. Gracias a estas funcionalidades, y a su interface de fácil comprensión, RS MINERVE es capaz de controlar y optimizar esquemas hidrológicos e hidráulicos de diferentes grados de complejidad.

Modelo lluvia–escorrentía GR4J

El modelo GR4J ("Génie Rural à 4 paramètres Journalier") es un modelo determinístico–empírico desarrollado en Francia (Perrin et al., 2003). Realiza la representación de descargas medias diarias con 4 parámetros (Tabla 1), y requiere de información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar series de caudales. Este modelo es una versión modificada del modelo GR3J, originalmente

propuesto por Edijatno & Michel (1989), el cual más tarde fue mejorado por Nascimento (1995) y Edijatno et al. (1999).

El modelo GR4J (Figura 2a) cuenta con dos reservorios que se encargan de almacenar la precipitación neta y donde se producen los fenómenos de percolación e infiltración. Los procesos de precipitación sólida no se toman en cuenta en este modelo.

Modelo lluvia–escorrentía SOCONT

Este modelo desarrollado por Consuegra & Vez (1996) presenta una estructura similar a los modelos GR (Edijatno & Michel, 1989). El modelo SOCONT (Soil Contribution) articula en serie a tres modelos hidrológicos de menor complejidad. El modelo Snow–GSM (Glacier Snow Melting), el primero de ellos, definido como un modelo determinístico conceptual, simula la evolución transitoria de la acumulación de la nieve en función de la temperatura (T) y la precipitación (P_{eq}); la salida de este modelo es llevado al modelo GR3 (Génie Rural à 3 paramètres), el cual usa la precipitación neta y la evapotranspiración para producir una infiltración y un caudal base y por último las salidas del modelo GR3 es transitada por el modelo SWMM ("Storm Water Management Model") que finalmente produce la escorrentía superficial.

El modelo SOCONT (Figura 2b) propone un reservorio lineal para la contribución de la nieve, otro no lineal que representa el agua subterránea y un último también no lineal para la escorrentía directa. En total, 11 parámetros de calibración representan a este modelo (Tabla 1), de los cuales 6 corresponden al submodelo de nieve (Snow–GSM), el cual separa la precipitación líquida de la sólida.

Modelo lluvia–escorrentía HBV

Este modelo fue desarrollado por StenBergström (1992) en el Instituto de Meteorológico e Hidrológico de Suecia. El modelo HBV (Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning), determinístico–conceptual, estima la escorrentía en una cuenca a partir de datos de precipitación, temperatura y evapotranspiración a paso diario. El HBV se utiliza para la predicción repentina de crecidas en el norte de Austria (Bloshtvet et al., 2007). Está representado por diversas rutinas (Figura 2c) como el derretimiento de nieve (evaluado por un método grado–día, al igual que el modelo SOCONT), el cálculo de humedad y evapotranspiración, o la evolución del agua subterránea. Estos procesos se describen gracias a tres reservorios configurados por ecuaciones lineales y por una función triangular (Seibert, 1997). El modelo ha tenido aplicaciones en diseño de aliviaderos (Bergström, 1992; Harlin, 1992), y utiliza un total de 14 parámetros (Tabla 1), de los cuales 6 corresponden al submodelo de nieve (Snow–GSM), que al igual que el modelo SOCONT separa la precipitación líquida de la sólida.

Modelo lluvia–escorrentía SAC

Este modelo ha sido desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos División Norte conjuntamente con el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio de Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de Recursos Hídricos, en Sacramento, California. El SAC o Sacramento Soil Moisture Accounting (Burnash et al., 1973) es un modelo determinístico conceptual que requiere información de precipitación y evapotranspiración media diaria para generar descargas del mismo paso de tiempo. El modelo, con una gran capacidad para simular descargas medias diarias, requiere de 16 parámetros para su calibración (Tabla 1), aun sin disponer de un submodelo de nieve. Este gran número de parámetros implica un conocimiento profundo de la cuenca a simular, con información sobre la cobertura vegetal o áreas permeables e impermeables. A finales de los 90, el modelo SAC–SMA fue implementado en la cuenca del río Rímac y es actualmente administrado por el SENAMHI del Perú (Metzger et al., 2001).

El modelo SAC se estructura en tres reservorios complejos, todos ellos influidos por la evapotranspiración. El primero, de color plomo (Figura 2d), está dividido en sectores permeables e impermeables que producen escorrentía superficial cuando la lluvia supera la tasa de infiltración. El

