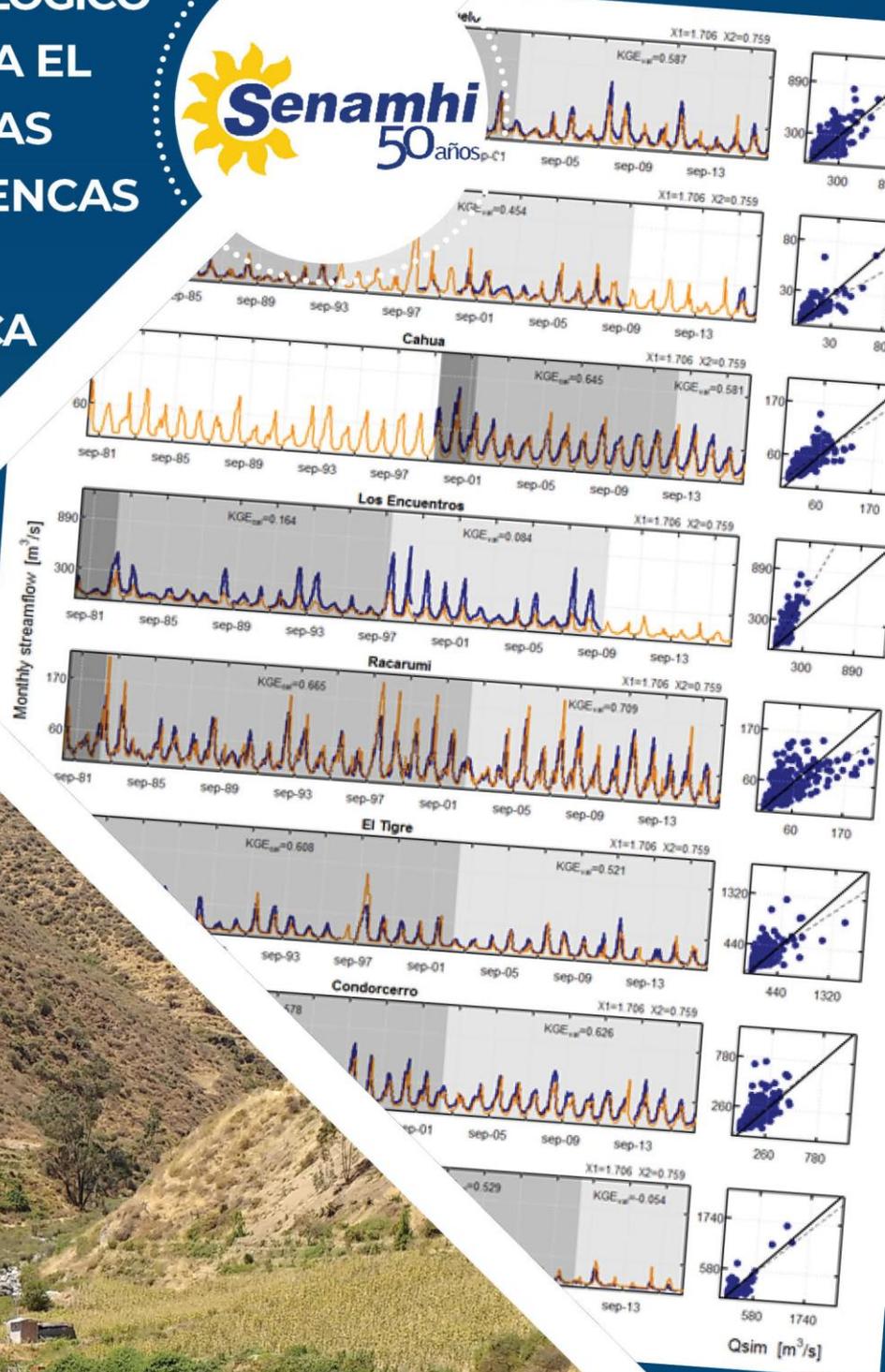


MODELAMIENTO HIDROLÓGICO A PASO MENSUAL PARA EL MONITOREO DE SEQUÍAS HIDROLÓGICAS EN CUENCAS DE LA VERTIENTE DEL PACÍFICO Y DEL TITICACA



© M. Casaverde, 2012



**MODELAMIENTO HIDROLÓGICO
A PASO MENSUAL PARA EL
MONITOREO DE SEQUÍAS
HIDROLÓGICAS EN CUENCAS
DE LA VERTIENTE DEL
PACÍFICO Y DEL TITICACA**





DIRECTORIO

PhD. Ken Takahashi Guevara
PRESIDENTE EJECUTIVO DEL SENAMHI

Ing. Oscar G. Felipe Obando
DIRECTOR DE HIDROLOGÍA DEL SENAMHI

PhD. Waldo Lavado Casimiro
SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES HIDROLÓGICAS DEL SENAMHI

REVISADO POR:

PhD. Waldo Lavado Casimiro
Subdirector de Estudios e Investigaciones Hidrológicas
wlavado@senamhi.gob.pe

ELABORADO POR:

Mg. Sc. Harold Llauca Soto
Especialista en Hidrología
hllauca@senamhi.gob.pe

Lima-Perú
Diciembre - 2019

Citar como:

Llauca, H. Modelamiento hidrológico a paso mensual para el monitoreo de sequías hidrológicas en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI. Dirección de hidrología -DHI. Diciembre 2019.

CONTENIDO

	<i>Pág.</i>
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ÁREA DE ESTUDIO	4
3. DATOS Y MÉTODOS.....	6
3.1 Estructura del modelo mensual.....	6
a. Modelo GR2M	6
b. Acumulación de caudales mensuales	7
3.2 Datos de caudales mensuales.....	8
3.3 Datos de entrada al modelo	10
a. Precipitación.....	10
b. Evapotranspiración potencial	10
3.4 Regionalización de parámetros	10
a. Análisis de sensibilidad.....	10
b. Delimitación de regiones de calibración.....	11
3.5 Calibración del modelo mensual	12
a. Calibración y validación individual de parámetros	12
b. Validación cruzada de parámetros	13
3.6 Verificación de las salidas regionales	14
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1 Regiones de calibración del modelo mensual	14
4.2 Calibración del modelo mensual	17
a. Resultados de la calibración y validación independiente de parámetros	17
b. Resultados de la validación cruzada	18
4.3 Verificación de la regionalización del modelo mensual.....	20
4.4 Simulaciones regionales y puesta en operación del modelo mensual	22
5 CONCLUSIONES	24
6 REFERENCIAS.....	25
7 ANEXOS	28
7.1 Anexo A: Detalle de la distribución superficial de subcuencas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca	28
7.2 Anexo B: Total de estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca	29
7.3 Anexo C: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en el periodo de calibración individual.....	33
7.4 Anexo D: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en el periodo de validación individual.....	35
7.5 Anexo E: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en la validación cruzada.....	37
7.6 Anexo F: Detalle del comparativo entre los caudales observados y simulados por el modelo regional.....	41
7.7 Anexo G: Código en R para la ejecución del modelo regional GR2M	46
7.8 Anexo H: Manual del paquete ‘GR2MSemiDistr’ elaborado en R	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) y subcuencas delimitadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca	5
Figura 2. Estructura del modelo GR2M incorporando factores de corrección para la precipitación y evapotranspiración potencial. Adaptado de Mouelhi et al. (2006)	6
Figura 3. Esquema del modelo GR2M semidistribuido del paquete “GR2MSemiDistr”	7
Figura 4. Estaciones hidrométricas y cuencas seleccionadas para la calibración del modelo hidrológico mensual en las vertientes del Pacífico y del Titicaca	9
Figura 5. Sensibilidad de los índices de precipitación-escorrentía (RR) y variabilidad de la escorrentía (RV) aplicando el método FAST a los parámetros X1 y X2 del modelo GR2M	15
Figura 6. Regiones de calibración delimitadas para el modelo GR2M en las vertientes del Pacífico y del Titicaca	16
Figura 7. Desempeño de la calibración y validación independiente del modelo hidrológico mensual en las cuencas seleccionadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca	18
Figura 8. Validación cruzada de parámetros del modelo GR2M en cuencas de cada región de calibración, considerando la métrica KGE	19
Figura 9. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “C”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M	21
Figura 10. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “C”	22
Figura 11. Simulación de caudales mensuales del producto PISCO-HyM_GR2M para febrero 2015 en subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca	23
Figura 12. Distribución porcentual del área de las subcuencas ubicadas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca	28
Figura 13. Longitud de registro de caudales mensuales (1981-2016) en estaciones hidrométricas ubicadas en la vertiente del Pacífico	31
Figura 14. Longitud de registro de caudales mensuales (1981-2016) en estaciones hidrométricas ubicadas en la vertiente del Titicaca	32
Figura 15. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “F”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M	41
Figura 16. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “L”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M	42

Figura 17. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “M”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M 43

Figura 18. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “N”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M 43

Figura 19. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales (KGE_{Regional}), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “F” 44

Figura 20. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales (KGE_{Regional}), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “L” 44

Figura 21. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales (KGE_{Regional}), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “M” 45

Figura 22. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales (KGE_{Regional}), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “N” 45

ÍNDICE DE TABLAS

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Descripción y rango mínimo y máximo de los parámetros del modelo GR2M	7
Tabla 2. Estaciones hidrométricas y cuencas seleccionadas para la calibración del modelo hidrológico mensual en las vertientes del Pacífico y del Titicaca	8
Tabla 3. Desempeño de los modelos mensuales en los periodos de calibración y validación individual de parámetros en cuencas de las vertientes del Pacífico y del Titicaca.....	17
Tabla 4. Parámetros del modelo GR2M para cada una de las regiones de calibración en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca	19
Tabla 5. Estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Pacífico	29
Tabla 6. Estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Titicaca	32
Tabla 7. Resultados de la calibración individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Pacífico	33
Tabla 8. Resultados de la calibración individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Titicaca	34
Tabla 9. Resultados de la validación individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Pacífico	35
Tabla 10. Resultados de la validación individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Titicaca	36
Tabla 11. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “C”	37
Tabla 12. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “F”	38
Tabla 13. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “L”	39
Tabla 14. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “M”	40

RESUMEN

En el Perú, la baja densidad de estaciones hidrométricas y su corta longitud de registro dificultan el monitoreo continuo de caudales a nivel nacional. Por ello, el enfoque de regionalización de parámetros de modelos hidrológicos surge como alternativa para la estimación de caudales en cuencas no aforadas. El presente estudio tiene como finalidad evaluar el desempeño en la generación de caudales mensuales a nivel de subcuencas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca, aplicando el modelo GR2M y un esquema de regionalización. Se modelaron 781 subcuencas comprendidas en siete regiones de calibración. Los modelos se forzaron con datos de precipitación y evapotranspiración potencial del producto PISCO, y se calibraron y validaron a partir de 21 puntos de control hidrométrico considerando la métrica de Kling-Gupta (KGE). Los resultados muestran valores de $KGE > 0.50$ durante la regionalización, y una adecuada representación de la estacionalidad de la escurrentía. Finalmente, se obtuvieron las salidas del modelo para el periodo enero 1981 - diciembre 2016, y se generó una base de datos de caudales mensuales a nivel de subcuencas del Pacífico y del Titicaca denominada PISCO-HyM_GR2M. Este nuevo producto contribuirá, entre otros fines, al monitoreo de sequías hidrológicas en el Perú.

Palabras clave: GR2M, PISCO, regionalización, modelación hidrológica

1. INTRODUCCIÓN

La cuantificación de la oferta hídrica es de suma importancia para la gestión y planificación de los recursos hídricos (Klemes, 1986; Yates *et al.*, 2005). En el Perú, la distribución de este recurso en las vertientes del Pacífico, Titicaca y Atlántico es heterogénea; siendo las cuencas ubicadas en la vertiente del Pacífico aquellas con menor oferta y mayor demanda hídrica (ANA, 2013). La baja densidad de puntos de control hidrométrico y la corta longitud de sus registros dificultan el monitoreo de caudales, por lo que la simplificación de los procesos del ciclo hidrológico a través de su modelamiento (Xu & Singh, 1998) surge como alternativa para entender la relación precipitación-escorrentía (Todini, 2007), estimar extremos hidrológicos (Ding *et al.*, 2016), realizar el pronóstico operacional de caudales (Lü *et al.*, 2016), evaluar los efectos del cambio climático en la generación de escorrentía futura (Middelkoop *et al.*, 2001; Okkan & Fistikoglu, 2013), entre otros fines.

En la actualidad existen modelos de estructura compleja que desarrollan de forma distribuida toda la física detrás de los procesos hidrológicos (e.g. Clark *et al.*, 2015; Wi *et al.*, 2015); sin embargo, en cuencas con escasa información dicha complejidad y heterogeneidad da lugar al incremento de la incertidumbre de forzantes, variables de estado y salidas del modelo (Beven, 1993; Liu & Gupta, 2007; Moradkhani *et al.*, 2005; Montanari, 2012). En ese contexto, los modelos conceptuales son fáciles de implementar y de bajo costo computacional ya que simulan los procesos hidrológicos de una cuenca de forma agregada (Perrin *et al.*, 2001). Tal es el caso del modelo hidrológico mensual GR2M (Mouelhi *et al.*, 2006), el cual ha sido ampliamente utilizado en diferentes condiciones hidroclimáticas (e.g. Pumo, Viola and Noto, 2016; Pérez-Sánchez *et al.*, 2019; Rau *et al.*, 2019). Por ejemplo, Bai *et al.* (2015) comparó el desempeño de 12 modelos de balance hídrico en China, demostrando que los dos parámetros de GR2M son suficientes para obtener buenos resultados en la generación de escorrentía mensual. Adicionalmente, GR2M ha sido empleado como base para la evaluación de la incertidumbre de forzantes climáticas (Louvet *et al.*, 2015; Paturel *et al.*, 1995), la generación de caudales con enfoque de incertidumbre paramétrica (Rwasoka *et al.*, 2013; Kinar & Pomeroy, 2015; Paturel & Servat, 2003), y la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos (Okkan & Fistikoglu, 2014). No obstante, se han realizado experimentos para mejorar el desempeño de GR2M aplicando enfoques de calibración bayesianos (Huard & Mailhot, 2008), y acoplado su estructura a un modelo de caja negra (*Fuzzy Model*) (Turan & Yurdusev, 2015).

Uno de los principales retos en la modelación hidrológica es cuantificar la escorrentía superficial en cuencas sin control hidrométrico. La estimación de caudales en cuencas no aforadas puede realizarse mediante la transferencia de parámetros de un modelo desde una cuenca donadora hacia una receptora, siguiendo criterios de similitud hidrológica (Beck *et al.*, 2010). La clasificación hidrológica de cuencas basadas en su similitud fisiográfica e hidroclimática proporciona una base para la extrapolación de parámetros (Wagener *et al.*, 2007); sin embargo, a causa de la equifinalidad de estos últimos, el enfoque de calibración local de parámetros y su posterior aplicación a escala regional puede no ser la adecuada (Bardossy, 2007). Por ello, Zamoum (2019) emplea métodos de Análisis de Componentes Principales (PCA) y *Self-Organization Mapping* (SOM) para regionalizar parámetros del modelo GR2M; mientras que, Andrew R Bock *et al.* (2016) delimita regionales de calibración para el

modelo mensual MWBM, basándose en el análisis de sensibilidad de índices hidroclimáticos como respuesta a la variación de los parámetros del modelo.

En el Perú se ha utilizado el modelo GR2M para evaluar la respuesta hidrológica en cuencas andino-amazónicas, teniendo como forzante meteorológica el producto satelital de precipitación TRMM y datos observados en estaciones (e.g. Lavado *et al.*, 2009; Zubieta, Laqui and Lavado, 2018). Asimismo, recientes experimentos de regionalización hidrológica con el modelo GR2M presentados en Rau *et al.* (2019) evaluaron el comportamiento multidecadal de los caudales mensuales en siete cuencas de la vertiente del Pacífico, encontrando relaciones empíricas entre los parámetros del modelo y características fisiográficas de las cuencas.

Por ello, el objetivo del presente estudio es evaluar el desempeño en la generación de caudales mensuales, a escala regional, en cuencas sin control hidrométrico ubicadas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca, aplicando un enfoque de regionalización de parámetros en un modelo hidrológico conceptual. La estructura del presente trabajo comprende: (a) la descripción general del área de estudio, (b) la descripción del modelo conceptual y datos de entrada, (c) la delimitación de las regiones de similitud de parámetros, (d) la calibración y validación del modelo conceptual, y (e) la generación de caudales a escala regional.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La **Figura 1** muestra el modelo digital de elevaciones (DEM) para el Perú. Se observa la cordillera de los Andes, la cual atraviesa todo el territorio de norte a sur. Esta cordillera origina una barrera orográfica natural que atrapa la humedad atmosférica proveniente del Atlántico; produciéndose altas precipitaciones sobre la llanura amazónica (lado oriental) y bajas precipitaciones en la costa (lado occidental).

