

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/312946611>

# ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS GR<sub>4</sub>J- SOCONT-HBV-SAC EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN, PERÚ

Conference Paper · September 2016

CITATIONS

0

READS

1,764

7 authors, including:



**Miguel Angel Astorayme Valenzuela**  
Pontifical Catholic University of Peru

8 PUBLICATIONS 1 CITATION

SEE PROFILE



**Javier Garcia Hernandez**  
Service de l'Énergie et des Forces Hydrauliques - État du Valais

62 PUBLICATIONS 370 CITATIONS

SEE PROFILE



**Wilson Suarez**  
Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Peru

30 PUBLICATIONS 975 CITATIONS

SEE PROFILE



**Christian Huggel**  
University of Zurich

347 PUBLICATIONS 13,729 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Real-time data assimilation for hydrological modelling and flood forecasting in equipped alpine catchments [View project](#)



Data climatica [View project](#)

**XXVII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
LIMA, PERÚ, 28 AL 30 DE SEPTIEMBRE DE 2016**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS GR4J-  
SOCONT-HBV-SAC EN LA CUENCA DEL RÍO CHILLÓN, PERÚ**

**Miguel A. Astorayme<sup>1</sup>, Javier García<sup>2</sup>, Oscar Felipe<sup>3</sup>, Wilson Suarez<sup>3</sup>, Christian Huggel<sup>3</sup>, Walter Molina<sup>4</sup>, Douglas Sarango<sup>5</sup>.**

<sup>1</sup>Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, Jr. Cahuide 721 Jesús María, Lima, Perú

<sup>2</sup>Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin, Rue de l'Industrie 45 CH-1951, Sion, Suiza.

<sup>3</sup>Universidad de Zúrich, Rämistrasse 71, 8006 Zürich, Suiza.

<sup>4</sup>Servicio de Agua Potable y Alcantarillados de Lima, Autopista Ramiro Prialé 210 El Agustino, Lima, Perú.

<sup>5</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

m.astoraymev@pucp.pe, javier.garcia@crealp.vs.ch, ofelipe@senamhi.gob.pe, wil\_suarez@hotmail.com,  
christian.huggel@geo.uzh.ch, wmolina@sedapal.com.pe, dsarangoj@unmsm.edu.pe

**RESUMEN:**

Desde un punto de vista científico y práctico, modelar una cuenca es más efectivo si se tiene más de una respuesta de modelación. En este artículo, proponemos la adecuación de cuatro modelos lluvia-escorrentía en la cuenca del río Chillón: Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), Soil Contribution (SOCONT), Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) y Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC). Los modelos presentan una resolución temporal y espacial, diaria y semidistribuida respectivamente. El periodo de simulación comprende de Set/04 a Feb/14 siendo evaluados por medio de indicadores estadísticos de desempeño. Al respecto los modelos HBV y SAC han sido los de mejor respuesta presentando un mejor desempeño en avenidas ( $Nash > 0.8$ ) y los menores errores ( $RRMSE < 0.51$ ). Sin embargo, la respuesta de los modelos GR4J y SOCONT no presentan gran variación en sus indicadores estadísticos de desempeño ( $Nash > 0.73$  y  $RRMSE < 0.65$ ). Los resultados obtenidos nos hacen pensar en el uso de más de un modelo para tomar decisiones. Cabe resaltar que para la adecuación de los modelos se usó la plataforma de modelamiento hidrológico e hidráulico RS MINERVE. Finalmente, se realizaron pruebas preliminares de pronóstico con un horizonte de 3 días.

**ABSTRACT:**

From a scientific and practical standpoint, basin modeling is more effective if you have more than one modeling response. In this paper, we propose the adequacy of four rainfall-runoff models in the Chillon river basin: Génie Rural à 4 Paramètres Journalier (GR4J), Soil Contribution (SOCONT), Hydrologiska Byrans Vattenbalansavdelning (HBV) and Sacramento Soil Moisture Accounting (SAC). The models have a temporal and spatial resolution, daily and semi-distributed respectively. During the simulation period from Sept/04 to Feb/14 the models were evaluated by statistical performance indicators. In this regard, the HBV and SAC models have had the best response showing a better performance in avenues ( $Nash > 0.8$ ) and minor errors ( $RRMSE < 0.51$ ). However, the response of GR4J and SOCONT models do not show great statistical variation ( $Nash > 0.73$  and  $RRMSE < 0.65$ ). The results make us think about the use of more than one model to make decisions. It is noteworthy that for the adequacy of models the MINERVE RS hydrologic - hydraulic modeling software was used. Finally, preliminary forecast tests with a horizon of three days were held.

**PALABRAS CLAVES:** Cuenca Chillón, RS MINERVE, GR4J, SOCONT, HBV, SAC.

## INTRODUCCIÓN

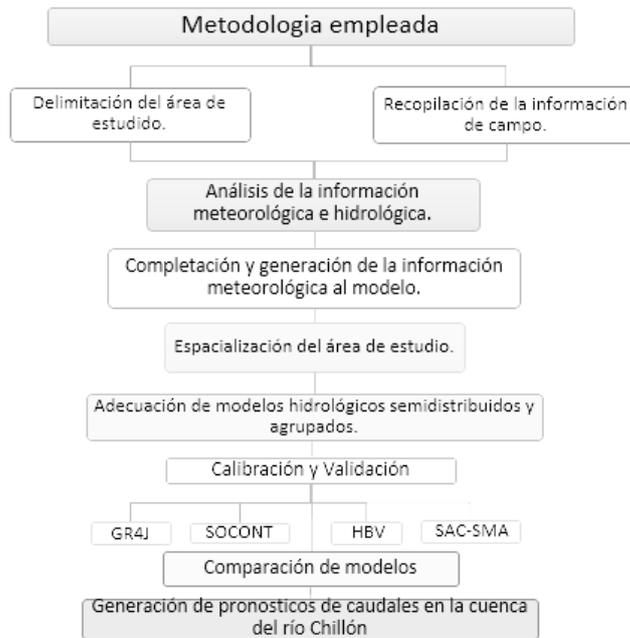
La ocurrencia de eventos extremos asociados a la variabilidad climática y aún más frente a la presencia de patrones anormales de precipitación por efecto del cambio climático se vienen intensificando en el Perú. Sumado a esto, las cuencas de la costa revelan una alta vulnerabilidad ante la ocurrencia de deslizamientos, crecidas e inundaciones (INGEMMET, 2015) que ocasionan fuertes impactos en la población, infraestructura, servicios, transporte, etc. Por otro lado, la cuenca del río Chillón, al igual que otras cuencas de la costa, presentan déficit hídrico (INRENA, 2003), por lo que cuantificar su recurso hídrico se hace apremiante.