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO CHILLÓN

Tabla 1. Parámetros de los modelos lluvia escorrentía

Modelo	Parámetro	Descripción	Unidad
GR4J	X1	Capacidad del depósito de producción	mm
	X2	Coefficiente de intercambio de agua	mm
SOCONT	X3	Capacidad del depósito de laminación	mm
	X4	Tiempo base de los hidrogramas unitarios	d
	An	Coefficiente de deshielo	mm/°C/día
	ThetaCri	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	-
	Tcp1	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida	°C
	Tcp2	Temperatura máxima crítica para la precipitación líquida	°C
	Tcf	Temperatura crítica de la nieve	°C
	bp	Coefficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida	s/m
	HGR3Max	Altura máxima del reservorio de infiltración	mm
	KGR3	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración	1/s
	L	Ancho del plano	mm
	J0	Pendiente del plano	-
	Kr	Coefficiente de Strickler	$m^{1/3}/s$
	HBV	CFMax	Coefficiente de deshielo
CFR		Factor de congelación	-
CWH		Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	-
TT		Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	°C
TTInt		Intervalo de temperatura para lluvia nieve	°C
TTSM		Temperatura umbral para el derretimiento de nieve	°C
Beta		Coefficiente forma	-
FC		Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	mm
PWP		Punto de marchitez permanente del suelo	mm
SUMAX		Nivel umbral de agua del Reservorio superior (Upperreservoir)	mm
Kr		Coefficiente de liberación del flujo superficial	1/día
Ku		Coefficiente de liberación del interflujo	1/día
Kl		Coefficiente de liberación del flujo base	1/día
Kperc		Coefficiente de liberación de percolación	1/día
SAC	Adimp	Área impermeable adicional (fracción)	-
	Pctim	Fracción permanente de área impermeable	-
	Riva	Fracción de cobertura vegetal	-
	UztwMax	Capacidad de la tensión de agua en la capa superior	m
	UzfwMax	Capacidad del agua libre en la capa superior	m
	Uzk	Tasa de retiro de la capa superior	1/día
	Zperc	Coefficiente de la relación de percolación	-
	Rexp	Exponente de la relación de percolación	-
	Pfree	Fracción de la percolación que va a LZFW	-
	LztwMax	Capacidad de la tensión de agua en la capa inferior	m
	LzfpMax	Capacidad del agua libre primario en la capa inferior	m
	LzfsMax	Capacidad del agua libre suplementario en la capa inferior	m
	Rserv	Fracción del agua almacenada en la zona más baja no transferible	-
	Lzpk	Tasa de retiro diario de LZFP	1/día
	Lzsk	Tasa de retiro diario de LZFS	1/día
	Side	Fracción del flujo base para la recarga profunda	-

Fuente: García Hernández, J.; Paredes Arquiola, J.; Foehn, A. and Roquier, B. (2015). RS MINERVE–Technical manual v1.14. RS MINERVE Group, Switzerland

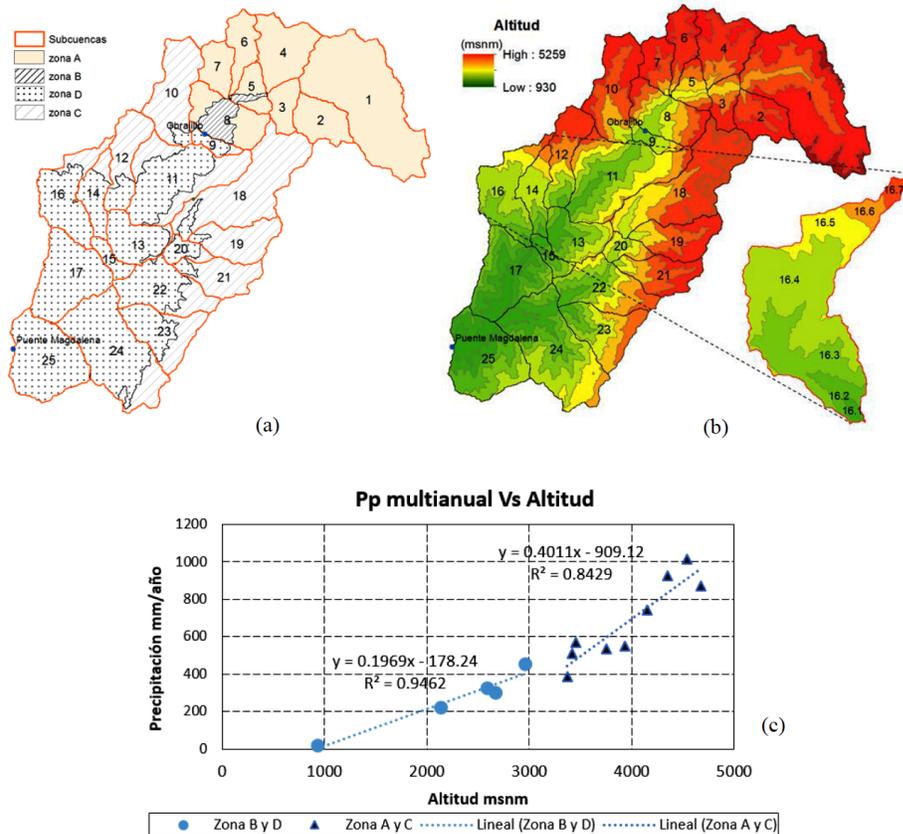


Fig. 3. (a). Área de estudio con la subdivisión en zonas y subcuencas. (b) Subcuencas del área de estudio con la división en bandas altitudinales cada 500 m y detalle de la subcuenca "16", dividida en 7 bandas altitudinales. (c) Gradiente de precipitación multianual para las 4 zonas definidas

reservorio de color celeste representa la capa superior del suelo (denominada zona alta o Upperzone), donde se origina el interflujo, que puede entenderse como la transferencia de agua lateral al caudal de base y que solo se produce cuando se satura la zona superior. El tercer reservorio representa la zona inferior del suelo (LowerZone) y está vinculado a los procesos de descarga con respuesta lenta. Finalmente, los tres reservorios originan el caudal total simulado por el modelo.

METODOLOGIA

En una primera etapa, el área de estudio se dividió en diversas zonas, en subcuencas, zonas y en bandas altitudinales que describieran la morfología del área de estudio. A continuación se adecuaron los modelos hidrológicos en RS MINERVE, para posteriormente calibrar sus parámetros y analizar los resultados.