En el presente trabajo, la zona de estudio comprende las vertientes del Pacífico y del Titicaca (ver **Figura 1**). Estas se ubican entre las latitudes 3.3 y 18.4°S, y tienen una extensión total de aproximadamente 340093 Km². En ambos casos, los ríos nacen del lado occidental de los Andes; cuyos cursos de agua siguen una dirección de este a oeste en la vertiente del Pacífico, y de noroeste a sureste en la vertiente del Titicaca.

En total se delimitaron 781 subcuencas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca (**Figura 1**), con una superficie promedio de 405 Km² (ver detalle de la distribución superficial de las subcuencas en el **Anexo A**). De estas, 673 se ubican en la vertiente del Pacífico, y 108 en la vertiente del Titicaca. Asimismo, debido a los límites transfronterizos de algunas cuencas, como es el caso de cuencas en costa norte peruana, se tomaron en cuenta subcuencas ubicadas en países vecinos.

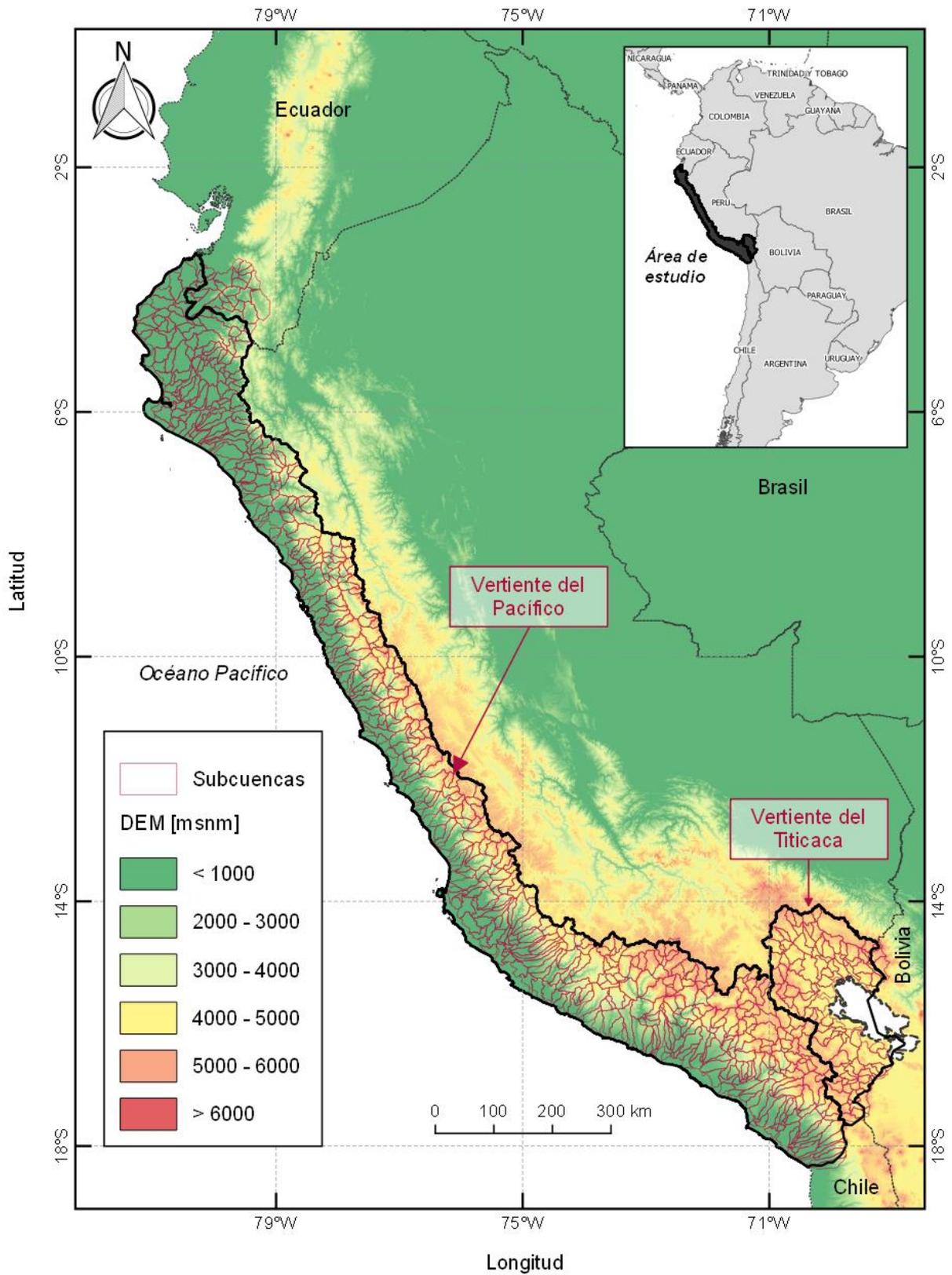


Figura 1. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) y subcuencas delimitadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca

3. DATOS Y MÉTODOS

3.1 Estructura del modelo mensual

a. Modelo GR2M

El modelo parsimonioso GR2M, desarrollado por Mouelhi *et al.* (2006), es utilizado en el presente trabajo. Este modelo conceptualiza la cuenca como un par de estanques, uno de producción y otro de rastreo (**Figura 2**). GR2M tiene dos parámetros, X_1 y X_2 que definen la capacidad máxima del estanque de producción y el intercambio de agua entre la superficie y aguas subterráneas en el estanque de rastreo, respectivamente. El modelo GR2M es forzado con datos mensuales de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (E) para generar caudales mensuales (Q) a la salida de la cuenca. Considera también variables de estado en el estanque de producción (S) y rastreo (R). Teniendo en cuenta la incertidumbre en las forzantes, se incorporaron factores de corrección para la precipitación (f_{precip}) y evapotranspiración potencial (f_{pet}). La estructura del modelo GR2M se muestra en la **Figura 2**. El detalle de las ecuaciones del modelo conceptual se detallan en Mouelhi *et al.*, (2006), mientras que la descripción de los parámetros y sus valores mínimo y máximo se presentan en la **Tabla 1**.

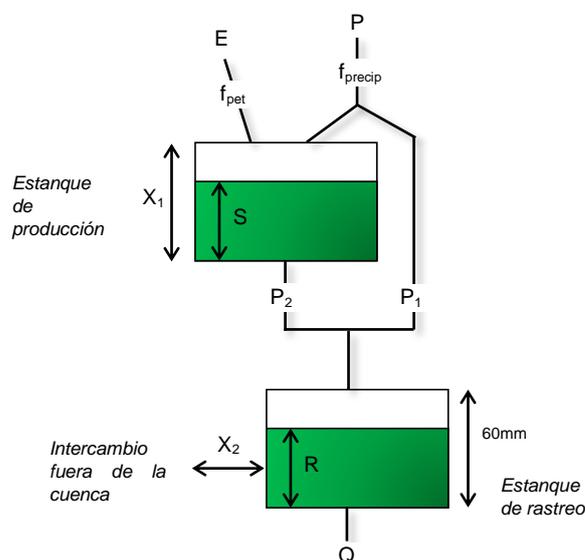


Figura 2. Estructura del modelo GR2M incorporando factores de corrección para la precipitación y evapotranspiración potencial. Adaptado de Mouelhi *et al.* (2006)

El modelo GR2M considera procesos hidrológicos agregados en toda la cuenca. Por ello cada una de las 781 subcuencas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca (**Figura 1**) es inicialmente modelizada de forma independientemente, para luego acumular sus salidas considerando su topología. Dada la cantidad de subcuencas a ser modelizadas, se empleó el lenguaje de programación R (R Core Team, 2013) para la elaboración del paquete “GR2MSemiDistr” (disponible en: <https://github.com/hllauca/GR2MSemiDistr>) y crear un entorno de trabajo que

facilite la simulación regional de caudales mensuales en ambas vertientes en estudio (ver detalle en el **Anexo G** y el **Anexo H**).

Tabla 1. Descripción y rango mínimo y máximo de los parámetros del modelo GR2M

Parámetro	Unid.	Descripción	Mínimo	Máximo
X1	mm	Capacidad máxima de almacenamiento del reservorio suelo.	1	2000
X2	-	Coefficiente de intercambios subterráneo	0.01	2
f_{precip}	-	Factor de corrección de la precipitación mensual.	0.8	1.2
f_{pet}	-	Factor de corrección de la evapotranspiración potencial mensual.	0.8	1.2

Fuente: Adaptado de Pagano, Hapuarachchi and Wang (2009)

b. Acumulación de caudales mensuales

Los caudales mensuales simulados en el paso anterior son luego acumulados automáticamente considerando su topología en base a un DEM de entrada. Esto se realiza aplicando un algoritmo de Acumulación Ponderada del Flujo también llamada *Weighted Flow Accumulation* (WFAC). El WFAC toma en cuenta la Dirección del Flujo (*Flow Direction*) generada a partir del DEM proporcionado para la zona de estudio. Las ponderaciones o pesos corresponden a los caudales simulados previamente para cada subcuenca y cada mes. De esta manera, los valores de cada celda son acumulados en función de la dirección del flujo; obteniendo así los caudales simulados en una versión semidistribuida del modelo GR2M.

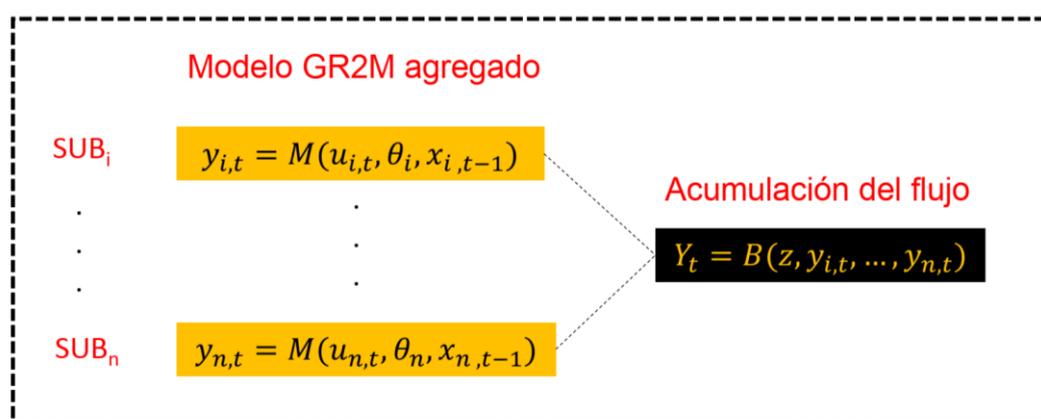


Figura 3. Esquema del modelo GR2M semidistribuido del paquete “GR2MSemiDistr”

El esquema de trabajo del modelo GR2M en su versión semidistribuida se presenta en la **Figura 3**. En ella se muestran las salidas y del modelo *M* (con forzantes meteorológicas *u*, parámetros ϑ , y

variables de estado x), para cada subcuenca i y paso de tiempo t . Luego estas salidas son acumuladas (Y) automáticamente con el algoritmo *B a partir del DEM z* para la cuenca. El código de programación para la ejecución del modelo GR2M en modo semidistribuido y el manual técnico del paquete GR2MSemiDistr se detallan en el **Anexo G** y **Anexo H**.

3.2 Datos de caudales mensuales

El detalle de las estaciones hidrométricas seleccionadas para el presente estudio se muestra en la **Tabla 2**. En este estudio se consideraron los datos de caudales mensuales para 20 cuencas, 17 de ellas ubicadas en la vertiente del Pacífico y cuatro en la vertiente del Titicaca (**Figura 4**). La selección de estaciones tomó en cuenta la longitud de registro entre enero 1981 y diciembre 2016. De este modo sólo se consideraron las estaciones con una longitud de registro mayor al 50% (el detalle de la longitud de registro de todas las estaciones ubicadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca se muestra en el **Anexo B**). Asimismo, teniendo en cuenta la operatividad del modelo con fines de pronóstico, los caudales mensuales no fueron naturalizados, por lo que la incertidumbre asociada a los caudales observados es compensada en la calibración de parámetros del modelo conceptual, en especial por los coeficientes de corrección f_{precip} y f_{pet} .

Tabla 2. Estaciones hidrométricas y cuencas seleccionadas para la calibración del modelo hidrológico mensual en las vertientes del Pacífico y del Titicaca

Vertiente	Cuenca	Estación	Longitud [°]	Latitud [°]
Pacífico	Tumbes	El Tigre	-80.47	-3.72
	Chira	El Ciruelo	-80.15	-4.30
	Chira	Los Encuentros	-80.28	-4.43
	Piura	Pte. Sánchez Cerro	-80.62	-5.18
	Chancay-Lambayeque	Racarumi	-79.32	-6.63
	Zaña	Batan	-79.29	-6.80
	Santa	Condorcerro	-78.25	-8.65
	Fortaleza	Malvados	-77.63	-10.34
	Pativilca	Cahua	-77.22	-10.55
	Supe	Las Minas	-77.46	-10.92
	Chancay-Huaral	Santo Domingo	-77.05	-11.38
	Rímac	Chosica	-76.69	-11.93
	Mala	La Capilla	-76.50	-12.52
	Cañete	Socsi	-76.19	-13.03
	Pisco	Letrayoc	-75.72	-13.65
	Ocoña	Pte. Ocoña	-73.12	-16.42
	Tambo	Pte. Santa Rosa	-71.69	-17.03
Titicaca	Huacané	Pte. Carretera Huacané	-69.79	-15.22
	Intercuenca Ramis	Pte. Carretera Ramis	-69.87	-15.26
	Coata	Pte. Unocolla (Coata)	-70.19	-15.45
	Ilave	Pte. Carretera Ilave	-69.63	-16.09

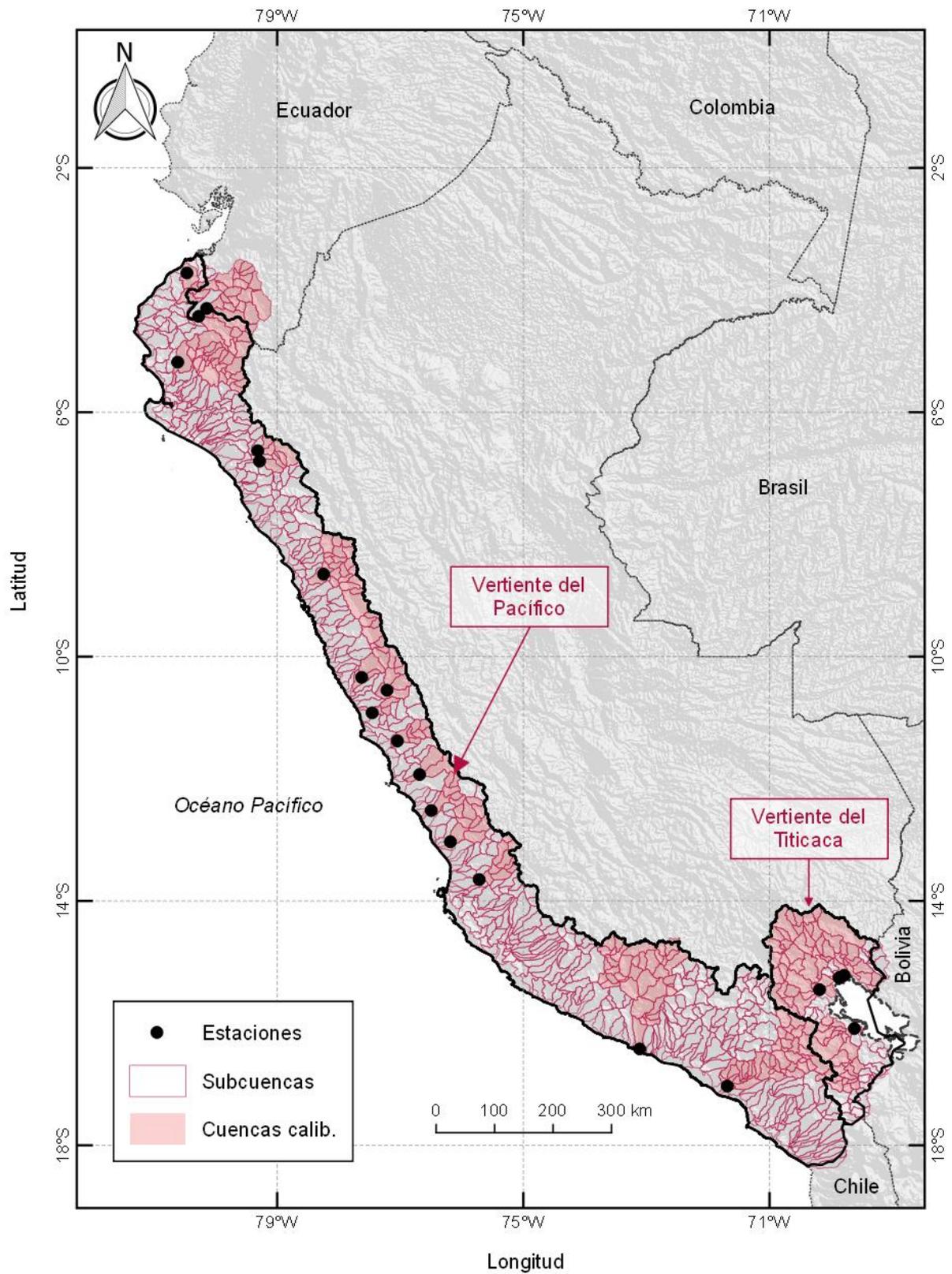


Figura 4. Estaciones hidrométricas y cuencas seleccionadas para la calibración del modelo hidrológico mensual en las vertientes del Pacífico y del Titiaca