En este contexto, estudios relacionados con el modelamiento hidrológico en el Perú toman gran importancia. Es así que uno de los primeros aportes a este campo fue dado por el Dr. Lutz Sholtz el cual presentó una metodología para la generación de caudales a paso mensual en cuencas no aforadas (SCHOLZ, L. 1980). A partir de entonces han surgido trabajos de investigación relacionados con el modelamiento hidrológico en el país (MINAM, 2010). Así también se tienen modelos desarrollados y usados a nivel internacional, podemos citar por ejemplo uno muy difundido entre hidrológicos, el GR2M (Niel, 2003) el cual es del tipo agregado, conceptual y está estructurado para modelar escorrentía a paso mensual. Sin embargo, éste y otros modelos mencionados anteriormente son de corte agregado, lo que implica no poder conocer la escorrentía por subcuencas. Debido a esta impase se han desarrollado también modelos distribuidos que permiten desagregar tanto como sea posible una cuenca, lo cual permite tener gran detalle a la hora de recabar resultados. Sin embargo el uso de estos modelos, que tienen una base física muy sólida, está poco extendido por el gran gasto computacional y sobre todo por lo complicado que puede llegar a ser calibrarlos ya que dependen de muchos parámetros (Abbott *et al.* 1996). Por esta razón existe una tendencia al uso de modelos semidistribuidos, los cuales desagregan la unidad de estudio de manera más gruesa. Un ejemplo de este tipo de modelos es el modelo Precipitation Runoff Modeling System propuesto por la Science for a changing world (USGS) (Markstrom *et al.*, 2015).

En este artículo, presentamos la adecuación y comparación de 4 modelos lluvia escorrentía con un enfoque semidistribuidos y con una resolución diaria, siendo el objetivo evaluar y comprar la capacidad de modelar la escorrentía en la cuenca del río Chillón. Además, el modelamiento hidrológico se enfoca en poder predecir la escorrentía a corto plazo.—como ya se utiliza en el Canton de Valais en Suiza (García Hernández *et al.*, 2014)— para la previsión y gestión de avenidas.

## DATOS Y METODOS

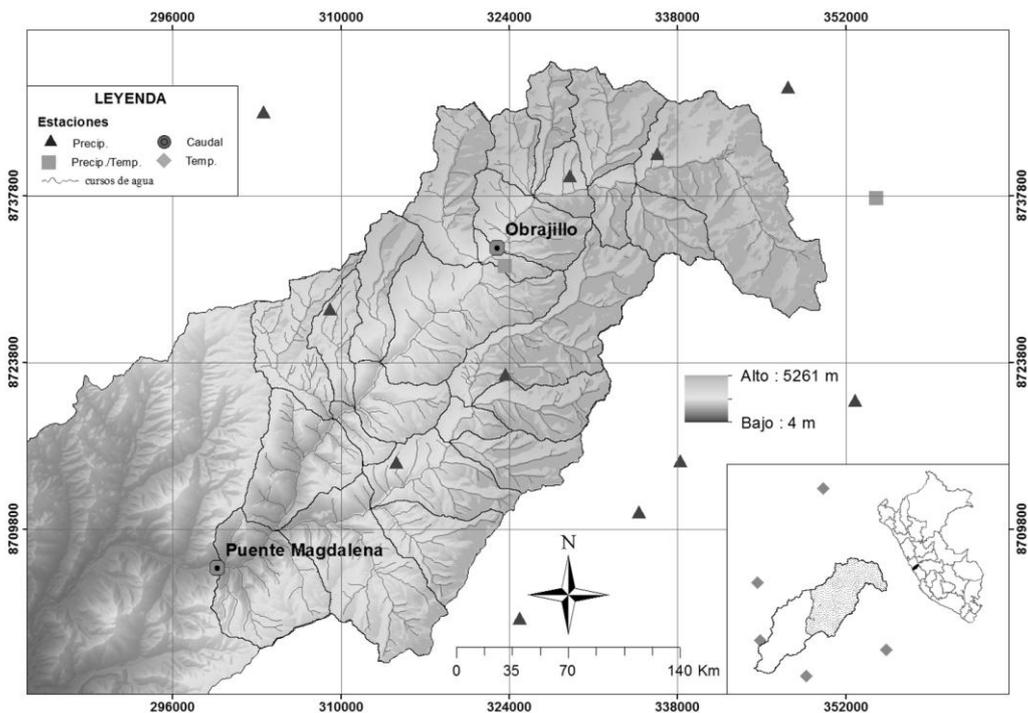
La investigación inició (Figura 1) con la delimitación del área de estudio así como la recopilación de la información hidro-climática. Se realizó un análisis exploratorio de información climática siendo necesaria la completación de datos faltantes. Para la adecuación de los modelos, la hoya del Chillón fue dividida en 25 subcuencas, para luego realizar un proceso de desagregación siguiendo un criterio topográfico, así se generó bandas altitudinales con un área promedio de 10km<sup>2</sup>. Por último, se fijaron 4 zonas siguiendo un criterio de altitud, lo cual dio lugar a la generación de 4 zonas, esto con la finalidad de independizar los parámetros del modelo. A continuación se adecuaron los modelos hidrológicos en RS MINERVE para posteriormente calibrar sus parámetros (considerando zonas homogéneas), validar, comparar y analizar los resultados. Los modelos han sido evaluados por medio de indicadores estadísticos de eficiencia. Finalmente, se realizaron pruebas de pronóstico con un horizonte de 03 días a partir de la previsión de lluvias del ETA-Senamhi y el Weather Research & Forecasting (WRF) los cuales son gestionado por el Centro de Predicción Numérica - CPN del Senamhi (Avalos, 2009; William *et al.*, 2005).