Espacialización del area de estudio

Basado en el modelo ASTER <http://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>, el área de estudio (subcuenca Magdalena, Figura 1) fue inicialmente dividido en 25 subcuencas, como se presenta en la Figura 3a, luego se desagregó en 122 bandas altitudinales (Figura 3b), con una diferencia de 500 m (Figura 3b). La espacialización ha sido posible usando un módulo RS GIS de RS MINERVE. Para la esquematización del área de estudio se ha realizado un agrupamiento por zonas; cada zona está compuesta por un conjunto de bandas en un rango de altitud definido. Esta agrupación responde en general a la formación de áreas

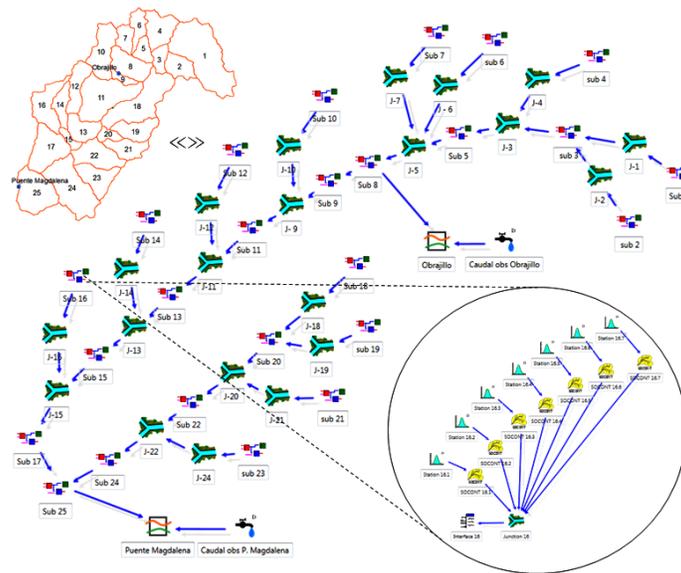


Fig. 4. Área de estudio subcuenca Magdalena vista desde la interfaz de RS MINERVE

homogéneas en su climatología, asumiendo un comportamiento lineal de la precipitación con respecto a la altitud. El área de estudio fue estructurado en 4 zonas (Figura 3a). Las dos primeras zonas (A y B) conforman la cabecera del área de estudio hasta el primer punto de aforo, estación Obrajillo. Las zonas C y D conforman el restante de bandas altitudinales hasta el punto de aforo aguas abajo de la cuenca (Estación hidrológica Puente Magdalena).

Además, se ha tenido en cuenta el comportamiento del gradiente multianual de precipitación (Figura 3c), encontrando dos gradientes distintos, uno desde los 3100 hasta los 5000 ms.n.m. (zonas A y C) y un segundo desde los 1000 hasta los 3100 m s.n.m. (zona B y D).

Adecuación de los modelos hidrológicos

Los 4 modelos lluvia-escorrentía fueron estructurados como modelos semidistribuidos en RS MINERVE (Foehn et al., 2015; García Hernández et al., 2015). La división en zonas se ha mantenido durante la adecuación de los modelos, con el fin de generar grupos de parámetros distintos que permitieran representar mejor a cada zona. Además, se ha tomado en cuenta las 25 subcuenclas del área de estudio, así como las bandas altitudinales inscritas en cada una de ellas. Cada banda altitudinal ha sido esquematizada como un modelo lluvia-escorrentía.

En la Figura 4 se representa las 25 subcuenclas por objetos denominados Submodelos (Sub). Se observa como ejemplo en la representación de la subcuenca número 16 cada banda altitudinal está representado por un objeto base, el cual representa a un modelo lluvia-escorrentía (para la gráfica se tiene como ejemplo al objeto base que representa al modelo SOCONT, color amarillo).

Calibración y validación de los modelos hidrológicos

Los 4 modelos hidrológicos fueron calibrados (Sep/2004 a Ene/2011) y validados (Feb/2011 a Feb/2014 en Obrajillo y Set/2012 a Feb/2014 en Puente Magdalena), en la subcuenca Magdalena, con el método Shuffled Complex Evolution, University of Arizona (SCE-UA) (Duan et al., 1992, 1993), y con el algoritmo incorporado a RS MINERVE para la calibración automática multiobjetivo. La función objetivo se ha centrado en cuatro indicadores estadísticos de bondad de uso extendido:

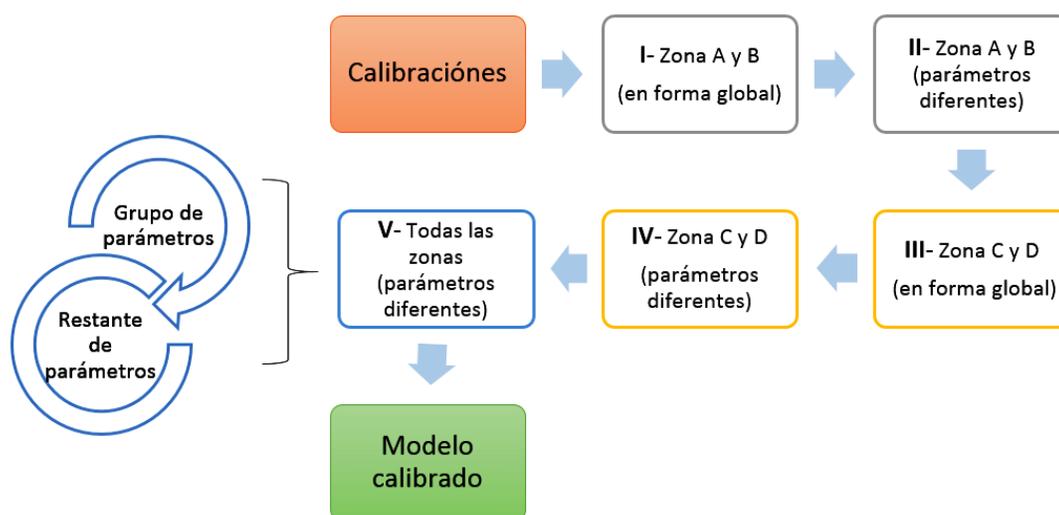


Fig. 5. Esquema de la metodología seguida para la calibración

- El coeficiente de Nash (Nash & Sutcliffe, 1970) el cual ha sido usado en diferentes estudios (Ajami et al., 2004; Schaefli et al., 2005; Jordan, 2007; Viviroli et al., 2009; García Hernández et al., 2011) para evaluar la predicción de las series simuladas en modelos hidrológicos;
- El coeficiente Nash para valores logarítmicos (Nash–ln), una variante del anterior que evalúa los caudales bajos (Krause et al., 2005).
- Error relativo de la raíz cuadrática media (RRMSE) (Feyen et al., 2000), el cual permite evaluar el error en la aproximación de la serie simulada respecto a la observada.
- El coeficiente de Pearson (r) permite cuantificar cuanto explica la variable simulada a la observada (AghaKouchak & Habib, 2010).

Se ha considerado que estos cuatro indicadores son suficientes para evaluar la calidad de los modelos generados, priorizándolos con pesos de 40, 30, 20 y 10%, respectivamente, para la calibración multiobjetivo.

Para la calibración automática se consideró la siguiente metodología. En el primer paso, se han calibrado los parámetros de las zonas A y B (Figura 5), cuyas bandas generan escorrentía medida en la estación hidrológica de Obrajillo. Todo el conjunto se ha tomado como un solo grupo. En el segundo paso, se varió los parámetros más sensibles, como los que representan a los reservorios de cada modelo, calibrando ambas zonas a la vez obteniéndose parámetros distintos. En el tercer y cuarto paso, se han calibrado las zonas C y D siguiendo el mismo procedimiento (para las zonas A y B). En el último paso se han calibrado todas las zonas a la vez considerando primero un grupo de parámetros para luego considerar los restantes y repitiendo este último proceso hasta estabilizar el modelo, con el objetivo esta vez de mejorar la eficiencia tanto para la estación Obrajillo como Puente Magdalena.

Los parámetros por zona para cada modelo (Tabla 2) se obtuvieron usando el método matemático de calibración automática SCE–UA. Estos parámetros no pretenden ser los únicos juegos de valores que ajusten al modelo, aunque sí pretenden formar un juego de parámetros que haga posible simular de manera adecuada el comportamiento de las series observadas. En la Tabla 3 se presenta las condiciones iniciales para cada modelo. Estas han sido obtenidas a partir de simulaciones iniciales y han servido para iniciar las simulaciones con los 4 modelos hidrológicos. Al respecto, se resalta los valores de altura cero de nieve para dichos módulos incluidos en los modelos SOCONT y HBV. Esto es explicado en la medida en que la nieve no aporta volúmenes significativos a la escorrentía en la cuenca del río Chillón.

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO CHILLÓN

Tabla 2. Parámetros obtenidos por zona

Modelo	Parámetros	Zona A	Zona B	Zona C	Zona D	Unidades
GR4J	X1	4.74	7.49	5.17	3.2	mm
	X2	-1.27	2.68	0.27	-2.02	mm
	X3	4.5	3.55	5.19	5.84	mm
	X4	0.49	2.5	1.26	1.47	día
SOCONT	An	10.45	10.27	7.14	4.28	mm/°C/día
	ThetaCri	0.1	0.1	0.1	0.1	-
	bp	0.01	0.01	0.01	0.01	s/m
	HGR3Max	103.8	156.4	181.24	181.24	mm
	KGR3	0	0.03	0.002	0	1/s
	L	1500	1500	1500	1500	mm
	J0	0.06	0.06	0.08	0.15	-
Kr	90	6.98	3.81	3.81	ml/3/s	
HBV	CFMax	15.52	5.98	19.35	5.31	mm/°C/d
	CFR	1	1	1	1	-
	CWH	0.1	0.1	0.1	0.1	-
	TT	2	2	2	2	°C
	TTInt	2	2	2	2	°C
	TISM	0	0	0	0	°C
	Beta	2.8	3.29	1.54	4.26	-
	FC	264.72	253.41	201.12	357.02	mm
	PWP	512.84	356.57	110.94	351.26	mm
	SUMAX	57.68	34.74	96.84	63.12	mm
	Kr	0.31	0.31	0.5	0.5	1/día
	Ku	0.13	0.13	0.07	0.07	1/día
	Kl	0.01	0.01	0	0	1/día
Kperc	0.05	0.09	0.01	0.09	1/día	
SAC	Adimp	0	0	0.05	0	-
	Pctim	0.01	0.01	0	0	-
	Riva	0	0.15	0.04	0.02	-
	UztlwMax	1.14	1.14	65.94	7.61	mm
	UzfwMax	75.59	75.59	38.72	36.25	mm
	Uzk	0.41	0.41	0.29	0.29	1/día
	Zperc	246.1	261.47	349.25	349.25	-
	Rexp	1.73	1.04	3.11	2.96	-
	Pfree	0.59	0.59	0.35	0.4	-
	LztlwMax	63.38	63.38	168.26	330.72	mm
	LzfpMax	170.26	170.26	229.02	184.46	mm
	LzfsMax	81.3	81.3	374.53	374.53	mm
	Rserv	0.46	0.46	0.83	0.83	-
	Lzpk	0	0	0	0	1/día
	Lzsk	0.18	0.18	0.03	0.03	1/día
Side	0.11	0.11	0.05	0.04	-	

RESULTADOS

En la Figura 6 se observan las salidas de los cuatro modelos así como de la serie observada para la estación de aforo Puente Magdalena. Se aprecia un comportamiento similar para los modelos HBV y SAC, respecto de la serie observada, especialmente en la etapa de calibración. Los modelos GR4J y SOCONT no describen con gran detalle las épocas de estiaje, como lo hacen HBV y SAC. Además, tanto el modelo GR4J como el SOCONT responden para ciertos valores puntuales de precipitación máxima con caudales simulados ligeramente superiores a los otros modelos, por lo que se puede mencionar que estos modelos son más sensibles en eventos extremos que los modelos HBV y SAC.