3.3 Datos de entrada al modelo

a. Precipitación

En el presente estudio se utilizaron los datos grillados del producto PISCO (*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations*), para la variable de precipitación mensual PISCOpm V.2.1 (Aybar et al., 2019). Este producto es generado a partir de la mezcla de información satelital de precipitación del proyecto CHIRPS (*Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station data*) y de información de estaciones pluviométricas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). PISCOpm cuenta con información de precipitación mensual a una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, y tiene cobertura para todo el territorio peruano. Los datos del producto PISCOpm se encuentran disponibles de forma gratuita en el portal: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.Prec/.v2p1/.stable/.monthly/>. Para ingresar los datos de precipitación al modelo se calculó su valor areal para cada subcuenca entre enero 1981 a diciembre 2016. Para mayor detalle de la metodología de la generación de datos de precipitación de este producto revisar Aybar et al. (2019).

b. Evapotranspiración potencial

Se emplearon los datos grillados de evapotranspiración potencial (PET) a nivel mensual del producto experimental PISCOpet V.1.0. Este producto es generado a partir de los datos de temperatura mínima y temperatura máxima grillada del producto PISCOtemp V1.1 (Huerta et al., 2018) y la aplicación de la metodología de Oudin (Oudin et al., 2005) para el cálculo de la evapotranspiración potencial. PISCOpet cuenta con información de evapotranspiración potencial a una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, y tiene cobertura para todo el territorio peruano. Los datos del producto PISCOpet se encuentran disponibles de forma libre en el portal web: <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.PET/.v1p1/.stable/.monthly/>. Para ingresar los datos de evapotranspiración potencial al modelo se calculó la PET areal para cada subcuenca, de enero 1981 a diciembre 2016.

3.4 Regionalización de parámetros

a. Análisis de sensibilidad

Los patrones espaciales y la magnitud de la sensibilidad de parámetros del modelo conceptual en todo el Perú son considerados como base para la delimitación de subcuencas con similitud en su respuesta hidrológica y para la regionalización de parámetros durante la calibración del modelo GR2M. Al igual que en Bock et al. (2016), el principal supuesto de este estudio es considerar el análisis de sensibilidad como base principal para la regionalización en lugar de la similitud de las características fisiográficas entre cuencas. Así, los resultados del análisis de sensibilidad son entradas para la delimitación de regiones de calibración del modelo.

En este trabajo se realizó el análisis de sensibilidad de parámetros del modelo GR2M mediante el método FAST (*Fourier Amplitude Sensivity Test*) propuesto por Reusser, Buytaert and Zehe (2011). De acuerdo a Bock *et al.* (2016), este método crea un conjunto de sets de parámetros, los cuales son únicos y no están correlacionados entre sí. Las salidas del modelo, corridas con las mismas forzantes climáticas pero con los distintos sets de parámetros, son *Fourier*-transformadas en una densidad espectral de potencias. Luego la sensibilidad se calcula como la suma de las potencias de la varianza de las salidas del modelo, para cada set de parámetros (varianza total). La sensibilidad de los parámetros es luego escalada de tal manera que los valores de sensibilidad vayan de 0 a 1, siendo 1 una alta sensibilidad. Para mayor detalle de la metodología FAST revisar Reusser, Buytaert and Zehe (2011).

Muchos análisis de sensibilidad en modelos hidrológicos evalúan la métrica de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970). No obstante, esto requiere del contraste entre las salidas simuladas con las observaciones. En nuestro caso, se consideran métricas que tomen en cuenta la magnitud y variabilidad de las forzantes climáticas (precipitación) y las salidas del modelo (caudal). En ese sentido se utilizó el Índice de Precipitación-Escorrentía (RR) y el Índice de Variabilidad de la Escorrentía (RV) propuestos por Sankarasubramanian and Vogel (2003), los cuales se calculan mediante las ecuaciones [1] y [2], respectivamente:

$$RR = \frac{V_{Q_{sim}}}{V_P} \quad ; \quad [1]$$

$$RV = \frac{\sigma_{Q_{sim}}}{\sigma_P} \quad ; \quad [2]$$

donde $V_{Q_{sim}}$ es el volumen total de la escorrentía simulada, V_P es el volumen total de la precipitación, $\sigma_{Q_{sim}}$ es la desviación estándar de la escorrentía simulada, y σ_P es la desviación estándar de la precipitación.

Los índices RR y RV representan las principales características hidroclimáticas en las 781 subcuencas de las vertientes del Pacífico y del Titicaca. Estos índices se calcularon considerando un conjunto de 1000 set de parámetros del modelo GR2M. En este estudio, sólo los parámetros X1 y X2 fueron considerados para el análisis de sensibilidad. Los coeficientes f_{precip} y f_{pet} no fueron tomados en cuenta para este experimento.

b. Delimitación de regiones de calibración

Esto se realizó mediante el Análisis Regional de Frecuencias basado en los L-momentos (Hosking, 1990; Tasker *et al.*, 1998). Este procedimiento consiste en definir regiones estadísticamente homogéneas en una zona determinada, con el fin de asociar subcuencas con iguales características. Como variables predictoras del agrupamiento se utilizaron los resultados del

análisis de sensibilidad de los índices hidroclimáticos RR y RV. Adicionalmente, se incluyeron estimaciones de los caudales medios anuales obtenidos aplicando la metodología de Budyko (Budyko, 1974), así como los valores de latitud y longitud para el centroide de cada subcuenca. Se considera que las variables predictoras deben ser estandarizadas para evitar el predominio de vectores característicos con grandes valores absolutos.

De este modo la delimitación de regiones de calibración consideró en primer lugar el agrupamiento de las variables descriptivas antes mencionadas aplicando técnicas de *clustering* con el algoritmo Ward. Posteriormente, se aplicaron las pruebas de discordancia y heterogeneidad (Tasker et al., 1998) a fin de corroborar el agrupamiento estadístico de los resultados. En este estudio, las medidas de discordancia y heterogeneidad verificaron que las subcuencas conformaran la cantidad adecuada de regiones. En caso de no cumplir con ambas pruebas, se volvió a realizar el agrupamiento.

3.5 Calibración del modelo mensual

a. Calibración y validación individual de parámetros

Como consecuencia de la agregación y parametrización de procesos hidrológicos, los parámetros de un modelo hidrológico conceptual no pueden ser estimados directamente en campo, sino que son ajustados mediante su calibración a través de un algoritmo de optimización (Vrugt et al., 2008; Rwasoka et al., 2013). Este proceso consiste en ajustar la respuesta simulada a la observada, por medio de una función objetivo establecida para su maximización o minimización, según sea el caso (Krause et al., 2005).

En este estudio la calibración del modelo mensual se realizó de forma independiente para cada cuenca mediante el algoritmo de optimización mono-objetivo *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (Duan et al., 1993); teniendo como función objetivo la métrica de Kling-Gupta (KGE) (Gupta et al., 2009), la cual se calcula mediante la ecuación [3]:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} ; \quad [3]$$

donde r es el coeficiente de correlación de Pearson, σ_{sim} y σ_{obs} es la desviación estándar de los datos simulados y observados, respectivamente; mientras que μ_{sim} y μ_{obs} corresponden a las medias. El coeficiente KGE varía de $-\infty$ a 1, siendo 1 el mejor ajuste entre las series observadas y simuladas. La métrica KGE ha tenido una creciente acogida en la comunidad hidrológica en los últimos años, y es empleado actualmente en funciones de optimización de modelos hidrológicos (Knoben et al., 2019; Patil & Stieglitz, 2015; Pechlivanidis & Arheimer, 2015).

El proceso de calibración consideró un periodo de calentamiento (*Warm-up*) de dos años, con la finalidad de independizar el desempeño de los modelos de la incertidumbre en sus condiciones

iniciales. Adicionalmente se consideran las métricas de ajuste de Nash-Sutcliffe (NSE), el Coeficiente de Correlación de Pearson (R), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el Porcentaje de Sesgo (PBIAS) entre las series observadas y simuladas, calculadas mediante las ecuaciones [4], [5], [6] y [7], respectivamente; para evaluar la simulación en los periodos de calibración y validación.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \mu_{obs})^2} ; \quad [4]$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \mu_{obs})(Q_{sim,i} - \mu_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \mu_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - \mu_{sim})^2}} ; \quad [5]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})^2} ; \quad [6]$$

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^N Q_{sim,i}} ; \quad [7]$$

donde Q_{sim} y Q_{obs} corresponden a los caudales simulados y observados en el paso de tiempo i .

El proceso de calibración independiente consideró en primer lugar la calibración de parámetros del modelo GR2M ($X1$, $X2$, f_{precip} y f_{pet}) en cuencas que abarquen el menor número regiones de calibración. De este modo se garantiza la disminución de la incertidumbre en la optimización de parámetros.

b. Validación cruzada de parámetros

Debido al corto número de estaciones hidrométricas no se consideran estaciones sólo para calibración y sólo para validación. En lugar de ello se realizó una validación cruzada de parámetros entre estaciones pertenecientes a una misma región de calibración. Es decir, los parámetros previamente calibrados y validados de forma independiente para cada cuenca fueron

intercambiados entre sí, para luego evaluar el desempeño de las salidas de la simulación. En este experimento se consideró la totalidad de la longitud de registro de la información de caudales (1981-2016), sólo se tomó en cuenta la métrica KGE.

Finalmente, el set de parámetros con el que se obtenga un mayor KGE en la mayoría de los puntos de estación es seleccionado como los parámetros más representativos para la dicha región de calibración.

3.6 Verificación de las salidas regionales

Tras la obtención de los mejores parámetros para cada región de calibración, se evaluó cambio en el desempeño de los modelos mensuales respecto a su calibración y validación de forma independiente. De esta manera se verificó el cambio de la métrica KGE obtenida de forma independiente o previa (KGE_{prior}), respecto al valor obtenido empleando los parámetros regionales ($KGE_{regional}$). Cambios poco significativos en la variación del KGE luego de la regionalización dan cuenta de una adecuada delimitación de las regionales de calibración y un buen ajuste del modelo regional.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Regiones de calibración del modelo mensual

La sensibilidad relativa derivada del análisis FAST, empleando los índices hidroclimáticos RR y RV, para las subcuencas en todo el territorio peruano se muestra en la **Figura 5**. RR (**Figura 5a**) es más sensible al parámetro X2 en la costa peruana, en donde hay sustancial aporte subterráneo a la escorrentía superficial, y menos sensible al parámetro X1 debido a las características áridas predominantes en esta zona. En subcuencas de los Andes la sensibilidad de RR se explica en mayor medida por X2 que por X1. En la región oriental peruana, el aporte de X2 a la sensibilidad de RR es más baja respecto a la costa y los Andes. En estas subcuencas se incrementa el aporte de X1 a la sensibilidad de RR debido a la presencia de suelos con mayor contenido de humedad en la Amazonía.

En el caso de RV (**Figura 5b**), su sensibilidad en gran parte de la costa se explica por el parámetro X2, a excepción de la costa norte en donde X1 aporta en mayor proporción. En las subcuencas de cabecera en el lado occidental de los Andes X1 tiene mayor relevancia en la sensibilidad de RV. En la región oriental de los Andes como en la Amazonía peruana, existe mayor variabilidad de los pesos de X1 y X2 frente a la sensibilidad de RV. No obstante, en gran medida X2 explica en mayor proporción la variabilidad de la escorrentía frente a las precipitaciones. Finalmente es importante precisar que de ambos parámetros del modelo GR2M, X2 explica en gran parte del territorio peruano la sensibilidad de los índices hidroclimáticos RR y RV.

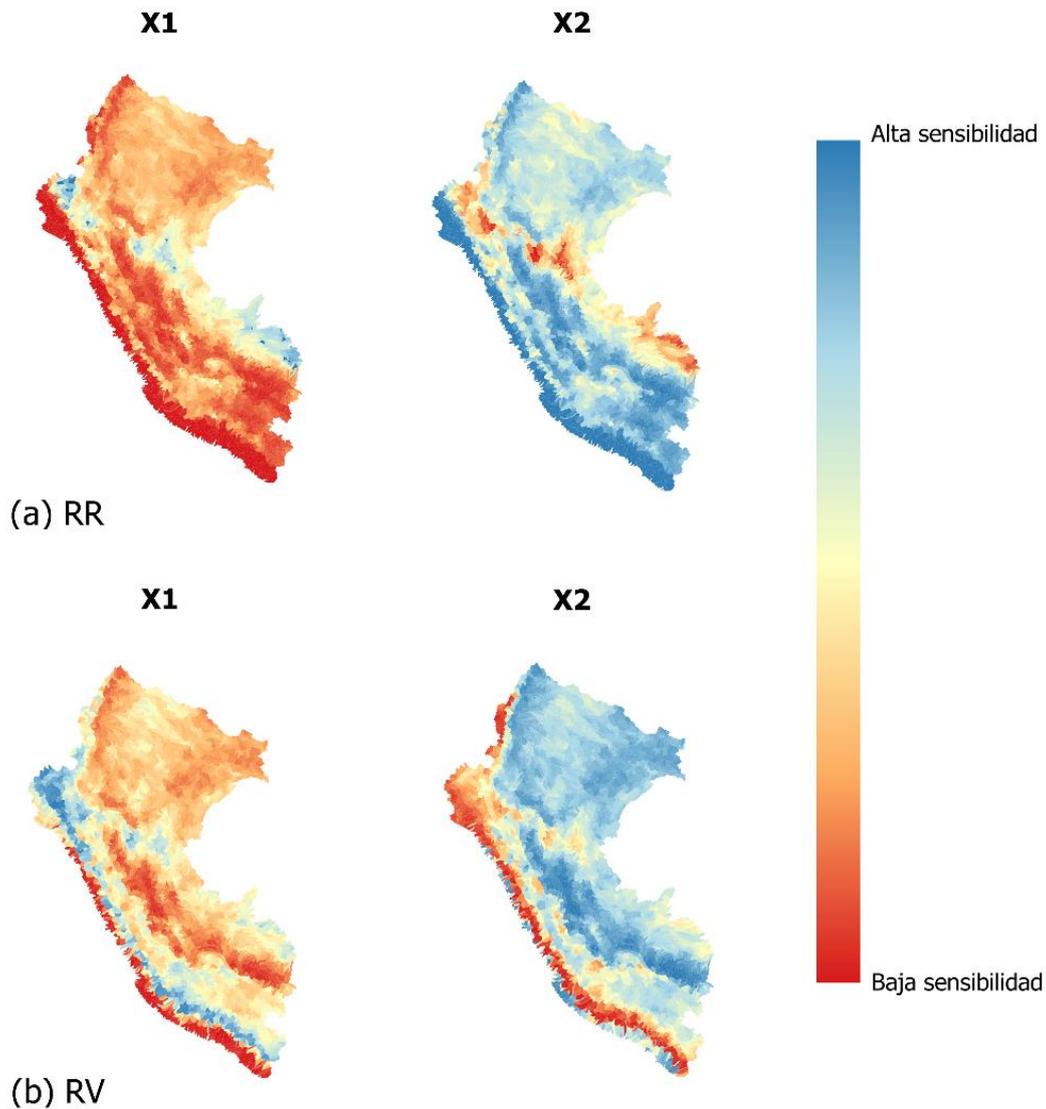


Figura 5. Sensibilidad de los índices de precipitación-escorrentía (RR) y variabilidad de la escorrentía (RV) aplicando el método FAST a los parámetros X1 y X2 del modelo GR2M

Las siete regiones de calibración delimitadas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca se presentan en la **Figura 6**. La totalidad de la vertiente del Titicaca pertenece a la región de calibración “M”, junto a subcuencas en la sierra sur en la vertiente del Pacífico. Las seis regiones de calibración restantes (“A”, “C”, “F”, “J”, “L”, “N”) se encuentran en la vertiente del Pacífico, en donde las regiones “C”, “F” y “L” cubren la mayor extensión. Todas las regiones de calibración cuentan con al menos un punto de control hidrométrico para la calibración de parámetros del modelo mensual.