**Figura 1.-** Metodología seguida en la investigación.

## Área de estudio

La cuenca del río Chillón está ubicada en la vertiente de pacífico, en la costa peruana. Sus aguas recorren, desde sus nacientes en la cordillera Viuda Negra, hasta desembocar en el Océano Pacífico. La cuenca presenta una extensión de 2210 km<sup>2</sup> y una variación altitudinal de 0 a 5260 m.s.n.m. El caudal medio multianual de 5.6 m<sup>3</sup>/s. En ella se encuentran ubicados las estaciones hidrológicas de Obrajillo (2710 m.s.n.m.) y Puente Magdalena (930 m.s.n.m.), siendo esta última el punto de desagüe utilizado para la delimitación de la cuenca de estudio.

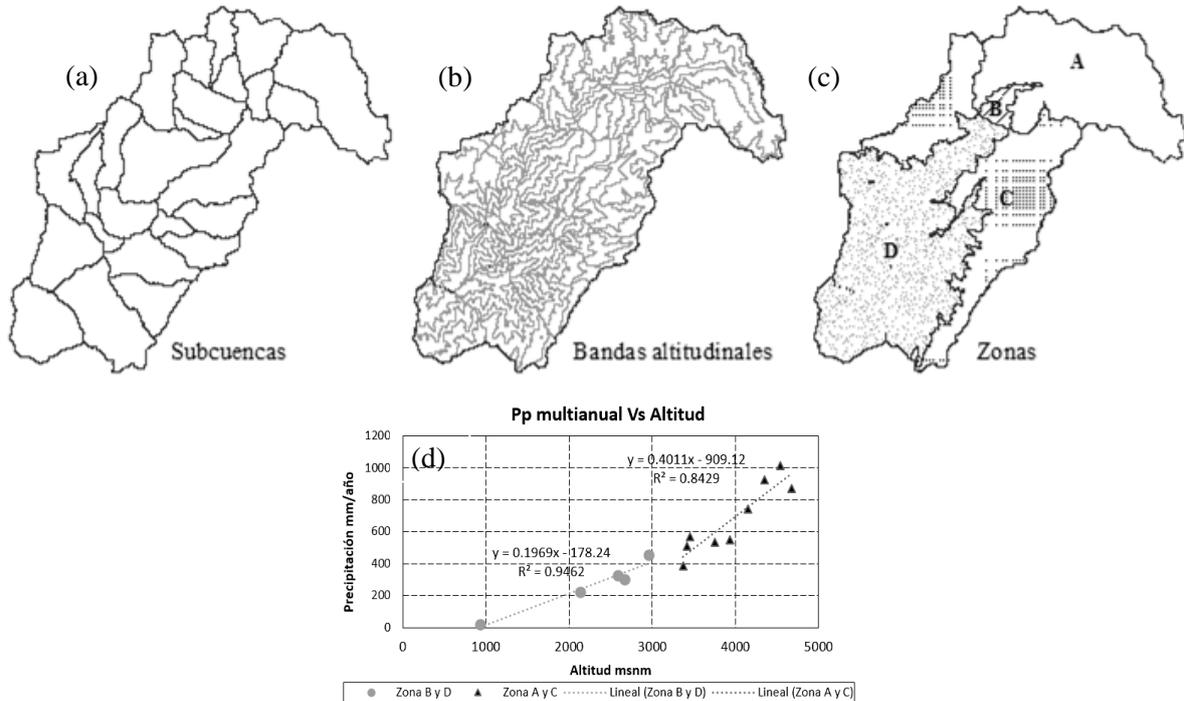


**Figura 2.-** Área de estudio y ubicación de estaciones hidro-meteorológicas.



## Adecuación de los modelos lluvia-escorrentia

La cuenca de estudio fue subdividida en 25 subcuencas (Figura 4a), cada subcuenca fue desagregada en bandas altitud cada 500 m (Figura 4b), siguiendo un criterio topográfico con un área promedio de 10 km<sup>2</sup>. Los modelos propuestos fueron ejecutados a nivel de banda de altitud, así es posible generar escorrentía en cada una de ellas. Por otro lado, se realizó una división de la cuenca de estudio siguiendo un criterio de precipitación con la altitud, así se han encontrado dos áreas con gradiente de precipitación distintas (Figura 4d), a su vez se dividió cada área en dos siguiendo un criterio de altitud (siendo la cota 300 la divisoria) De esta manera se tienen 4 zonas (Figura 4c) siendo los parámetros de los modelos distintos para cada zona.



**Figura 4.-** Desagregación del área de estudio: (a) En subcuencas, (b) bandas altitudinales y (c) Zonas. (d) Gradiente de precipitación en la cuenca de estudio.