En la Figura 7 se aprecia un buen comportamiento de las series simuladas a paso mensual para la estación de Obrajillo (ubicada en la parte alta de la cuenca), tanto para el periodo de calibración como para el periodo de validación. La respuesta de los modelos es similar, excepto el modelo SOCONT, el cual tiende a sobreestimar a la serie observada. Por otro lado, las series simuladas para los cuatro modelos en la estación Puente Magdalena (ubicada en la parte baja de la cuenca), tienden a subestimar

a la serie observada siendo notorio en el periodo de avenida para la etapa de validación. Mientras que la respuesta de los modelos tiende a aumentar en magnitud al pasar del periodo de calibración al de validación, siguiendo el patrón de la serie observada.

Tabla 3. Valores iniciales de los modelos lluvia escorrentía

Modelo	Parámetros	Descripción	Valor	Unidades
GR4J	SIni	Nivel inicial de agua en el reservorio de producción	4	mm
	RIni	Nivel inicial de agua en el depósito de laminación	2	mm
SOCONT	HsnowIni	Altura inicial de nieve	0	mm
	ThetaIni	Nivel inicial del reservorio de infiltración	0	-
	HGR3Ini	Nivel inicial de la escorrentía aguas abajo del plano	36.75	mm
	HrIni	Nivel inicial de agua en módulo de nieve	0.48	mm
HBV	HsnowIni	Altura inicial de nieve	0	mm
	WHIni	Nivel inicial de agua en módulo de nieve	0	-
	HumIni	Humedad inicial	114.9	mm
	SUIni	Nivel inicial del reservorio superior	0.08	mm
	SLIni	Nivel inicial del reservorio inferior	56.24	mm
SAC	AdimIni	Contenido inicial de agua en tensión	5.51	mm
	UztwIni	Nivel inicial de la tensión de agua en la capa superior	0	mm
	UzfwIni	Nivel inicial del agua libre en la capa superior	0	mm
	LztwIni	Nivel inicial de la tensión de agua en la capa inferior	5.73	mm
	LzfpIni	Nivel inicial del agua libre primario en la capa inferior	51.9	mm
	LzfsIni	Nivel inicial del agua libre suplementario en la capa inferior	0	mm

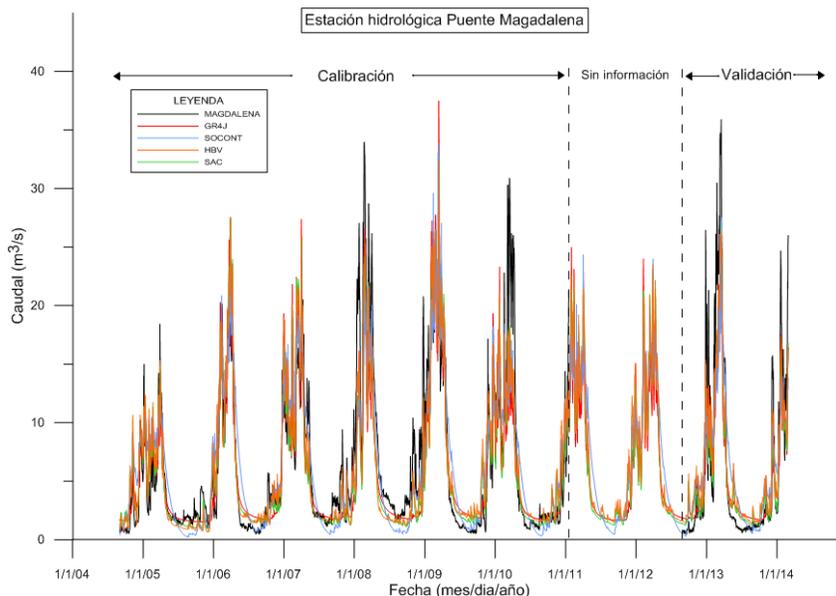


Fig. 6. Comparación de las series simuladas a paso diario en el punto de control Puente Magdalena

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DEL RÍO CHILLÓN

Los modelos lluvia–escorrentía HBV y SAC presentan estadísticamente una mejor respuesta (Tabla 4) con coeficientes de Nash muy similares [0.91 - 0.80]. Además, se ha encontrado un buen comportamiento de los caudales bajos para ambos modelos, con coeficientes de Nash–ln, para HBV [0.92 - 0.78]; y Nash–ln para SAC [0.88 - 0.80]. El modelo GR4J, con Nash [0.88 - 0.77] y Nash–ln [0.87 - 0.79] no presenta gran variación en sus estadísticos respecto a los citados anteriormente. Sin embargo, el modelo SOCONT presenta variaciones menores con un Nash de [0.79 - 0.73] y Nash–ln de [0.81 - 0.62]. Con respecto a los errores, los modelos HBV, con RRMSE [0.49 - 0.27]; y SAC, con RRMSE [0.51 - 0.30], presentan los valores más bajos. Estos errores tienden a aumentar ligeramente al pasar del periodo de calibración al de validación para los cuatro modelos (Tabla 4). Cabe resaltar, que existe una ligera disminución de los indicadores estadísticos de bondad al pasar de la primera estación de aforo (Obrajillo) a la segunda (Puente Magdalena). Ello se corrobora en las gráficas de la Figura 7.