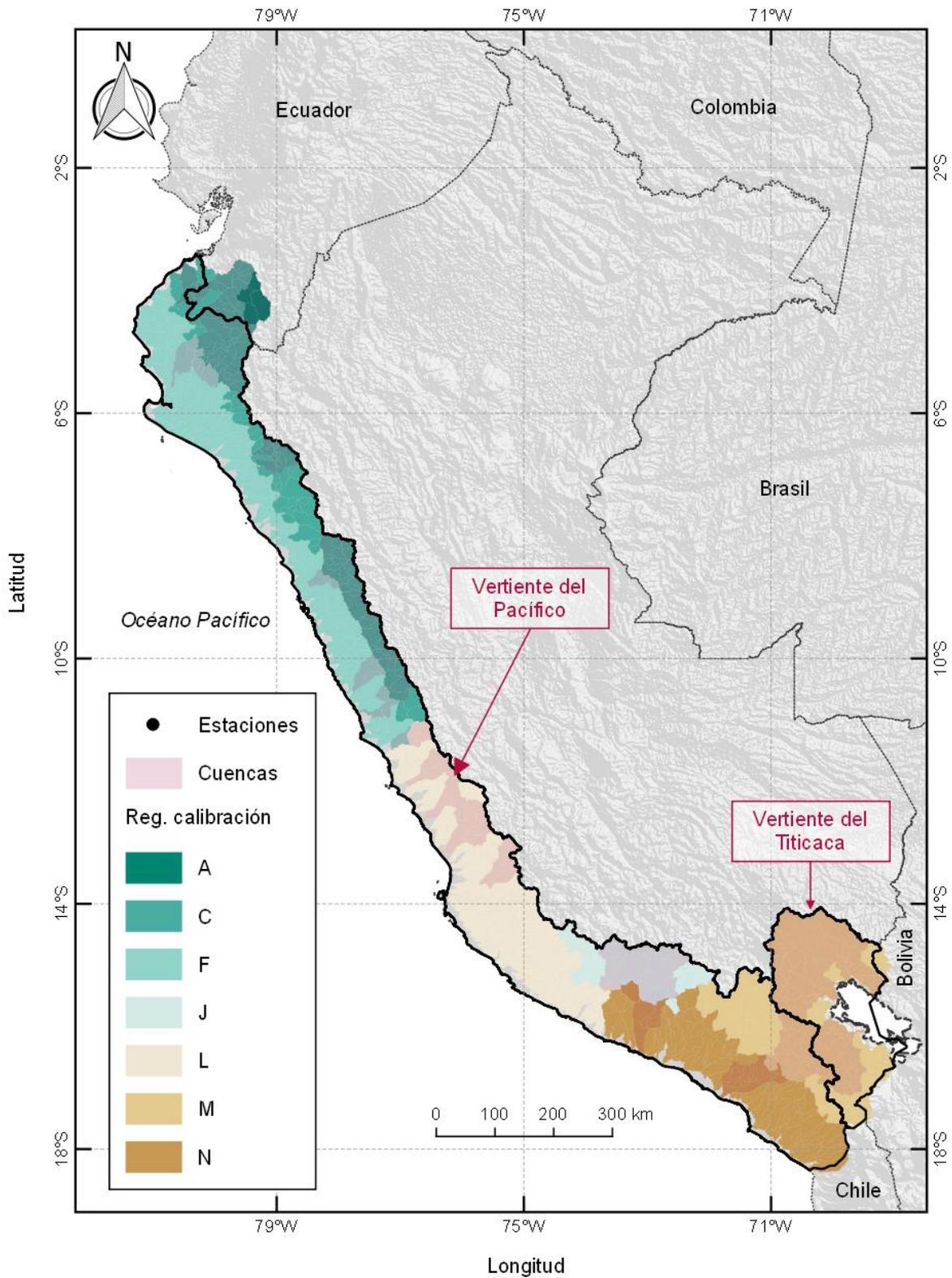


Figura 6. Regiones de calibración delimitadas para el modelo GR2M en las vertientes del Pacífico y del Tropicaca

4.2 Calibración del modelo mensual

a. Resultados de la calibración y validación independiente de parámetros

El detalle de los valores de KGE obtenidos para el periodo de calibración y validación del modelo se muestran en la **Tabla 3**. La **Figura 7** muestra la distribución espacial del desempeño del modelo mensual en los periodos de calibración y validación de forma independiente para cada punto de control hidrométrico. A mayor tamaño de las circunferencias mayor KGE obtenido en la simulación. El detalle de los parámetros, regiones de calibración, y demás criterios de desempeño evaluados en la calibración y validación se presenta en el **Anexo C** y **Anexo D**, respectivamente.

Tabla 3. Desempeño de los modelos mensuales en los periodos de calibración y validación individual de parámetros en cuencas de las vertientes del Pacífico y del Titicaca

Vertiente	Estación	Región	Calibración		Validación	
			Periodo	KGE	Periodo	KGE
Pacífico	El Ciruelo	A	01/1981 - 12/2002	0.704	01/2003 - 12/2016	0.587
		C				
	Batan	C	01/1981 - 12/1993	0.797	01/1994 - 12/2009	0.454
	Cahua	C	01/2000 - 12/2012	0.656	01/2013 - 12/2016	0.608
	Los Encuentros	C	01/1981 - 12/1997	0.757	01/1998 - 12/2009	0.613
	Racarumi	C	01/1981 - 12/2002	0.715	01/2003 - 12/2016	0.67
	El Tigre	C	01/1981 - 12/2002	0.656	01/2003 - 12/2016	0.642
		C				
	Condorcerro	C	01/1981 - 12/2002	0.637	01/2003 - 12/2016	0.688
		F				
	Pte. Sánchez Cerro	C	01/1997 - 12/2010	0.529	01/2011 - 12/2016	0.369
		F				
	Las Minas	F	01/1981 - 12/2002	0.537	01/2002 - 12/2016	0.334
	Malvados	F	01/2000 - 12/2010	0.763	01/2011 - 12/2016	0.718
	Santo Domingo	F	01/1994 - 12/2008	0.390	01/2009 - 12/2016	0.670
		L				
	Pte. Ocoña	J	10/2006 - 12/2013	0.902	01/2014 - 12/2016	0.399
		L				
N						
Chosica	L	01/1981 - 12/2002	0.614	01/2003 - 12/2016	0.562	
La Capilla	L	01/1902 - 12/2011	0.767	01/2012 - 12/2016	0.624	
Letrayoc	L	01/1981 - 12/2002	0.618	01/2003 - 12/2016	0.676	
Socsi	L	01/1981 - 12/1998	0.785	01/1999 - 12/2012	0.383	
Pte. Santa Rosa	M	01/1981 - 12/2002	0.719	01/2003 - 12/2016	0.054	
	N					
Titicaca	Huancané	M	01/1981 - 12/2002	0.480	01/2003 - 12/2016	0.637
	Ilave	M	01/1984 - 12/2003	0.582	01/2004 - 12/2016	0.441
	Ramis	M	01/1981 - 12/2002	0.778	01/2003 - 12/2016	0.794
	Coata	M	12/1990 - 12/2001	0.625	01/2002 - 12/2007	0.440

Durante la calibración de los modelos mensuales se obtuvieron valores de KGE superiores a 0.50, a excepción de las estaciones Santo Domingo y Huancané. El máximo KGE es 0.902 en la estación Pte. Ocoña. Los valores de KGE en el periodo de validación independiente son menores a los obtenidos en la calibración, siendo el máximo KGE de 0.794 obtenido en la estación Ramis. En ese sentido, los resultados obtenidos en esta sección muestran una adecuada representación de los caudales mensuales en las cuencas seleccionadas en las vertientes del Pacífico y Titicaca, obteniendo parámetros similares (ver detalle en el **Anexo C** y **Anexo D**) en puntos de control ubicados en la misma región de calibración.

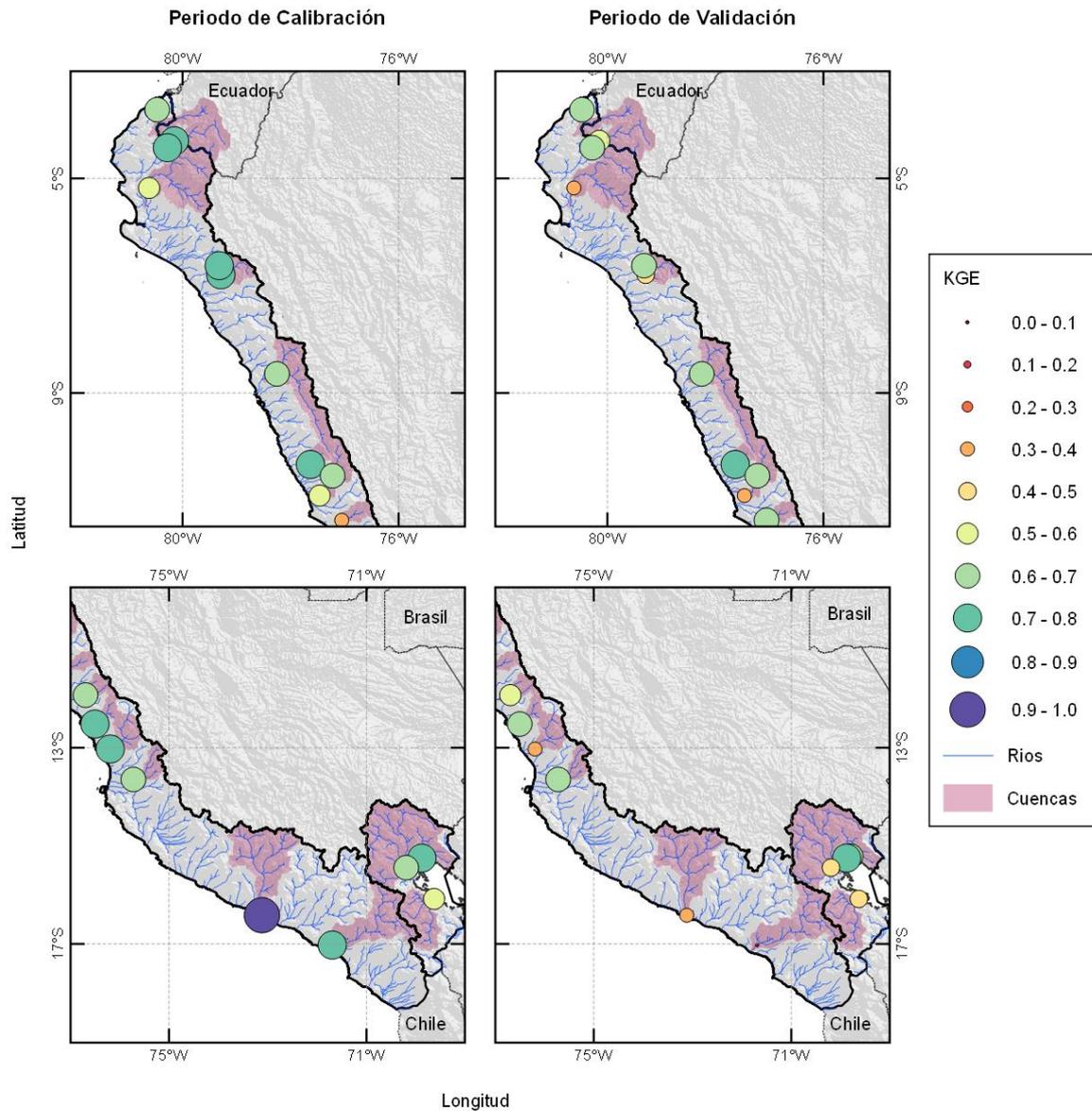


Figura 7. Desempeño de la calibración y validación independiente del modelo hidrológico mensual en las cuencas seleccionadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca

b. Resultados de la validación cruzada

El detalle de los criterios de desempeño luego del cruce de parámetros previamente calibrados y validados de forma independiente en cada punto de control hidrométrico se detallan en el **Anexo E**. Asimismo, los valores de KGE por región de calibración, luego de transponer los parámetros entre cuencas, se presentan en la **Figura 8**. Los parámetros de cuya estación se obtengan los mayores valores de KGE entre todas las estaciones de una misma región de calibración se consideraron como parámetros regionales. Por ejemplo, en la región de calibración “C” los parámetros de Cagua permiten obtener valores de KGE superiores a 0.60 en las estaciones restantes, a excepción de la estación Los Encuentros. De igual forma en las regiones de calibración “F”, “L” y “M”; los parámetros de Malvados, Letrayoc e Ilave proporcionan buenos altos KGE en las demás cuencas. Por lo tanto, estos parámetros fueron seleccionados como parámetros

regionales y se muestran en la **Tabla 4**. Para el caso de las regiones de calibración “A”, “J” y “N”, las cuales sólo cuentan con un punto de control hidrométrico, los parámetros individualmente calibrados y validos independientemente se consideraron como parámetros regionales.

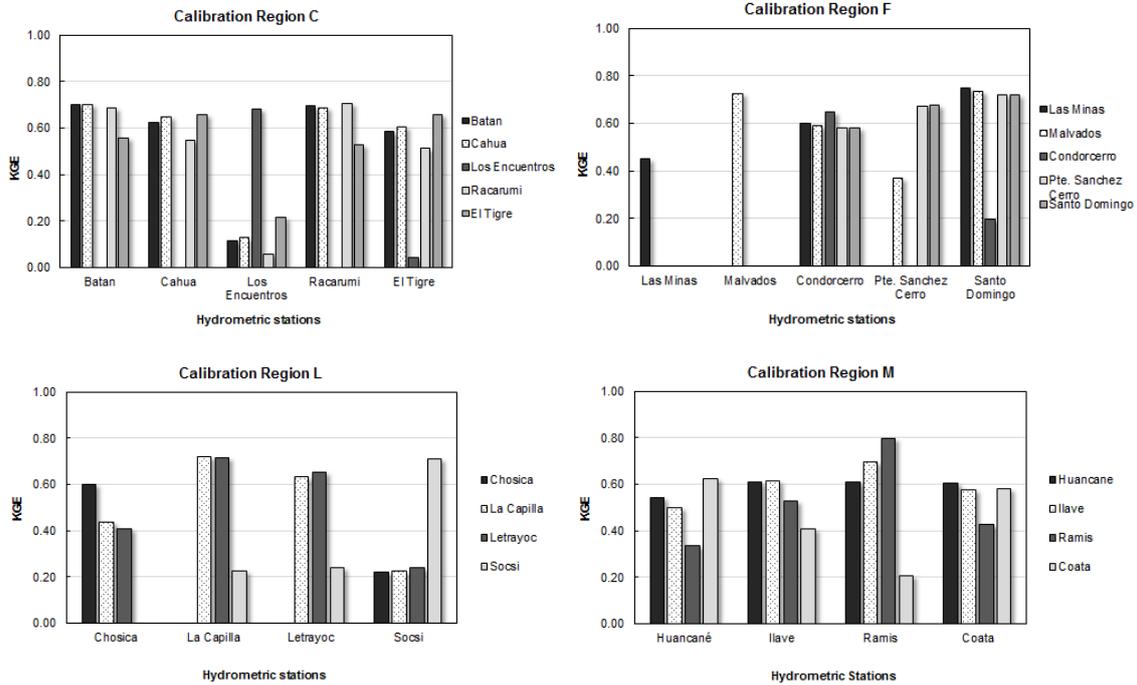


Figura 8. Validación cruzada de parámetros del modelo GR2M en cuencas de cada región de calibración, considerando la métrica KGE

Los parámetros regionales mostrados en la **Tabla 4** guardan relación de su magnitud, entre sí, a excepción de la región “J” en donde X1 toma un valor por encima de 280. Esto puede deberse a la poca cantidad de estaciones en dicha región que permita contrastar los caudales simulados y observados, la incertidumbre en las forzantes del modelo como es el caso de la precipitación grillada, y la no naturalización de la serie de caudales mensuales.