## Calibración y Validación

Los modelos fueron calibrados considerando un periodo de Set/04-Ago/10 para luego ser validarlos con el periodo restante, Set/12-Feb/14. Para evaluar la performance de los modelos se usó 4 indicadores estadísticos de desempeño. Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970, Ec. 1), Nash-ln (Krause *et al.*, 2005, Ec. 2), Coeficiente de Pearson (r) (AghaKouchak & Habib, 2010, Ec. 3) y el Relative Root Mean Squared Error (RRMSE) (Feyen *et al.*, 2000, Ec. 4).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{ref})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{ref} - \hat{Q}_{ref})^2} \quad [1]$$

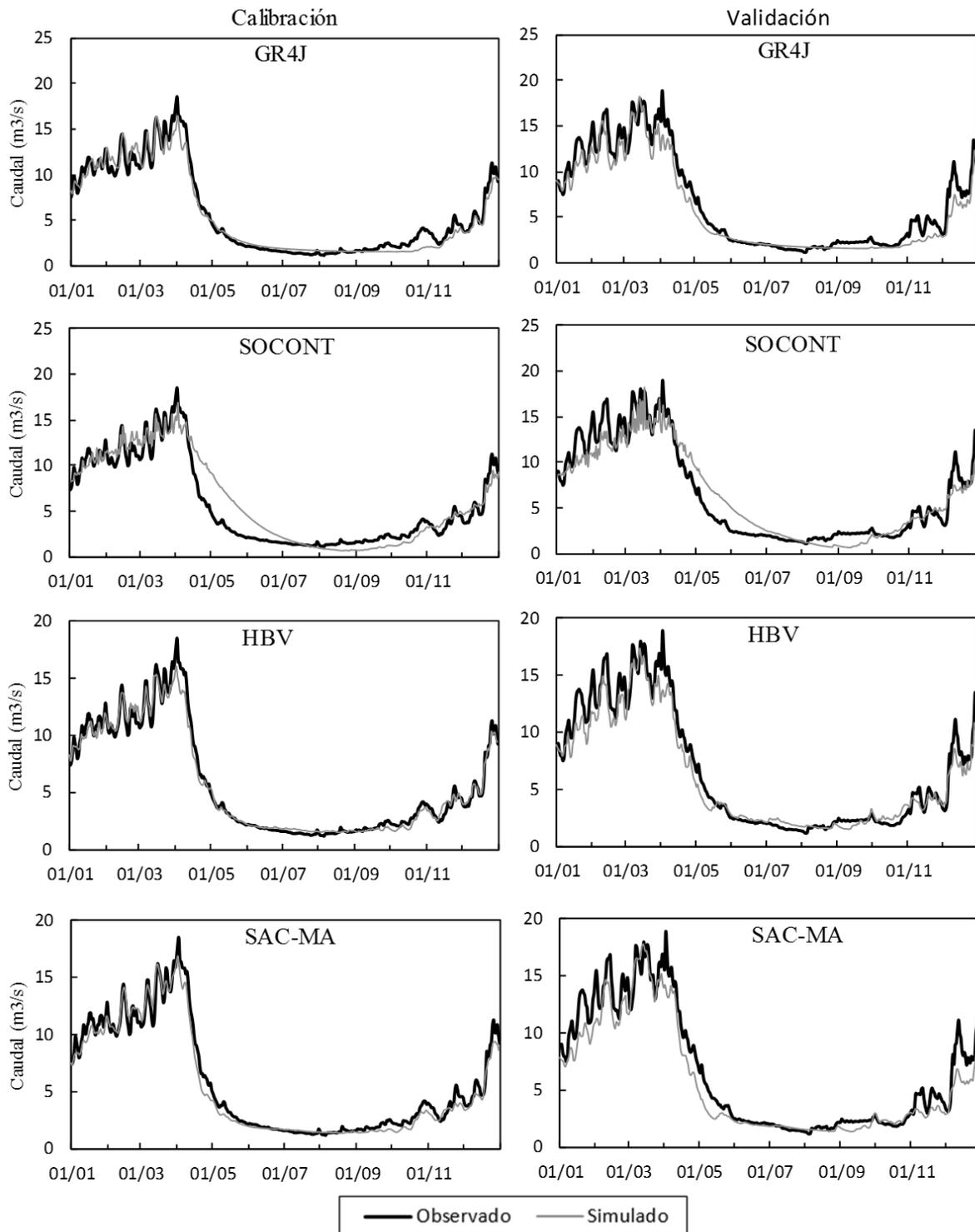
$$Nash - ln = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{sim}) - \ln(Q_{ref}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_{ref}) - \ln(\hat{Q}_{ref}))^2} \quad [2]$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \hat{Q}_{ref}) \cdot (Q_{ref} - \hat{Q}_{ref})}{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \hat{Q}_{sim})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{ref} - \hat{Q}_{ref})^2} \quad [3]$$

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_{sim} - Q_{obs})^2}{n}} / \bar{Q}_{ref} \quad [4]$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