En la Figura 8 se presentan las curvas de duración a nivel multianual para cada modelo, como es de esperarse las mejores representaciones de la curva de duración observada son generadas por los modelos de mayor eficiencia (GR4J, HBV y SAC). Además, a menores persistencias existe una mayor incertidumbre en las respuestas de los modelos.

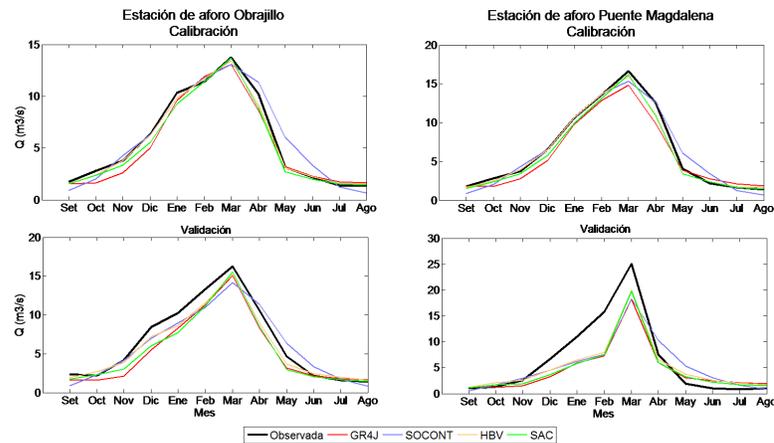


Fig. 7. Comparación de las series simuladas multimensuales para las dos estaciones de aforo

Tabla 4. Indicadores estadísticos de bondad de ajuste

Estación de aforo		Estadísticos	GR4J	SOCONT	HBV	SAC
OBRAJILLO	CALIBRACIÓN	Nash	0.88	0.79	0.91	0.91
		Nash–ln	0.86	0.67	0.88	0.89
		Coef. Pearson	0.94	0.89	0.95	0.95
		RRMSE	0.34	0.45	0.29	0.3
	VALIDACIÓN	Nash	0.86	0.79	0.91	0.88
		Nash–ln	0.87	0.81	0.92	0.89
		Coef. Pearson	0.96	0.9	0.97	0.96
		RRMSE	0.33	0.4	0.27	0.31
PUENTE MAGDALENA	CALIBRACIÓN	Nash	0.77	0.76	0.81	0.8
		Nash–ln	0.79	0.62	0.78	0.8
		Coef. Pearson	0.89	0.87	0.9	0.9
		RRMSE	0.49	0.5	0.44	0.45
	VALIDACIÓN	Nash	0.8	0.73	0.85	0.83
		Nash–ln	0.84	0.77	0.8	0.86
		Coef. Pearson	0.97	0.9	0.97	0.97
		RRMSE	0.56	0.65	0.49	0.51

En la Figura 9a se comparan las series de caudales mensuales simulados para una persistencia del 75%; los modelos GR4J y SAC sobrestiman a los caudales de avenida observados, mientras que el modelo HBV tiende a subestimarlos ligeramente. En la Figura 9b, se compara el promedio de los caudales mensuales simulados respecto de la serie observada para la misma persistencia (75%). Se observa una muy buena representación. Cabe resaltar que la serie simulada del modelo SOCONT tienden a alejarse del valor observado, por lo que no ha sido considerado en el promedio.

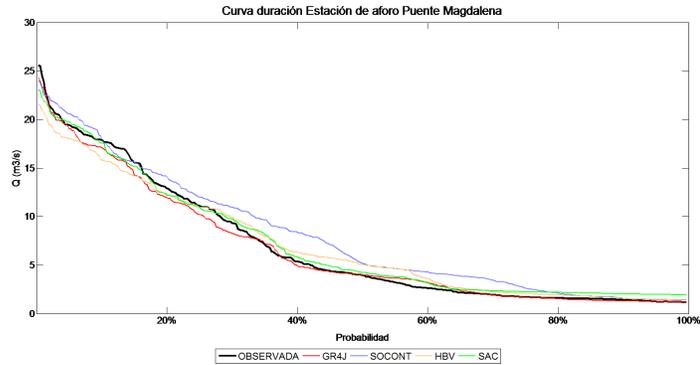


Fig. 8. Curvas duración multianual calculadas a partir de la información simulada y observada. Estación de aforo Puento Magdalena

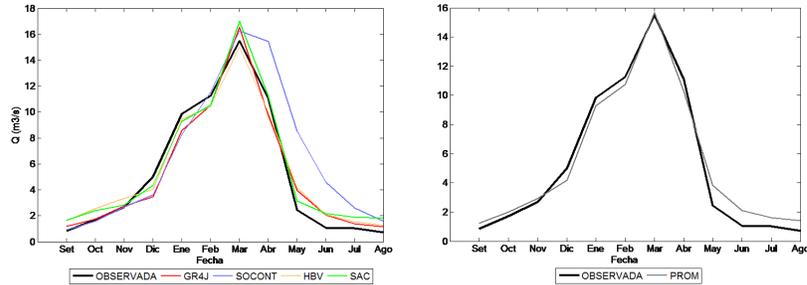


Fig. 9. Caudales multimensuales para una persistencia de 75%. Estación de aforo Puento