Tabla 4. Parámetros del modelo GR2M para cada una de las regiones de calibración en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca

Región	X1	X2	f _{precip}	f _{PET}
A	1.320	0.557	0.822	0.989
C	1.706	0.759	0.815	1.016
F	1.082	0.701	0.815	1.039
J	285.612	1.391	0.8	0.965
L	1.163	0.619	1.134	0.942
M	1.132	0.483	0.839	1.080
N	3.654	1.158	1.096	1.106

4.3 Verificación de la regionalización del modelo mensual

Con los parámetros regionales de la **Tabla 4** se obtuvieron las series de caudales mensuales simulados por el modelo GR2M. Los resultados del contraste entre los caudales simulados (naranja) y observados (azul) en las cuencas seleccionadas para la región de calibración “C” se presentan en la **Figura 9**. En esta figura se observa en escala grises (del más oscuro al más claro) los periodos de warm-up, calibración y validación, respectivamente; y los valores de KGE obtenidos. Asimismo, se muestra la dispersión entre las simulaciones y observaciones respecto a la línea de identidad 1:1 (simulaciones iguales a las observaciones). Estos resultados dan cuenta de la adecuada representación de la estacionalidad de las series de caudales mensuales en la simulación regional, y del buen desempeño del modelo con valores de KGE de hasta 0.704 en la estación El Ciruelo. No obstante, en la estación Los Encuentros se produce una subestimación sistemática en las salidas del modelo, tal como se observa la desviación de la nube de puntos respecto a la línea de identidad 1:1.

Asimismo, la **Figura 10** muestra la variación del KGE_{Regional} respecto al KGE_{Prior} para las cuencas seleccionadas en la región de calibración “C”. Se observa que en la mayoría de los casos el desempeño del modelo regional no sufre variaciones significativas respecto al empleo de parámetros calibrados y validados de forma independiente, por lo que se puede señalar la adecuada delimitación de las regiones de calibración y de estrategia de validación cruzada de parámetros. Sólo en el caso de la estación Los Encuentros y Pte. Sánchez Cerro, los valores de KGE decaen luego de la regionalización de parámetros ($KGE_{\text{Regional}} \ll KGE_{\text{Prior}}$), llegando a valores de hasta 0.20 en la validación.

El detalle del contraste entre los caudales simulados y observados para las demás regiones de calibración se muestra en el **Anexo F**. Finalmente, teniendo en cuenta la escasa información hidrométrica en las vertientes del Pacífico y del Titicaca, el modelo GR2M regional es capaz de estimar los caudales mensuales en subcuencas sin control hidrométrico, y permitirá completar lagunas de información en las estaciones hidrométricas del presente estudio.

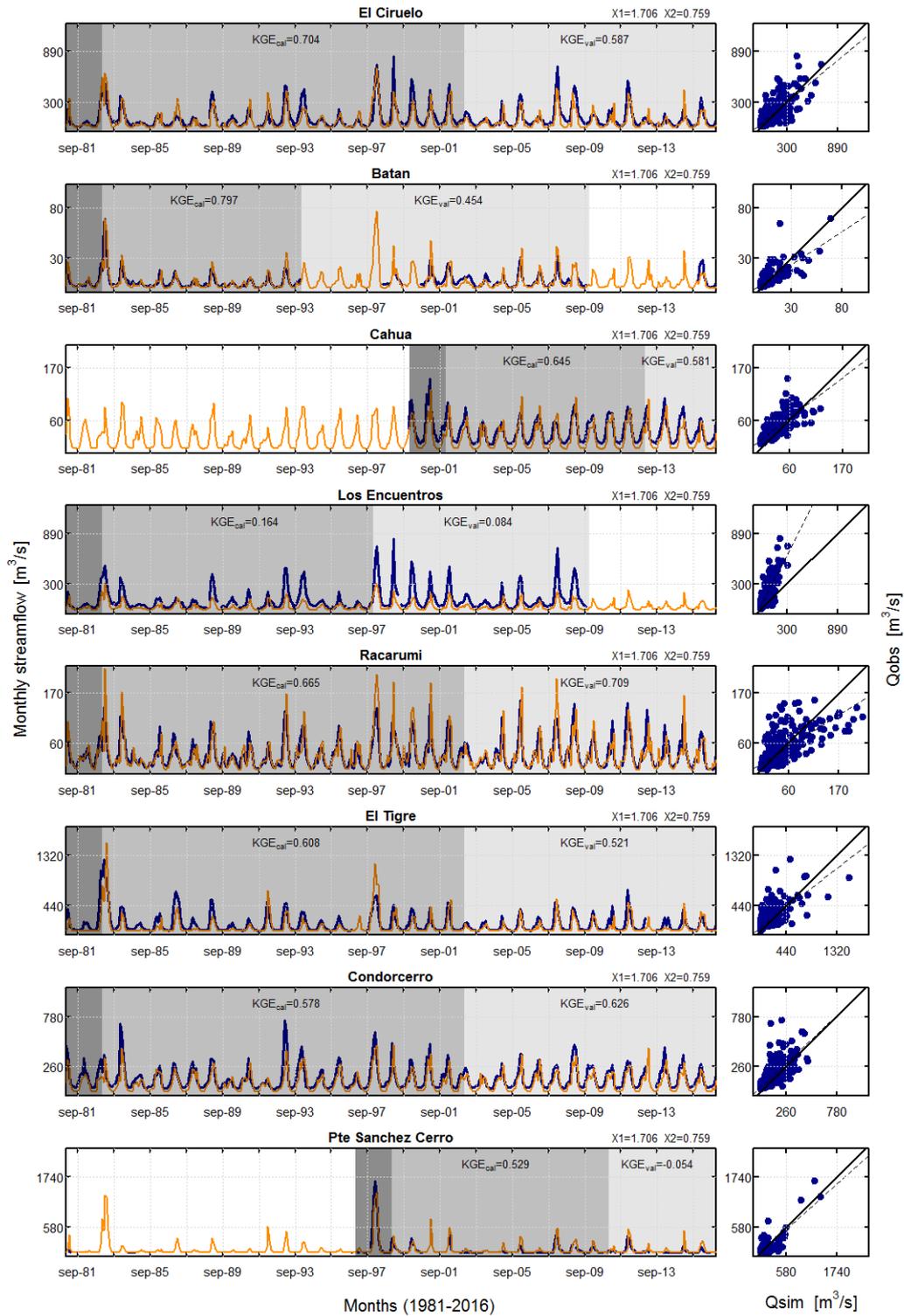


Figura 9. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración "C", empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M

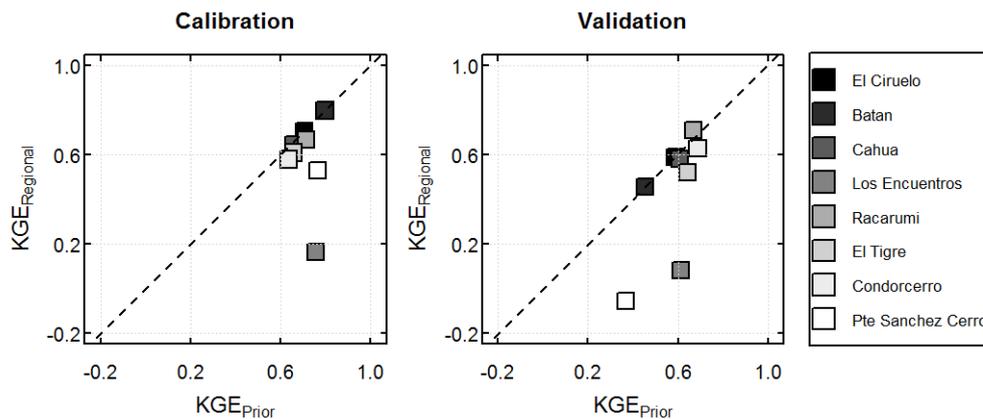


Figura 10. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “C”

4.4 Simulaciones regionales y puesta en operación del modelo mensual

La **Figura 11** muestra la simulación de caudales mensuales en las 781 subcuencas delimitadas en la vertiente del Pacífico y del Titicaca para febrero de 2015. Los caudales mensuales se presentan en cada tramo de río para cada subcuenca, en celdas de aproximadamente 450m x 450m de resolución espacial. Esta resolución está sujeta a la resolución del DEM empleado en la delimitación de subcuencas y en la acumulación del flujo (rastreo de caudales). Cada tramo de río es representado en función a una escala de colores, cuyos intervalos corresponden a magnitudes de los caudales mensuales simulados.

De igual forma al caso anterior, se generaron caudales mensuales para toda la vertiente del Pacífico y del Titicaca, para el periodo 1981 – 2016. Estas salidas son almacenadas en como rasters y de forma tabulada como series de tiempo. Operativamente, se generan caudales mensuales con la finalidad de complementar el monitoreo de sequías hidrológicas. Asimismo, se considera la incorporación de estaciones hidrométricas de corta longitud de registro para el seguimiento de posibles errores sistemáticos en las salidas del modelo.

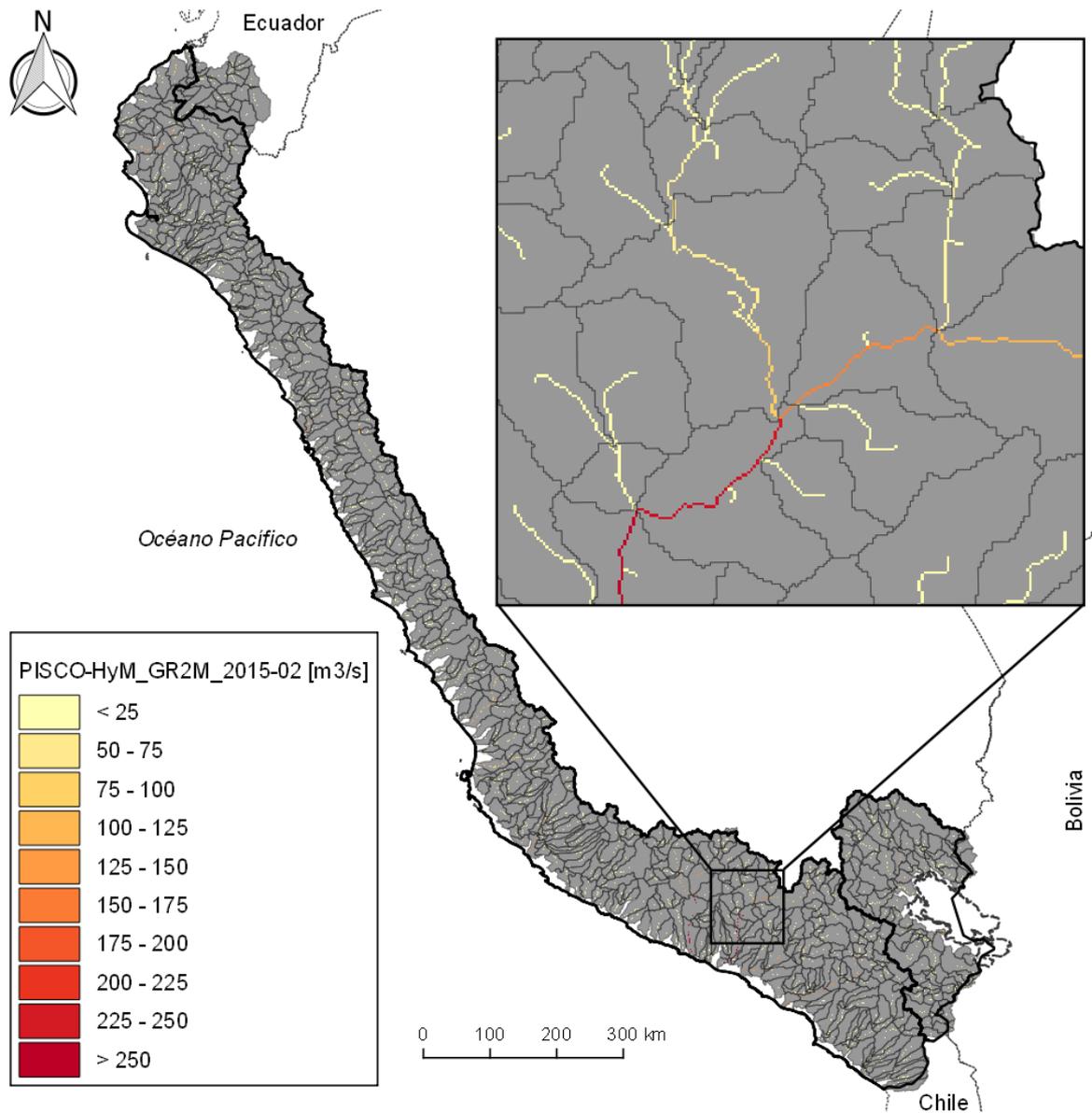


Figura 11. Simulación de caudales mensuales del producto PISCO-HyM_GR2M para febrero 2015 en subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se evaluó satisfactoriamente la generación de caudales mensuales en 781 subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca, aplicando un esquema de regionalización de parámetros del modelo conceptual GR2M, basado en la agrupación de subcuencas con similitud de sensibilidad en dos índices hidroclimáticos respecto los parámetros del modelo mensual. La delimitación de regiones de calibración y el enfoque de calibración independiente y validación cruzada permitieron obtener parámetros regionales del modelo GR2M, para generar caudales en subcuencas sin control hidrométrico. Asimismo, en este estudio se comprueba la capacidad predictiva de los datos de precipitación y evapotranspiración potencial del producto grillado PISCO, en la modelación de la respuesta hidrológica a escala mensual.

En ese contexto, este estudio presenta el primer producto regional de caudales mensuales para el periodo enero 1981 – diciembre 2016, denominado PISCO-HyM_GR2M. Este nuevo producto proporciona información relevante acerca de la oferta hídrica a nivel de subcuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca. Asimismo, en su versión operativa, PISCO-HyM_GR2M contribuirá al monitoreo de sequías hidrológicas a escala regional.

6. REFERENCIAS

- [1] ANA. Autoridad Nacional del Agua. (2013). Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursosohidricos2013.pdf>
- [2] Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F. & Felipe-Obando, O. 2019. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 00(00): 1–16.
- [3] Bai, P., Liu, X., Liang, K. & Liu, C. 2015. Comparison of performance of twelve monthly water balance models in different climatic catchments of China. *Journal of Hydrology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.015>.
- [4] Bardossy, A. 2007. Calibration of hydrological model parameters for ungauged catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(2): 703–710.
- [5] Beck, H., Van Dijk, A., Miralles, D., McVicar, T., Schellekens, J. & Adrian, B. 2010. Global-scale regionalization of hydrologic model parameters. *Water Resources Research*, (52): 3599–3622.
- [6] Beven, K. 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1): 41–51.
- [7] Bock, Andrew R., Hay, L.E., McCabe, G.J., Markstrom, S.L. & Atkinson, R.D. 2016. Parameter regionalization of a monthly water balance model for the conterminous United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20: 2861–2876.
- [8] Bock, Andrew R., Hay, L.E., McCabe, G.J., Markstrom, S.L. & Atkinson, R.D. 2016. Parameter regionalization of a monthly water balance model for the conterminous United States. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(7): 2861–2876.
- [9] Clark, M.P., Nijssen, B., Lundquist, J.D., Kavetski, D., Rupp, D.E., Woods, R.A., Freer, J.E., Gutmann, E.D., Wood, A.W., Gochis, D.J., Rasmussen, R.M., Tarboton, D.G., Mahat, V., Flerchinger, G.N. & Marks, D.G. 2015. A unified approach for process-based hydrologic modeling: 2. Model implementation and case studies. *Water Resources Research*, 51(4): 2515–2542.
- [10] Ding, J., Wallner, M., Müller, H. & Haberlandt, U. 2016. Estimation of instantaneous peak flows from maximum mean daily flows using the HBV hydrological model. *Hydrological Processes*, 30(9): 1431–1448.
- [11] Duan, Q.Y., Gupta, V.K. & Sorooshian, S. 1993. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 76(3): 501–521.
- [12] Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K.K. & Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2): 80–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- [13] Hosking, J.R.M. 1990. L-Moments: Analysis and Estimation of Distributions Using Linear Combinations of Order Statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 52(1): 105–124.
- [14] Huard, D. & Mailhot, A. 2008. Calibration of hydrological model GR2M using Bayesian uncertainty analysis. *Water Resources Research*, 44(2): 1–19.
- [15] Kinar, N.J. & Pomeroy, J.W. 2015. Measurement of the physical properties of the snowpack. *Reviews of Geophysics*, 53: 1–64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.04.009> <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.013> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000937> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000925> <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- [16] Klemeš, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 13–24.