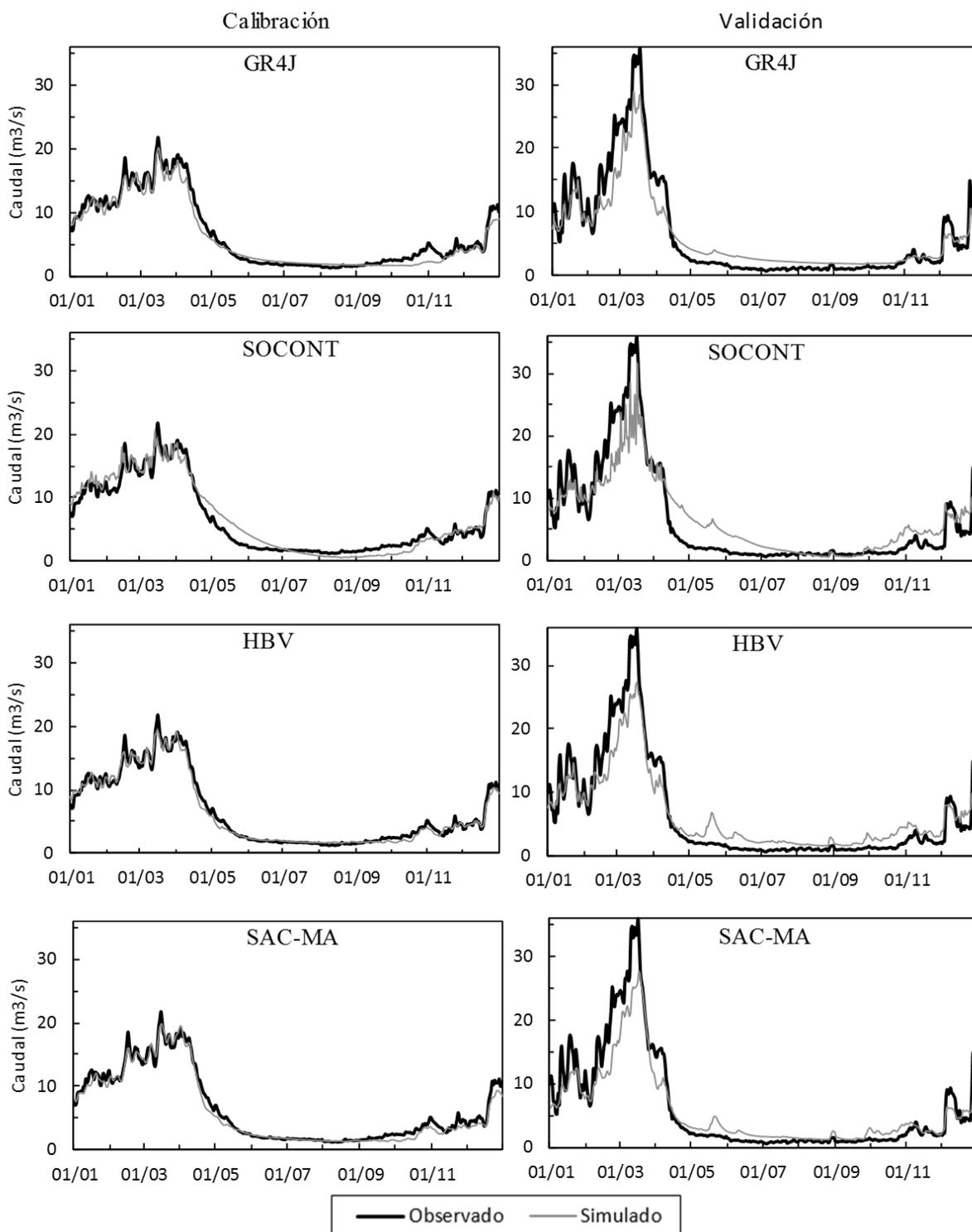
A partir de la adecuación de los modelos propuestos, se tiene en la Figura 5 las salidas multidurias para la etapa de calibración y validación para la estación Obrajillo (ver Figura 2). Al respecto, los cuatro modelos visualmente presentan un buen comportamiento, siendo el modelo GR4J y HBV los que simulan mejor las descargas diarias. Además, los modelos HBV y SAC reproducen con mayor detalle las fluctuaciones en las avenidas, esto puede explicarse por el grado de complejidad que tienen estos modelos debido al mayor número de parámetros que presentan. Por otro lado, se tienen diferencias en el rango de 8% a 20% entre las series simuladas y observadas en el periodo de avenida.



**Figura 5.-** Hidrograma de caudales simulados a paso multidinario en la estación Puente Obrajillo: Calibración Set/04-Ago-10 y Validación Set/10-Feb/14.

El modelo HBV y SOCONT presenta las menores y mayores diferencias respectivamente, incrementándose las diferencias en el periodo de avenida.

En la Figura 6 se presentan las salidas de los modelos en la cuenca de estudio a escala multidiaria correspondiente a la estación Puente Magdalena, se observa subestimación en la etapa de validación. Al respecto, hay que recordar que el periodo analizado para la validación fue realizada con menos de dos años debido a la falta de observaciones en la estación Puente Magdalena sumado a esto el año 2014 es el segundo año más húmedo en registro empleado para esta estación.



**Figura 6.-** Hidrograma de caudales simulados a paso multidiario en la estación Puente Magdalena: Calibración Set/04-Ago-10 y Validación Set/12-Feb/14.

Se tienen diferencias en el rango de 12% a 32% entre las series simuladas y observadas para el periodo de avenida, sin embargo las diferencias se incrementan en los estiajes. Además, la serie simulada del modelo SAC y HBV presentan las menores diferencias.

**Tabla 1.- Caudales mensuales simulados para la estación Obrajillo.**

FECHA	CALIBRACIÓN						VALIDACIÓN					
	GR4J	SOCONT	HBV	SAC	PROM	OBS	GR4J	SOCONT	HBV	SAC	PROM	OBS
	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Set	1.79	0.90	1.65	1.58	1.48	1.77	1.94	0.84	1.87	1.64	1.57	1.00
Oct	1.88	2.07	2.47	2.41	2.21	3.00	2.05	2.60	3.05	2.65	2.59	1.31
Nov	2.38	3.09	3.13	2.95	2.89	3.35	2.88	4.44	3.80	2.86	3.49	2.55
Dic	5.62	6.39	6.25	5.71	5.99	6.66	6.20	6.81	6.78	5.68	6.37	6.66
Ene	10.15	10.61	10.61	10.00	10.34	10.51	9.85	9.46	9.88	9.01	9.55	10.96
Feb	12.62	12.89	12.97	12.57	12.76	12.04	11.61	11.49	12.15	11.69	11.73	15.76
Mar	15.70	15.93	16.57	16.78	16.24	16.66	20.57	18.91	20.75	20.60	20.21	23.12
Abr	10.63	13.01	11.57	11.29	11.63	12.54	7.03	10.60	6.86	6.40	7.72	7.60
May	5.01	7.06	4.63	4.57	5.32	4.84	3.65	5.37	3.89	3.33	4.06	1.89
Jun	2.47	2.54	2.02	1.97	2.25	1.60	2.88	3.11	2.61	2.19	2.70	1.03
Jul	2.08	1.17	1.73	1.62	1.65	1.49	2.32	1.58	2.04	1.67	1.90	0.86
Ago	1.90	0.65	1.65	1.47	1.42	1.37	2.05	0.82	1.71	1.52	1.52	1.04
Prom	6.02	6.36	6.27	6.08	6.18	6.32	6.08	6.34	6.28	5.77	6.12	6.15