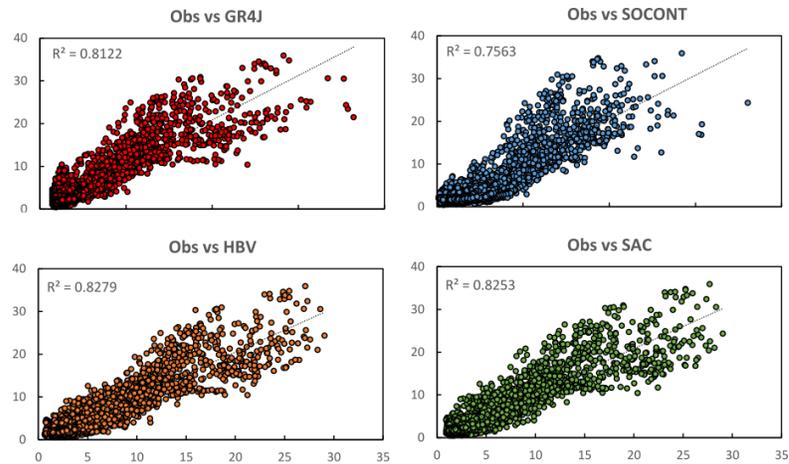


Fig. 10. Diagrama de dispersión entre las series simuladas y observadas para el periodo de estudio (set/04-feb/14). Estación de aforo Puento Magdalena

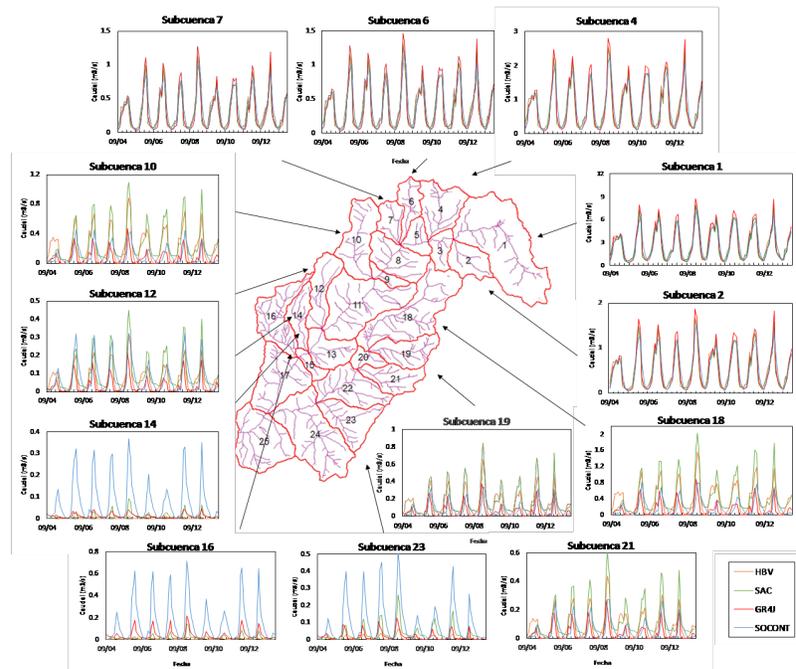


Fig. 11. Caudales generados en las 13 subcuencas del área de estudio, subcuenca Magdalena

Tabla 5. Caudales multianuales por subcuenca, área de estudio subcuenca Magdalena

Subcuenca	Caudal (m^3/s)			
	SAC	HBV	GR4J	SOCONT
1	2.68	2.85	2.84	2.79
2	0.52	0.55	0.54	0.54
4	0.78	0.81	0.81	0.81
6	0.38	0.39	0.38	0.39
7	0.31	0.32	0.32	0.33
10	0.26	0.22	0.07	0.11
12	0.09	0.07	0.03	0.08
14	0.01	0	0.01	0.08
16	0.02	0	0.04	0.15
23	0.04	0.09	0.04	0.06
21	0.12	0.09	0.04	0.06
19	0.16	0.13	0.05	0.08
18	0.45	0.38	0.13	0.2

En la Figura 10 se aprecia el gráfico de dispersión para cada modelo respecto de las series simuladas, se observa un buen ajuste lineal para los cuatro modelos. Por otro lado, en la Figura 11 se presenta un esquema con las series de tiempo a paso mensual generadas para cada subcuenca del área de estudio (subcuenca Magdalena) en la Tabla 5, el resumen de los caudales multianuales para cada una de ellas. Del gráfico se aprecia una mayor incertidumbre en la respuesta de los modelos para las subcuencas ubicadas en la parte baja de la cuenca, esto puede deberse a una baja densidad de estaciones en esta zona, sin embargo las escorrentías simuladas, ubicadas en la cabecera de la cuenca, presentan un patrón similar en las salidas de los modelos. Cabe recalcar que los mayores aportes de escorrentía están presentes en esta zona.

CONCLUSIONES

El programa RS MINERVE fue utilizado satisfactoriamente para la adecuación de los modelos hidrológicos en el área de estudio Magdalena. Además, también consigue que el usuario comprenda fácilmente los procesos hidrológicos y pueda entender los resultados finales.

Los resultados de las simulaciones permiten concluir que los modelos con mayor cantidad de parámetros, HBV y SAC, describen con mayor precisión a las series observadas, representando mejor las épocas de estiaje (coeficientes de Nash–ln, Tabla 4). Sin embargo, las simulaciones de los modelos GR4J y SOCONT no presentan variaciones significativas. Cabe resaltar que la respuesta del modelo GR4J, con tan solo 4 parámetros, es casi comparable a los producidos por los modelos complejos HBV y SAC, lo cual se corrobora por sus indicadores estadísticos de bondad. Gracias a la facilidad de calibración (por su poca cantidad de parámetros), se concluye que el modelo GR4J es una buena alternativa para modelar la cuenca del río Chillón y se recomienda su uso.