- [17] Knoben, W.J.M., Freer, J.E. & Woods, R.A. 2019. Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (July): 1–7. <https://www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/hess-2019-327/>.
- [18] Krause, P., Boyle, D.P. & Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89–97.
- [19] Lavado, W., Labat, D., Guyot, J.-L., Ronchail, J. & Ordoñez, J.J. 2009. TRMM rainfall data estimation over the Peruvian Amazon- Andes basin and its assimilation into a monthly water balance model. , (September).
- [20] Liu, Y. & Gupta, H. V. 2007. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. *Water Resources Research*, 43(7): 1–18.
- [21] Louvet, S., Paturel, J.E., Mahé, G., Rouché, N. & Koité, M. 2015. Comparison of the spatiotemporal variability of rainfall from four different interpolation methods and impact on the result of GR2M hydrological modeling — case of Bani River in Mali , West Africa.
- [22] Lü, H., Crow, W.T., Zhu, Y., Ouyang, F. & Su, J. 2016. Improving streamflow prediction using remotely-sensed soil moisture and snow depth. *Remote Sensing*, 8(6).
- [23] Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J.C.J., Lang, H., Parmet, B.W.A.H., Schulla, J. & Wilke, K. 2001. Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin. *Climate Change*, 49: 105–128.
- [24] Montanari, A. 2012. Catchment scale controls the temporal connection of transpiration and diel fluctuations in streamflow. *Hydrological Processes*, 26(November 2006): 1–16.
- [25] Moradkhani, H., Hsu, K.L., Gupta, H. & Sorooshian, S. 2005. Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41(5): 1–17.
- [26] Mouelhi, S., Michel, C., Perrin, C. & Andréassian, V. 2006. Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology*, 318(1–4): 200–214.
- [27] Nash, J.E. & Sutcliffe, J. V. 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I: A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10: 282–290.
- [28] Okkan, U. & Fistikoglu, O. 2013. Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M.
- [29] Okkan, U. & Fistikoglu, O. 2014. Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1): 343–361.
- [30] Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F. & Loumagne, C. 2005. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1–4): 290–306.
- [31] Pagano, T., Hapuarachchi, P. & Wang, Q.J. 2009. Development and Testing of a Multi- Model Rainfall-Runoff Streamflow Forecasting Application. *CSIRO: Water for a Healthy Country National Research Flagship*. https://www.google.com.au/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FThomas_Pagano%2Fpublication%2F255738174_Development_and_testing_of_a_multi-model_rainfall-runoff_streamflow_f.
- [32] Patil, S.D. & Stieglitz, M. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology*, 525: 409–417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.003>.
- [33] Paturel, J. & Servat, E. 2003. Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *Journal of Hydrology*, 278: 213–230.
- [34] Paturel, J.E., Servat, E. & Vassiliadis, A. 1995. Sensitivity of conceptual rainfall-runoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 168: 111–125.

- [35] Pechlivanidis, I.G. & Arheimer, B. 2015. Large-scale hydrological modelling by using modified PUB recommendations: The India-HYPE case. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(11): 4559–4579.
- [36] Pérez-Sánchez, J., Senent-Aparicio, J., Segura-Méndez, F., Pulido-Velazquez, D. & Srinivasan, R. 2019. Evaluating hydrological models for deriving water resources in peninsular Spain. *Sustainability (Switzerland)*, 11(10): 1–36.
- [37] Perrin, C., Michel, C. & Andre, V. 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *Journal of Hydrology*, 242: 275–301.
- [38] Pumo, D., Viola, F. & Noto, L.V. 2016. Generation of natural runoff monthly series at ungauged sites using a regional regressive model. *Water (Switzerland)*, 8(5): 1–24.
- [39] Rau, P., Lavado, W., Bourrel, L., Labat, D., Ruelland, D., Dewitte, B. & Felipe, O. 2019. Assessing multidecadal runoff (1970 – 2010) using regional hydrological modelling under data and water scarcity conditions in Peruvian Pacific catchments. *SI Hydrological Processes - Latin America*, (October 2018): 20–35.
- [40] Reusser, D.E., Buytaert, W. & Zehe, E. 2011. Temporal dynamics of model parameter sensitivity for computationally expensive models with the Fourier amplitude sensitivity test. *Water Resources Research*, 47.
- [41] Rwasoka, D.T., Madamombe, C.E., Gumindoga, W. & Kabobah, A.T. 2013. Calibration , validation , parameter indentifiability and uncertainty analysis of a 2 – parameter parsimonious monthly rainfall-runoff model in two catchments in Zimbabwe. *JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF THE EAR*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.015>.
- [42] Sankarasubramanian, A. & Vogel, R.M. 2003. Hydroclimatology of the continental United States. *Geophysical Research Letters*, 30(7): 1–4.
- [43] Tasker, G., Hosking, J.R.M. & Wallis, J.R. 1998. Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. *Journal of the American Statistical Association*, 93(443): 1233.
- [44] Todini, E. 2007. Hydrological catchment modelling: past, present and future. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(1): 468–482.
- [45] Turan, M.E. & Yurdusev, M.A. 2015. Fuzzy Conceptual Hydrological Model for Water Flow Prediction. *Water Resources Management*.
- [46] Vrugt, J.A., ter Braak, C.J.F., Clark, M.P., Hyman, J.M. & Robinson, B.A. 2008. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research*, 44(12): 1–15.
- [47] Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P. & Woods, R. 2007. Catchment Classification and Hydrologic Similarity. *Geography Compass*, 1(4): 901–931.
- [48] Wi, S., Yang, Y.C.E., Steinschneider, S., Khalil, A. & Brown, C.M. 2015. Calibration approaches for distributed hydrologic models in poorly gaged basins: Implication for streamflow projections under climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2): 857–876.
- [49] Xu, C.P. & Singh, V.P. 1998. A Review on Monthly Water Balance Models for Water Resources Investigations. *Water Resources Management*, 12(1): 31–50.
- [50] Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A. & Galbraith, H. 2005. WEAP21 - A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 2: Aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, 30(4): 501–512.
- [51] Zamoum, S. 2019. Monthly streamflow estimation in ungauged catchments of northern Algeria using regionalization of conceptual model parameters.
- [52] Zubieta, R., Laqui, W. & Lavado, W. 2018. Hydrological modeling using observed and satellite precipitation datasets for the llave River basin, 2011-2015 period, Puno, Peru. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 9(5): 85–101.

7. ANEXOS

a. Anexo A: Detalle de la distribución superficial de subcuencas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca

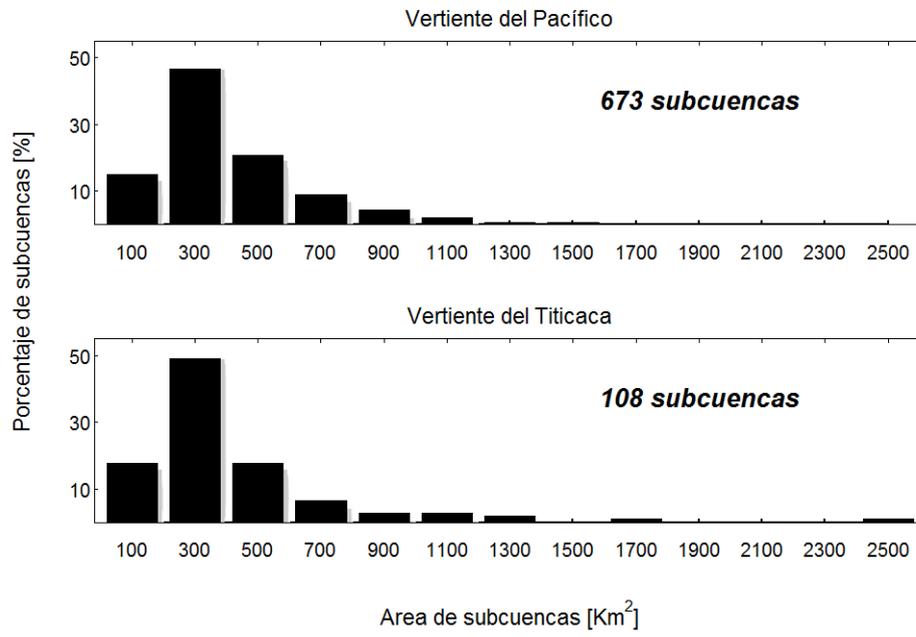


Figura 12. Distribución porcentual del área de las subcuencas ubicadas en las vertientes del Pacífico y del Titicaca

b. Anexo B: Total de estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Pacífico y del Titicaca

Tabla 5. Estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Pacífico

Estación	Cuenca	Longitud [°]	Latitud [°]
Pte. Tumbes	Tumbes	-80.47	-3.58
El Tigre	Tumbes	-80.47	-3.72
El Ciruelo	Chira	-80.15	-4.30
Pte. Internacional	Chira	-79.85	-4.38
Los Encuentros	Chira	-80.28	-4.43
Paraje Grande Quiroz	Chira	-79.90	-4.62
Pardo de Zela	Chira	-80.23	-4.67
Pte. Sullana	Chira	-80.71	-4.87
Tambo Grande	Piura	-80.32	-4.95
Chililique	Piura	-80.07	-5.03
San Pedro	Piura	-80.02	-5.08
Pte. Paltashaco	Piura	-79.90	-5.12
Pte. Sanchez Cerro	Piura	-80.62	-5.18
Teodulo Peña	Piura	-79.90	-5.18
Carrasquillo	Piura	-80.02	-5.22
Barrios	Piura	-79.70	-5.28
Malacasi	Piura	-79.88	-5.32
Puchaca	Motupe	-79.47	-6.37
Desaguadero	InterMedio-Huallaga	-79.70	-6.50
Racarumi	Chancay-Lambayeque	-79.32	-6.63
Carhuaquero	Chancay-Lambayeque	-79.33	-6.67
Batan	Zaña	-79.29	-6.80
Quirihuac	Moche	-78.87	-8.08
Huacapongo	Viru	-78.67	-8.38
Condorcerro	Santa	-78.25	-8.65
Quitaracsá	Santa	-77.85	-8.78
Colcas	Santa	-77.83	-8.92
Pte. Moro	Nepeña	-78.22	-9.15
San Jacinto	Nepeña	-78.25	-9.17
Querococha	Santa	-77.50	-9.67
Recreta	Santa	-77.33	-10.03
Malvados	Fortaleza	-77.63	-10.34
Laguna Surasaca	Huaura	-76.78	-10.52
Cahua	Pativilca	-77.22	-10.55
Alpas	Pativilca	-77.50	-10.62

Tabla 5. Estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Pacífico (*Continuación*)

Estación	Cuenca	Longitud [°]	Latitud [°]
Las Minas	Supe	-77.46	-10.92
Sayan	Huaura	-77.18	-11.12
Casa Blanca	Huaura	-77.22	-11.15
Santo Domingo	Chancay-Huaral	-77.05	-11.38
Pte. Huarabi	Chillon	-76.87	-11.67
Pte. Magdalena	Chillon	-76.84	-11.69
Rio Blanco	Rimac	-76.26	-11.73
Chosica	Rimac	-76.69	-11.93
Chacrasana	Rimac	-76.75	-11.97
Manchay Bajo	Lurin	-76.85	-12.17
La Capilla	Mala	-76.50	-12.52
Toma Imperial	Cañete	-76.22	-13.00
Socsi	Cañete	-76.19	-13.03
Letrayoc	Pisco	-75.72	-13.65
Huamani	Ica	-75.58	-13.83
La Achirana	Ica	-75.68	-13.97
Oscollo	Camana	-71.07	-15.42
Pte. Carretera Colca	Camana	-71.45	-15.48
Pte. Colgante Sibayo	Camana	-71.46	-15.49
Sumbay	Quilca-Vitor-Chili	-71.12	-15.82
Huatiapa	Camana	-72.47	-15.99
Charcani	Quilca-Vitor-Chili	-71.62	-16.28
Pte. Ocoña	Ocoña	-73.12	-16.42
Tingo Grande	Quilca-Vitor-Chili	-71.57	-16.46
Pte. Carretera Camaná	Camana	-72.73	-16.60
Pte. Santa Rosa	Tambo	-71.69	-17.03
Ilabaya	Ilo-Moquehua	-70.83	-17.07
Ticapampa	Locumba	-70.03	-17.07
Chucarapi	Tambo	-71.70	-17.08
Vilacota	Mauri	-70.06	-17.12
Bocatoma Torata	Ilo-Moquehua	-70.91	-17.14
Chuapalca	Mauri	-69.63	-17.36
La Tranca	Sama	-70.48	-17.73
Aguas Calientes	Caplina	-70.12	-17.85
Piedras Blancas	Ushusuma	-70.15	-17.97

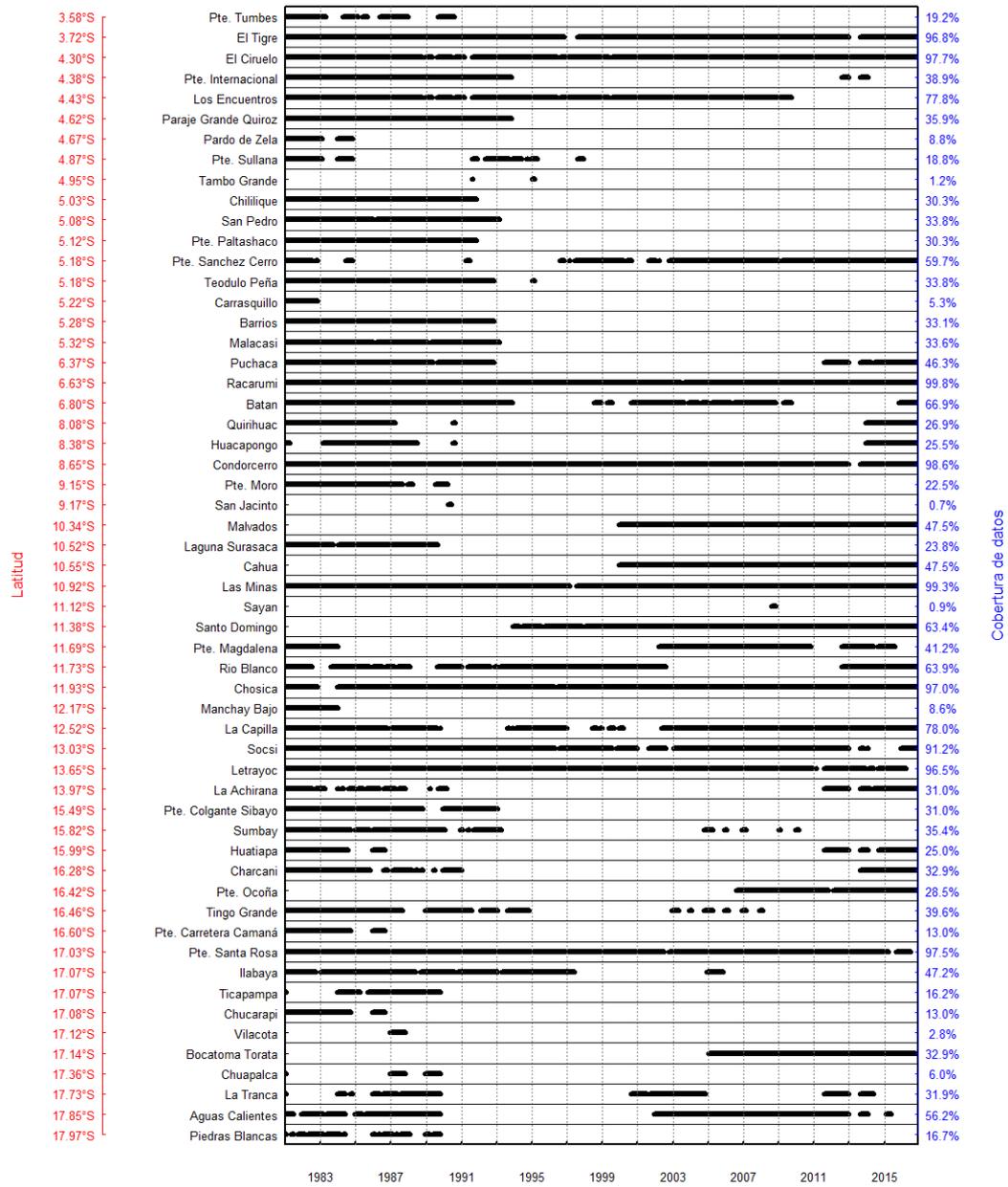


Figura 13. Longitud de registro de caudales mensuales (1981-2016) en estaciones hidrométricas ubicadas en la vertiente del Pacífico

Tabla 6. Estaciones hidrométricas con registro de caudales mensuales en cuencas de la vertiente del Titicaca

Estación	Cuenca	Longitud [°]	Latitud [°]
Ayaviri	Pucara	-70.59	-14.89
Azangaro	Azangaro	-70.19	-14.92
Pte. Carretera Huacane	Huacane	-69.79	-15.22
Pte. Carretera Ramis	Intercuenca Ramis	-69.87	-15.26
Pte. Maravillas	Coata	-70.13	-15.43
Pte. Mocayache-Lampa	Coata	-70.21	-15.44
Pte. Unocolla (Coata)	Coata	-70.19	-15.45
Pte. Isla Cabanillas	Coata	-70.22	-15.47
Rio Verde	N/A	-70.71	-15.56
Lagunillas	Coata	-70.70	-15.70
Saracocha	Coata	-70.62	-15.75
Pte. Carretera llave	llave	-69.63	-16.09
Pte. Zapatilla	Intercuenca 0157	-69.57	-16.14
Pte. Yorohoco-Callaccame	Callaccame	-69.32	-16.57
Llusta	llave	-69.72	-16.87
Chichillapi	llave	-69.75	-16.93