**Tabla 2. Caudales mensuales simulados para la estación Puente Magdalena.**

FECHA	CALIBRACIÓN						VALIDACIÓN					
	GR4J	HBV	SAC	SOCONT	PROM	OBS	GR4J	HBV	SAC	SOCONT	PROM	OBS
	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]
Set	3.24	2.39	2.58	2.51	2.68	1.77	3.04	3.06	2.40	3.09	2.90	1.00
Oct	3.16	3.06	3.10	2.99	3.08	3.00	3.00	3.82	2.96	3.87	3.41	1.31
Nov	3.28	3.79	3.85	3.40	3.58	3.35	3.33	5.10	3.99	4.16	4.15	2.55
Dic	3.91	5.63	5.90	4.95	5.10	6.66	4.00	6.64	6.07	5.79	5.63	6.66
Ene	5.97	9.64	10.34	8.55	8.62	10.51	4.38	7.35	6.19	5.63	5.89	10.96
Feb	8.63	11.59	11.70	10.64	10.64	12.04	5.52	9.62	8.78	10.07	8.49	15.76
Mar	12.67	16.36	15.62	16.56	15.30	16.66	12.04	18.49	16.63	18.10	16.32	23.12
Abr	10.29	11.56	9.61	13.53	11.25	12.54	7.29	7.96	6.08	9.20	7.63	7.60
May	5.92	4.47	4.16	5.30	4.96	4.84	4.87	3.95	3.00	5.23	4.26	1.89
Jun	4.60	2.52	2.69	3.18	3.25	1.60	4.18	3.28	2.60	4.09	3.54	1.03
Jul	4.07	2.43	2.61	2.99	3.03	1.49	3.68	3.02	2.44	3.50	3.16	0.86
Ago	3.68	2.41	2.55	2.94	2.89	1.37	3.34	2.97	2.36	3.33	3.00	1.04
Prom	5.78	6.32	6.23	6.46	6.20	6.32	4.89	6.27	5.29	6.34	5.70	6.15

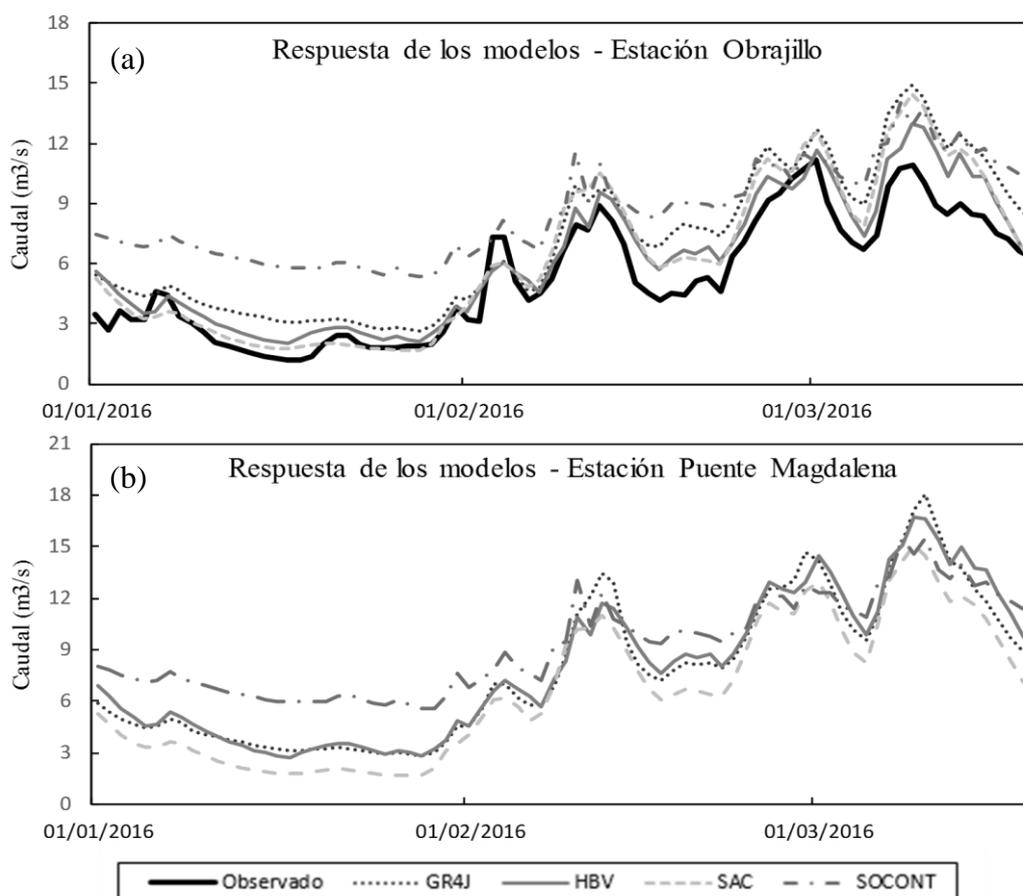
A partir de la Tabla 1, se concluye que los caudales simulados en meses de avenida son representados con regularidad, encontrándose errores de hasta 10 % y 25% para los meses de mayor caudal en la etapa de calibración y validación respectivamente. Por otro lado, el modelo HBV y SAC presentan las menores variaciones. Así el modelo HBV presenta una variación crítica de 7.7% en el mes de abril y 22% en el mes de marzo. Además, la respuesta de los cuatro modelos se muestran estables, a excepción del modelo SOCONT.