En los procesos de calibración automática debe considerarse que a mayor número de parámetros a calibrar la incertidumbre también puede ser mayor, debido a la tendencia que tienen los métodos de calibración automática a encontrar óptimos locales, mas no globales. Por lo que no se recomienda calibrar todos los parámetros de un modelo relativamente complejo de forma simultánea.

La capacidad de RS MINERVE para simular la escorrentía en la cuenca del río Chillón debe tomarse no como una solución única, sino como una respuesta consecuente con la metodología seguida por los autores, basada en los criterios de priorización para la calibración de los parámetros, la definición de zonas en el área de estudio y la asignación de los valores iniciales de los modelos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al SENAMHI y a SEDAPAL por la oportunidad dada para realizar este trabajo dentro del convenio de colaboración establecido entre las dos instituciones. Asimismo, al CREALP todo el apoyo científico y técnico proporcionado durante el trabajo de modelización y análisis de resultados. Finalmente, este estudio no habría sido posible sin la colaboración del SENAMHI en el Proyecto Glaciares 513, en el que colaboran COSUDE, CARE, Universidad de Zurich, Escuela Politécnica Federal de Lausanne, CREALP y MeteoDat

BIBLIOGRAFÍA

- Autoridad Nacional del Agua. (2012). Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes. *International Journal of Engineering Education* 26(4), 963–973.
- Bergström, S. (1992). The HBV model—its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping.
- Bloschl, G., Reszler, C., and Komma, J. (2007). A spatially distributed flash flood forecasting model, *Environ. Modell. Software*, 23, 464–478.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., and McGuire, R. A. (1973). A generalized streamflow simulation system—Conceptual modelling for digital computers. US Department of Commerce, National Weather Service & State of California, Department of Water Resources, p 204, 1973
- Consuegra, D. & Vez, E.: AMIE (1996). Analyse et Modélisation Intégrées du cheminement des Eaux en zones habitées, modélisation hydrologique, Application au bassin versant de la Haute Broye, IATE/HYDRAM, Swiss Institute of Technology, Lausanne, Lausanne.
- Duan, Q., Gupta, V. K. & Sorooshian, S. (1993). A shuffled complex evolution approach for effective & efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory & Applications*, Vol. 76, No. 3, 501–521.
- Edijatno & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres, *La Houille Blanche*, 2, 113–121.
- Edijatno, Nascimento, N.O., Yang, X., Makhoul, Z., Michel, C. (1999). GR3J: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44 (2), 263–277.
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O. & Feyen, J. (2000). Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment. *Hydrology & Earth System Sciences* 4 (1), 47–63.

- Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B. & Paredes Arquiola, J. (2015). RS MINERVE–User’s manual v1.17. RS MINERVE Group, Switzerland.
- García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. & Roquier, B. (2015). RS MINERVE–Technical manual v1.12. RS MINERVE Group, Switzerland.
- García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. & Boillat, J.–L. (2014). Integrated flood forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps–Implementation of the MINERVE project in the canton of Valais. Swiss Competences in River Engineering and Restoration, Schleiss, SpeerliandPfammatterEds, 87–97. Taylor& Francis Group, London.
- García Hernández, J. (2011). Flood management in a complex river basin with a real–time decision support system based on hydrological forecasts. PhD Thesis N°5093, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Switzerland.
- Harlin, J. & Kung, C. S. (1992). Parameter uncertainty & simulation of design floods in Sweden, *J. Hydrol.*, 137, 209–230.
- INDECI (2010). Atlas de peligros del Perú.
- INEI (2007). Censos Nacionales, XI de Población y VI de Vivienda Perfil Sociodemográfico del Perú Lima, agosto 2008.
- INRENA (2003). Estudio integral de los recursos hídricos de la cuenca del río Chillón. Ministerio de Agricultura. Perú, octubre 2003.
- Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues–optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL, Lausanne.
- Krause, P., Boyle, D. P. & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences* 5, 89–97.
- Metzger, L.A., T.M. Carpenter, & K. P. Georgakakos (2001). "Reliability Analysis of Discharge & Volume Forecasts for the Rio Rimac Basin in Peru," HRC Technical Note No.16, Hydrologic Research Center, San Diego, California, 50pp, 19 April 2001.
- MINAM (2010). El Perú y el Cambio Climático. Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.
- Nacimiento, N. O. (1995). Appréciation a l’aide d’un modèle empirique des effets d’action anthropiques sur la relation pluie–débit a l’échelle du bassin versant. PhD Thesis, CERGRENE/ENPC, Paris, France, 550 pp.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: part 1–A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10, 282–290
- OMM (2011). International Glossary of Hydrology. WMO–N°. 168. World Meteorological Organization.
- Perrin, C., Michel, C., Andrásian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.* 279 (1–4), 275–289
- Seibert, J. (1997). Estimation of Parameter Uncertainty in the HBV Model, *Nord. Hydrol.*, 28 (4/5), 1997, 247–262, 1997
- SENAMHI (2009). Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030. Autores: Obregón, G., Díaz, A., Rosas, G., Avalos, G., Oria, C., Acuña, D., Llacza, A., Richard, M. Proyecto SCNCC, Segunda Comunicación de Cambio Climático en Perú. Editor Ministerio del Ambiente.
- Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A. (2005). A conceptual glacio–hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2, 73–117.
- Viviroli, D., Mittelbach, H., Gurtz, J., Weingartner, R. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland. Part II: Parameter regionalisation and flood estimation results. *Journal of Hydrology* 377, 208–225.