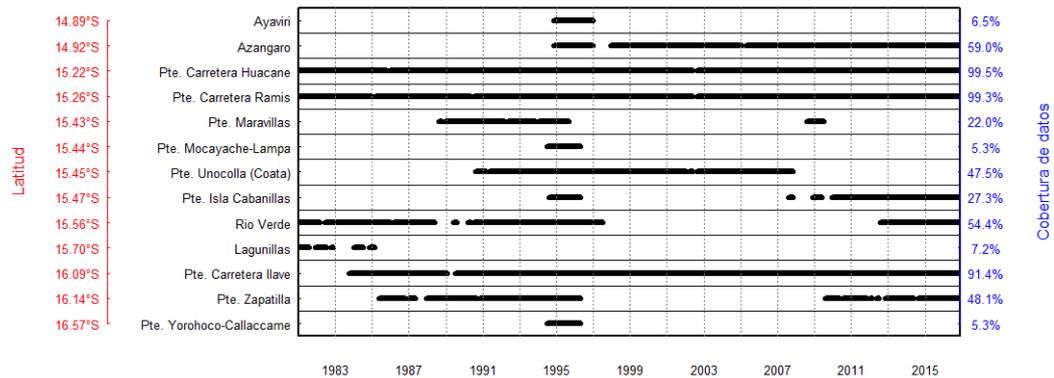


Figura 14. Longitud de registro de caudales mensuales (1981-2016) en estaciones hidrométricas ubicadas en la vertiente del Titicaca

c. Anexo C: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en el periodo de calibración individual

Tabla 7. Resultados de la calibración individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Pacífico

Cuenca	Región	Periodo Calibración	Parámetros				Criterios de desempeño					
			X1	X2	f _{precip}	f _{pet}	KGE	NSE	InNSE	R	RMSE	PBIAS
El Ciruelo	A	01/81-12/02	1.32	0.557	0.822	0.989	0.704	0.569	-1.171	0.799	88.188	-21.7
	C		1.706	0.759	0.815	1.016						
Batan	C	01/81-12/93	1.706	0.759	0.815	1.016	0.797	0.603	0.076	0.817	5.879	-6.4
Cahua	C	01/00-12/12	1.018	0.781	0.801	0.903	0.656	0.467	-2.904	0.849	17.223	-24.8
Los Encuentros	C	01/81-12/97	1.463	1.321	0.807	1.194	0.757	0.602	0.48	0.789	66.308	-8.5
Racarumi	C	01/81-12/02	1.067	0.705	0.802	0.866	0.715	0.439	0.404	0.757	23.932	-10.6
El Tigre	C	01/81-12/02	1.113	0.867	0.801	0.882	0.656	0.435	-0.276	0.782	145.476	-19.7
Condorcerro	C	01/81-12/02	1.706	0.759	0.815	1.016	0.637	0.519	-0.343	0.764	89.865	-22.5
	F		1.585	1.997	1.199	0.824						
Pte. Sanchez Cerro	C	01/97-12/10	1.706	0.759	0.815	1.016	0.529	0.393	0.45	0.797	79.155	33.6
	F		78.572	0.197	0.92	0.901						
Las Minas	F	01/81-12/02	1.09	1.144	0.804	0.959	0.537	0.342	0.381	0.607	3.935	-6.9
Malvados	F	01/00-12/10	1.082	0.701	0.815	1.039	0.763	0.519	0.574	0.763	6.017	-0.8
Santo Domingo	F	01/94-12/08	8.933	0.037	0.802	1.184	0.39	0.612	-4.236	0.816	10.699	-18.3
	L		1.163	0.619	1.134	0.942						
Pte. Ocoña	J	10/06-12/13	285.612	1.391	0.8	0.965	0.902	0.803	0.889	0.902	42.207	-0.3
	L		1.163	0.619	1.134	0.942						
	N		3.654	1.158	1.096	1.106						
Chosica	L	01/81-12/02	1793.319	1.596	1.172	0.948	0.614	0.238	0.39	0.619	16.434	6.3
La Capilla	L	01/02-12/11	1.001	0.707	0.938	1.012	0.767	0.542	0.56	0.771	16.941	-4.4
Letrayoc	L	01/81-12/02	1.163	0.619	1.134	0.942	0.618	0.497	0.383	0.709	30.827	-8.4
Socsi	L	01/81-12/98	1.081	1.171	0.995	0.947	0.785	0.587	0.755	0.788	43.252	-2.3
Pte. Santa Rosa	M	01/81-12/02	1.132	0.483	0.839	1.08	0.719	0.458	0.495	0.721	42.402	1.9
	N		3.654	1.158	1.096	1.106						

Tabla 8. Resultados de la calibración individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Titicaca

Cuenca	Región	Periodo Calibración	Parámetros				Criterios de desempeño					
			X1	X2	f_{precip}	f_{pet}	KGE	NSE	lnNSE	R	RMSE	PBIAS
Huancané	M	01/81-12/02	1.799	0.518	0.811	0.921	0.48	0.313	-0.002	0.586	29.431	-14.3
Ilave	M	01/84-12/03	1.132	0.483	0.839	1.08	0.582	0.398	-1.026	0.645	48.671	-3.3
Ramis	M	01/81-12/02	2.552	0.433	0.831	1.177	0.778	0.69	-0.273	0.833	49.261	-7
Coata	M	12/90-12/01	1.866	0.598	0.804	0.915	0.625	0.238	-0.494	0.625	41.253	-0.8

d. Anexo D: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en el periodo de validación individual

Tabla 9. Resultados de la validación individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Pacífico

Cuenca	Región	Periodo Validación	Parámetros				Criterios de desempeño					
			X1	X2	f _{precip}	f _{pet}	KGE	NSE	lnNSE	R	RMSE	PBIAS
El Ciruelo	A	01/03-12/16	1.32	0.557	0.822	0.989	0.587	0.531	-1.919	0.789	78.135	-32.1
	C		1.706	0.759	0.815	1.016						
Batan	C	01/94-12/09	1.706	0.759	0.815	1.016	0.454	0.129	-0.924	0.796	6.151	-11.4
Cahua	C	01/13-12/16	1.018	0.781	0.801	0.903	0.608	0.338	-2.927	0.787	20.639	-32.7
Los Encuentros	C	01/98-12/09	1.463	1.321	0.807	1.194	0.613	0.699	0.312	0.881	85.937	-26.9
Racarumi	C	01/03-12/16	1.067	0.705	0.802	0.866	0.67	0.432	0.483	0.717	26.11	-16.11
El Tigre	C	01/03-12/16	1.113	0.867	0.801	0.882	0.642	0.456	-0.222	0.751	93.967	-25.7
Condorcerro	C	01/03-12/16	1.706	0.759	0.815	1.016	0.688	0.558	-0.728	0.824	68.403	-24.9
	F		1.585	1.997	1.199	0.824						
Pte. Sanchez Cerro	C	01/11-12/16	1.706	0.759	0.815	1.016	0.369	0.037	0.257	0.646	71.512	47.2
	F		78.572	0.197	0.92	0.901						
Las Minas	F	01/02-12/16	1.09	1.144	0.804	0.959	0.334	0.429	-0.059	0.738	4.449	-27.1
Malvados	F	01/11-12/16	1.082	0.701	0.815	1.039	0.718	0.44	0.791	0.718	5.6	0.9
Santo Domingo	F	01/09-12/16	8.933	0.037	0.802	1.184	0.67	0.428	-6.136	0.766	10.699	-18.3
	L		1.163	0.619	1.134	0.942						
	N		3.654	1.158	1.096	1.106						

Tabla 7. Resultados de la validación individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Pacífico (*Continuación*)

Cuenca	Región	Periodo Validación	Parámetros				Criterios de desempeño					
			X1	X2	f _{precip}	f _{pet}	KGE	NSE	InNSE	R	RMSE	PBIAS
Pte. Ocoña	J	01/14-12/16	285.612	1.391	0.8	0.965	0.399	0.377	0.834	0.923	49.853	19.7
	L		1.163	0.619	1.134	0.942						
	N		3.654	1.158	1.096	1.106						
Chosica	L	01/03-12/16	1793.319	1.596	1.172	0.948	0.562	0.007	0.043	0.603	15.222	13.3
La Capilla	L	01/12-12/16	1.001	0.707	0.938	1.012	0.624	0.273	0.28	0.731	15.448	12.1
Letrayoc	L	01/03-12/16	1.163	0.619	1.134	0.942	0.676	0.327	-0.303	0.682	25.366	3.3
Socsi	L	01/99-12/12	1.081	1.171	0.995	0.947	0.383	0.087	0.716	0.819	42.722	27.4
Pte. Santa Rosa	M	01/03-12/16	1.132	0.483	0.839	1.08	0.054	-0.821	0.244	0.676	42.42	50.4
	N		3.654	1.158	1.096	1.106						

Tabla 10. Resultados de la validación individual del modelo GR2M en cuencas de las regiones de validación en la vertiente del Titicaca

Cuenca	Región	Periodo	Parámetros				Criterios de desempeño					
			X1	X2	f _{precip}	f _{pet}	KGE	NSE	InNSE	R	RMSE	PBIAS
Huancané	M	01/03-12/16	1.799	0.518	0.811	0.921	0.637	0.471	-0.773	0.716	21.789	-17.1
Ilave	M	01/04-12/16	1.132	0.483	0.839	1.08	0.441	-0.091	-0.741	0.565	45.067	30.4
Ramis	M	01/03-12/16	2.552	0.433	0.831	1.177	0.794	0.59	-0.994	0.794	49.803	1.9
Coata	M	01/02-12/07	1.866	0.598	0.804	0.915	0.44	0.093	0.297	0.706	35.599	39.4

e. Anexo E: Métricas de desempeño del modelo GR2M obtenidas en la validación cruzada

Tabla 11. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “C”

Parámetros					Cuenca	Criterios de desempeño					
X1	X2	f _{precip}	f _{pet}	KGE		NSE	lnNSE	R	RMSE	PBIAS	
Batan	1.706	0.759	0.815	1.016	Batan	0.702	0.463	-0.272	0.79	6.041	-11.1
					Cahua	0.625	0.389	-3.525	0.808	20.553	-31.9
					Los Encuentros	0.114	0.1991	-3.253	0.839	119.002	-65
					Racarumi	0.696	0.373	0.529	0.739	26.2	-1.3
					El Tigre	0.588	0.485	-1.227	0.772	122.239	-34.4
Cahua	1.018	0.781	0.801	0.903	Batan	0.701	0.452	-0.024	0.791	6.104	-6.8
					Cahua	0.648	0.418	-2.743	0.81	20.058	-28.7
					Los Encuentros	0.129	0.218	-2.79	0.839	117.523	-63.7
					Racarumi	0.685	0.357	0.575	0.74	26.541	2.4
					El Tigre	0.604	0.487	-0.904	0.774	122.046	-32.4
Los Encuentros	1.463	1.321	0.807	1.194	Batan	-0.823	-2.892	-0.294	0.793	16.265	129.4
					Cahua	-0.389	-2.247	0.259	0.824	47.377	75.4
					Los Encuentros	0.683	0.675	0.432	0.839	75.811	-18.6
					Racarumi	-0.779	-3.417	-0.226	0.749	69.553	129.8
					El Tigre	0.045	-0.555	0.722	0.786	212.454	43.6
Racarumi	1.067	0.705	0.802	0.866	Batan	0.689	0.513	-0.632	0.79	5.751	-22.2
					Cahua	0.546	0.303	-4.578	0.807	21.955	-40.5
					Los Encuentros	0.056	0.118	-4.048	0.839	124.858	-69
					Racarumi	0.705	0.436	0.44	0.738	24.849	-12.9
					El Tigre	0.516	0.488	-1.757	0.771	121.906	-41.5
El Tigre	1.113	0.867	0.801	0.882	Batan	0.558	0.28	0.329	0.792	6.997	11.7
					Cahua	0.659	0.431	-1.385	0.813	19.829	-14.6
					Los Encuentros	0.214	0.323	-1.764	0.839	109.35	-57.4
					Racarumi	0.529	0.15	0.601	0.743	30.505	20.6
					El Tigre	0.658	0.446	-0.25	0.776	126.855	-21.8

Tabla 12. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “F”

Parámetros					Cuenca	Criterios de desempeño					
X1	X2	f_{precip}	f_{pet}	KGE		NSE	lnNSE	R	RMSE	PBIAS	
Las Minas	1.09	1.144	0.804	0.959	Las Minas	0.45	0.389	0.123	0.633	4.156	-16.2
					Malvados	-0.967	-2.529	-0.145	0.754	15.153	161.3
					Condorcero	0.601	0.508	-1.322	0.78	87.077	-28.2
					Pte. Sanchez Cerro	-0.112	-0.436	0.038	0.746	110.507	86.5
					Santo Domingo	0.75	0.51	-0.504	0.791	11.366	-5
Malvados	1.082	0.701	0.815	1.039	Las Minas	-0.152	-0.035	Inf	0.59	5.408	-79.1
					Malvados	0.723	0.425	0.654	0.729	6.114	2.2
					Condorcero	0.59	0.502	-1.539	0.78	87.61	-29.3
					Pte. Sanchez Cerro	0.369	0.158	0.37	0.748	84.61	46.7
					Santo Domingo	0.735	0.543	-4.032	0.796	10.979	-16.2
Condorcero	1.585	1.997	1.199	0.824	Las Minas	-3.231	-8.666	-1.551	0.703	16.525	411
					Malvados	-0.855	-56.663	-2.198	0.786	62.494	829.1
					Condorcero	0.65	0.535	-0.433	0.778	84.683	-22.9
					Pte. Sanchez Cerro	-2.461	-6.016	-0.978	0.744	244.266	288
					Santo Domingo	0.198	-0.237	0.344	0.785	18.052	62.6
Pte. Sanchez Cerro	78.572	0.197	0.92	0.901	Las Minas	-0.615	-0.443	Inf	0.205	6.385	-99.8
					Malvados	-0.464	-0.412	-15.419	0.465	9.778	-98
					Condorcero	0.583	0.5	-1.556	0.781	87.767	-29.7
					Pte. Sanchez Cerro	0.67	0.46	0.398	0.745	67.783	20.6
					Santo Domingo	0.721	0.557	-4.52	0.799	10.804	-19.3
Santo Domingo	8.933	0.037	0.802	1.184	Las Minas	-0.557	-0.448	Inf	0.346	6.395	-100
					Malvados	-0.467	-0.47	-42.214	0.596	9.979	-99.8
					Condorcero	0.583	0.5	-1.556	0.781	87.765	-29.7
					Pte. Sanchez Cerro	0.679	0.468	0.398	0.741	67.262	18.9
					Santo Domingo	0.721	0.557	-4.52	0.799	10.804	-19.3

Tabla 13. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración "L"

Parámetros					Cuenca	Criterios de desempeño					
X1	X2	f_{precip}	f_{pet}	KGE		NSE	lnNSE	R	RMSE	PBIAS	
Chosica	1793.92	1.596	1.172	0.948	Chosica	0.599	0.163	0.289	0.612	15.93	9.3
					La Capilla	-0.468	-0.865	-1.075	0.534	31.895	139.2
					Letrayoc	-0.199	-0.348	-0.901	0.442	45.357	103
					Socsi	0.221	0.254	0.152	0.525	49.697	-4.1
La Capilla	1.001	0.707	0.938	1.012	Chosica	0.435	-0.202	-17.451	0.789	19.098	-38.1
					La Capilla	0.722	0.444	0.546	0.728	17.411	5.6
					Letrayoc	0.635	0.458	0.35	0.69	28.749	-5.1
					Socsi	0.226	0.255	-2.596	0.76	50.316	-57.6
Letrayoc	1.163	0.619	1.134	0.942	Chosica	0.406	-0.252	-22.424	0.789	19.487	-37.9
					La Capilla	0.715	0.423	0.332	0.73	17.742	7
					Letrayoc	0.654	0.456	0.153	0.693	28.824	-4.1
					Socsi	0.24	0.267	-3.661	0.763	49.908	-57.4
Socsi	1.081	1.171	0.995	0.947	Chosica	-0.896	-4.411	-2.341	0.792	40.515	53.1
					La Capilla	0.226	0.253	-2.769	0.759	49.747	-57.7
					Letrayoc	0.239	0.265	-3.877	0.762	49.347	-57.5
					Socsi	0.711	0.449	0.725	0.774	42.698	10

Tabla 14. Resultados de la validación cruzada de los parámetros del modelo GR2M en cuencas de la región de calibración “M”