Respecto a la serie de caudales mensuales simulados para la estación Puente Magdalena se tiene la Tabla 2. Se destacan variaciones entre los caudales simulados y observados de hasta 11% en la etapa de calibración para el mes de marzo. Sin embargo, para la etapa de validación las variaciones se muestran mayores llegando a 46% en el mes de febrero. De otro lado, las variaciones son menores para el modelo HBV, siendo de tan solo 3.6 % para la etapa de calibración. Mientras que para la etapa de validación los errores se disparan en 38%.

**Tabla 3.-** Indicadores estadísticos de desempeño.

Periodo	Estadísticos	Estación Obrajillo				Estación Puente Magdalena			
		GR4J	SOCONT	HBV	SAC	GR4J	SOCONT	HBV	SAC
Calibración	Nash	0.88	0.79	<b>0.91</b>	<b>0.91</b>	0.77	0.76	<b>0.81</b>	0.80
	Nash-ln	0.86	0.67	0.88	<b>0.89</b>	0.79	0.62	0.78	<b>0.80</b>
	R	0.94	0.89	<b>0.95</b>	<b>0.95</b>	0.89	0.87	<b>0.90</b>	<b>0.90</b>
	RRMSE	0.34	0.45	<b>0.29</b>	0.30	0.49	0.50	<b>0.44</b>	0.45
Validación	Nash	0.86	0.79	<b>0.91</b>	0.88	0.80	0.73	<b>0.85</b>	0.83
	Nash-ln	0.87	0.81	<b>0.92</b>	0.89	0.84	0.77	0.80	<b>0.86</b>
	R	0.96	0.90	<b>0.97</b>	0.96	<b>0.97</b>	0.90	<b>0.97</b>	<b>0.97</b>
	RRMSE	0.33	0.40	<b>0.27</b>	0.31	0.56	0.65	<b>0.49</b>	0.51

En la Tabla 3, podemos apreciar que estadísticamente existe un mejor desempeño en los modelos respecto a la serie observada de caudales de la estación hidrológica Obrajillo que para la serie de caudales de la estación Puente Magdalena. Para la serie observada Obrajillo, los modelos tienden a comportarse de manera muy estable, variando sus indicadores estadísticos, tanto en el periodo de calibración como en el de validación, en menos de 0.03 unidades (para el coeficiente de Nash y Nash-ln). Además los modelos SAC y HBV presentan los mejores resultados. Para la serie observada Puente Magdalena, notamos que existe una ligera disminución de los indicadores estadísticos siendo más notoria para el coeficiente de Nash y Nash-ln con variaciones de hasta de 0.11 unidades. Sin embargo, el comportamiento de los modelos tienden a mejorar en el periodo de validación. Con respecto a esta segunda serie observada, notamos que el modelo HBV presenta el mejor desempeño, siendo el modelo con el mejor ajuste en épocas de avenida (Nash > 0.81) y con los menores errores (RRMSE < 0.49). El modelo GR4J está ubicado como el tercer modelo en cuanto a eficiencia. Sin embargo las diferencias entre uno y otro no son grandes, siendo las variaciones menores a 0.05 para el coeficiente de Nash. Además es preciso mencionar que el número de parámetros del modelo GR4J respecto al modelo HBV guardan una relación geométrica de 1 a 4.



**Figura 7.-** Serie de caudales diarios para el año 2016 (a) Estación Obrajillo (b) Puente Magdalena.

A partir de la adecuación de los modelos propuestos, se ha extendido el modelo hasta el año 2016, así se tiene en la Figura 7 los hidrogramas de caudales simulados para este año. En la Figura 7a se comparan los caudales simulados con respecto a la serie de caudales de la estación Obrajillo, se observa un comportamiento aceptable por parte de los modelos SAC y HBV, los cuales reproducen las avenidas sobrestimando ligeramente, siendo el caso también del modelo GR4J. El modelo SOCONT, no reproduce con detalle las avenidas, subestimándolas mientras que los estiajes son poco representativos. En la Figura 7b se tiene los hidrogramas simulados para la estación Puente Magdalena los cuales mantiene el comportamiento visto en la estación Obrajillo. Sin embargo, como se observa hasta la actualidad no existen registros observados.

**Tabla 4.-** Pronósticos realizados para los días 19, 20 y 21 de abril.

Fecha	GR4J		SOCONT		HBV		SAC		Estación	
Pronostico	ETA	WRF	ETA	WRF	ETA	WRF	ETA	WRF	Obrajillo	
	[Días]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	[m3/s]	
19/03/16	19	8.1	8.2	10.2	10.2	<b>6.1</b>	<b>6.5</b>	10.2	<b>6.1</b>	<b>6.3</b>
	20	8.3	8.2	10.0	10.6	<b>5.4</b>	<b>6.4</b>	10.0	<b>6.0</b>	<b>6.4</b>
	21	10.5	9.2	15.5	11.3	8.7	7.8	15.5	<b>6.6</b>	<b>6.8</b>
20/03/16	20	<b>7.8</b>	9.2	10.2	10.2	<b>6.2</b>	<b>6.2</b>	5.4	9.4	<b>6.4</b>
	21	8.6	15.2	10.2	21.7	<b>6.1</b>	13.2	<b>7.1</b>	14.4	<b>6.8</b>
	22	12.5	16.2	18.2	13.2	10.6	14.1	10.1	15.0	<b>6.7</b>
21/03/16	21	8.7	9.3	10.9	10.9	<b>6.9</b>	<b>6.9</b>	<b>6.7</b>	<b>8.8</b>	<b>6.8</b>
	22	10.8	13.9	13.0	17.5	12.3	9.2	8.1	12.6	<b>6.7</b>
	23	11.2	13.7	12.0	12.5	12.3	9.4	9.2	12.2	<b>6.1</b>

A partir de la previsión de lluvia del ETA-Senamhi y el WRF gestionadas por el Senamhi (Avalos, 2009; William, 2005) se realizaron ensayos de pronósticos de caudales a 03 días como muestra la tabla 4. Así se tiene el resumen de los pronósticos para los días 19, 20 y 21 de marzo del 2016. Estas fechas fueron elegidas pues es en donde se ocurre un cambio del comportamiento del hidrograma en la estación Obrajillo. Sin embargo se comprende que tres días de prueba no son suficientes por lo que se prevé futuras pruebas. Sin embargo, la intención de las pruebas tiene como fin evaluar el comportamiento de los modelos en la etapa de pronóstico. En estas fechas se tiene un comportamiento diferenciado entre los modelos HBV y SAC, los cuales presentan un acercamiento aceptable de los caudales observados, frente al modelo SOCONT Y GR4J. El modelo GR4J tiende a sobrestimar la información observada, siendo el modelo SOCONT el de menor eficiencia. Por otro lado, se observar, que los pronósticos en el segundo y tercer día presentan una menor representación, lo cual es razonable pues a mayor distancia se debe esperar una mayor incertidumbre.

## CONCLUSIONES

A raíz de la buena respuesta de los modelos, en especial de los modelos HBV, SAC y GR4J, y de la versatilidad de la plataforma de modelización RS MINERVE, se recomienda la implementación de estos modelos para el monitoreo de la escorrentía en la cuenca del Chillón y de otras cuencas con una variabilidad climática similar. Por otro lado, es preciso mencionar que los parámetros obtenidos por los modelos no necesariamente han sido establecidos en el rango habitual sugerido. Esto puede deberse a la variabilidad climática que presenta el Perú frente a la de otras zonas en donde se ha adecuado previamente.

Se concluye que los modelos HBV y SAC presentan un mejor desempeño (así lo demuestra sus coeficientes de Nash-1, Tabla 3) siendo estos los de mayor número de parámetros. Cabe resaltar que la respuesta del modelo GR4J, con tan solo 4 parámetros, es casi comparables a los producidos por modelos complejos HBV y SAC. Por otro lado, las pruebas de pronóstico a tres días, muestran la estabilidad de los modelos conceptuales más complejos (HBV y SAC). Como perspectiva se prevé evaluar los modelos en la etapa de pronóstico lo cual dará luces para el establecimiento de nuevas calibraciones y consideraciones en la adecuación, sin embargo se comprende que un modelo nunca está exento de errores.

## AGRACIMIENTO

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. Finalmente, agradecer a la UNMSM y al Proyecto Glaciares 513, junto a COSUDE, CARE, UZH, EPFL, CREALP y MeteoDat.

## REFERENCIAS

- Abbott, Michael B., Refsgaard, Jens Christian** (1996): “Distributed Hydrological Modelling”. *Water Science and Technology Library*, Vol. 22, Kluwer, Dordrecht.
- AghaKouchak, A. and E. Habib** (2010). “Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes”. *Int. J. of Engineering Education*. Vol. 26(4), pp. 963-973.
- Avalos G. J.** (2009). “Evaluación del Modelo Eta/SENAMHI en la previsión de la precipitación durante los periodos lluviosos 2002 y 2003.” *Revista peruana Geo-Atmosférica*. Vol. 1, pp. 108-124.
- Bergström, S.** (1992). “The HBV model-its structure and applications”. *SMHI Reports RH*, No. 4.
- Burnash, R. J. C., Ferral, R. L., and R.A, McGuire** (1973). “A generalized streamflow simulation system – Conceptual modelling for digital computers”. US Department of Commerce, National Weather Service and State of California, *Department of Water Resources*, pp 204, 1973.
- Consuegra, D. and E., Vez** (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.
- Feyen, L., Vázquez, R., Christiaens, K., Sels, O. and J. Feyen** (2000). “Application of a distributed physically-based hydrological model to a medium size catchment”. *Hydrology and Earth System Sciences*. Vol. 4 (1), pp. 47-63.
- García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. and J. L. Boillat** (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 Engineerig and Restoration-Schleiss, Speerli & Pfammatter (Eds)*, pp. 87-97.
- García, J., Paredes, J., Foehn, A. and B. Roquier** (2015). “RS MINERVE – Technical manual v2.1”. *RS MINERVE Group*, Switzerland, Pp.1-130.
- INGEMMET** (2015), “Revista Institucional”. *Ministerio de Energía y Minas del Perú*. Vol. 27, pp. 47, 2015. [En línea] Disponible en: <http://www.ingemmet.gob.pe/-/revista-institucional-nro-27-2015>
- INRENA** (2003). “Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la cuenca del río Chillón”.
- Krause, P., Boyle, D. P. and F. Bäse** (2005). “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment”. *Advances in Geosciences*. Vol. 5, pp. 89-97.
- Markstrom, S.L., Regan, R.S., Hay, L.E., Viger, R.J., Webb, R.M.T., Payn, R.A., and J.H. La Fontaine** (2015). “PRMS-IV, the precipitation-runoff modeling system, version 4”. *U.S. Geological Survey Techniques and Methods*. Book 6, chap. B7, pp. 158.
- MINAM** (2010). “El Perú y el Cambio Climático”. *Segunda Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones*.
- Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe** (1970). “River flow forecasting through conceptual models: part 1 - A discussion of principles”. *Journal of Hydrology*. Vol. 10, pp. 282-290.
- Niel, H., Paturel, J. E. and E. Servat** (2003). “Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability”. *Journal of Hydrology*, Vol. 278, pp. 213-230.
- Perrin, C., Michel, C., V. Andrásian** (2003). “Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation”. *Journal of Hydrology*, Vol. 279, pp. 275–289.
- Scholz, L.** (1980). “Generación de Caudales Mensuales en la Sierra Peruana”. *Programa Nacional de Pequeñas y Medianas Irrigaciones – Misión técnica Alemana, Cusco-Perú*.
- William Y. Y., Cheng and W. J. Steenburgh** (2005). “Evaluation of surface sensible weather forecast by the WRF and the ETA models over the Western United States”. *Weather and Forecasting*. Vol. 20, pp. 820-830.