Parámetros					Cuenca	Criterios de desempeño					
X1	X2	f_{precip}	f_{pet}	KGE		NSE	InNSE	R	RMSE	PBIAS	
Huancané	1.799	0.518	0.811	0.921	Huancané	0.542	0.369	-0.278	0.636	26.337	-15.5
					Ilave	0.608	0.296	-0.613	0.635	48.51	13.7
					Ramis	0.612	0.475	0.103	0.817	61.053	29.1
					Coata	0.605	0.324	-0.567	0.627	34.95	-6.5
Ilave	1.132	0.483	0.839	1.08	Huancané	0.498	0.364	-0.362	0.635	26.441	-20.8
					Ilave	0.616	0.331	-0.756	0.636	47.257	6.9
					Ramis	0.697	0.546	0.045	0.816	56.776	21.2
					Coata	0.574	0.337	-0.722	0.625	34.604	-12.1
Ramis	2.552	0.433	0.831	1.177	Huancané	0.336	0.301	-1.097	0.633	27.737	-37.7
					Ilave	0.529	0.381	-1.726	0.634	45.462	-15
					Ramis	0.795	0.655	-0.532	0.816	49.487	-3.6
					Coata	0.428	0.33	Inf	0.621	34.794	-29.7
Coata	1.866	0.598	0.804	0.915	Huancané	0.625	0.305	0.057	0.637	27.648	7.7
					Ilave	0.409	0.057	-0.155	0.636	56.113	43.5
					Ramis	0.205	-0.015	0.289	0.818	84.896	63
					Coata	0.583	0.174	-0.125	0.631	38.626	17.6

f. Anexo F: Detalle del comparativo entre los caudales observados y simulados por el modelo regional

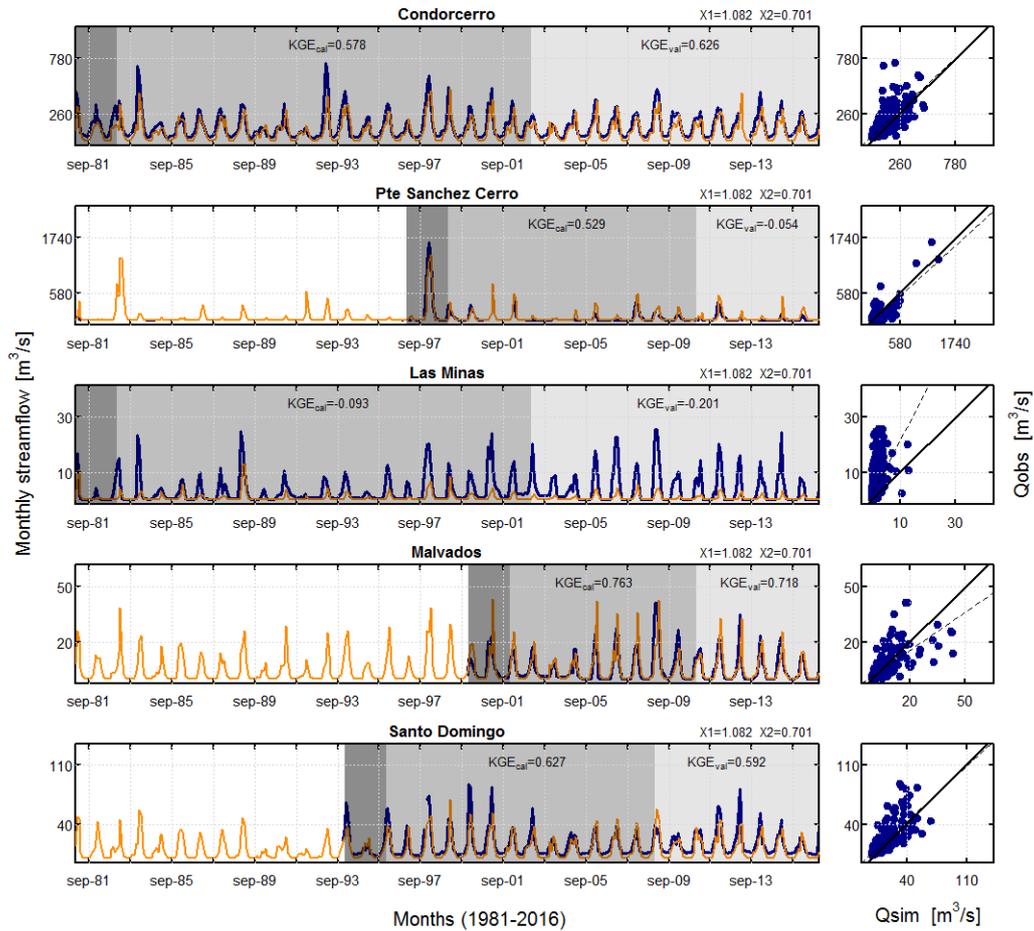


Figura 15. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración "F", empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M

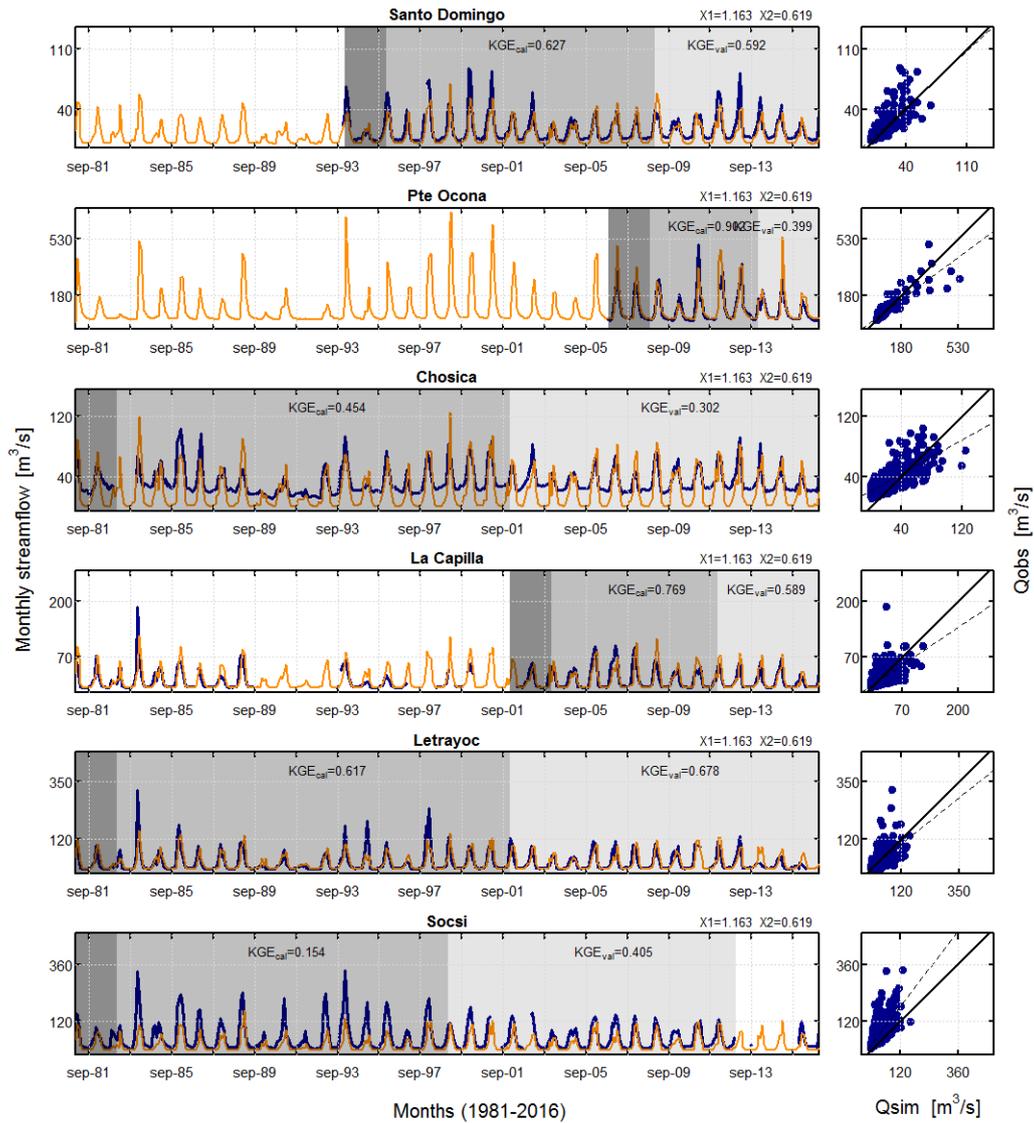


Figura 16. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración "L", empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M

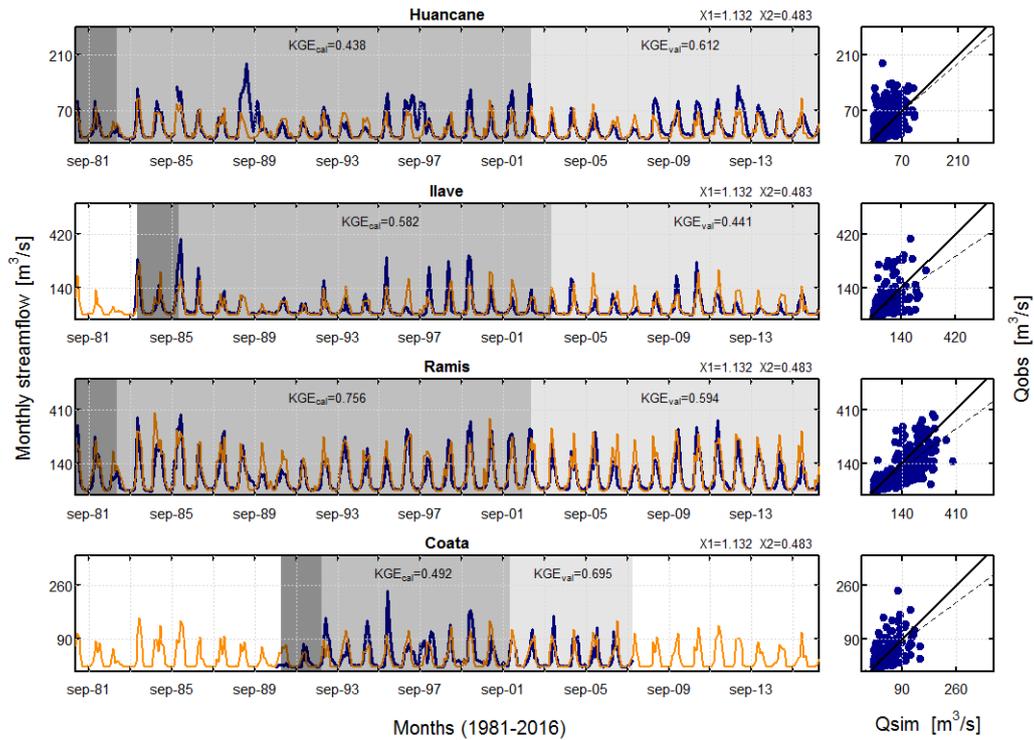


Figura 17. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “M”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M

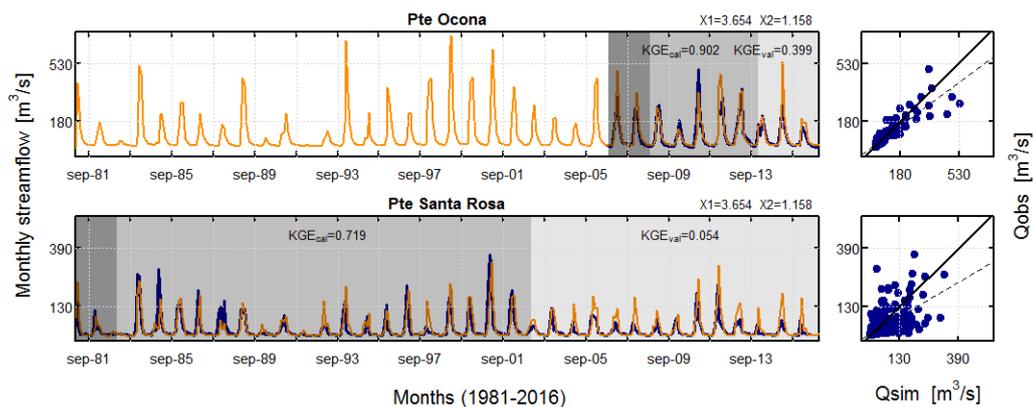


Figura 18. Contraste entre los caudales mensuales simulados (naranja) y observados (azul) en cuencas de la región de calibración “N”, empleando los parámetros regionalizados obtenidos para el modelo GR2M

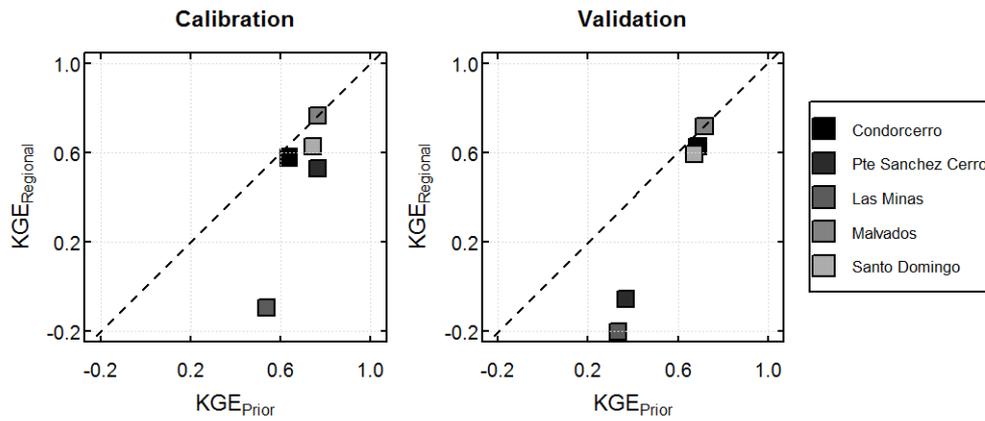


Figura 19. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “F”

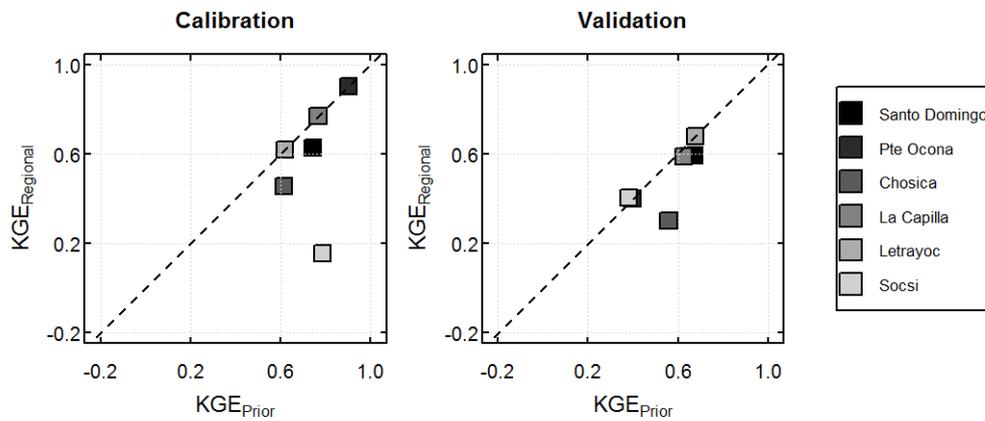


Figura 20. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “L”

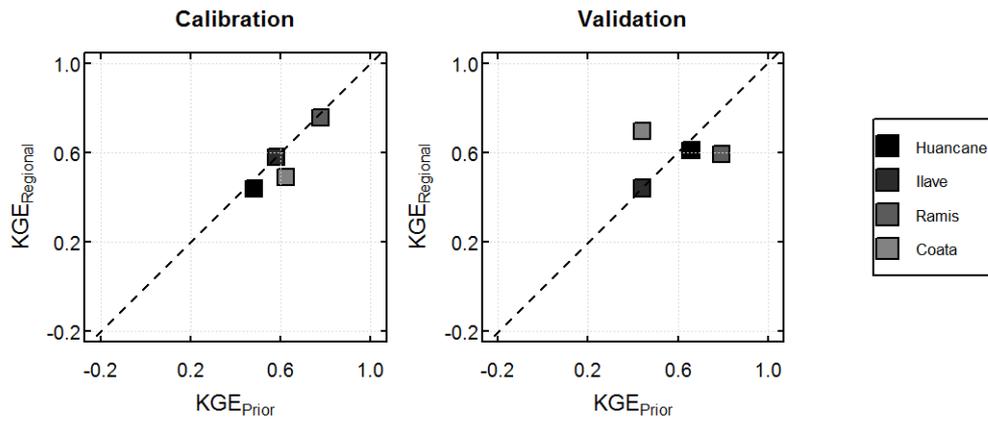


Figura 21. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “M”

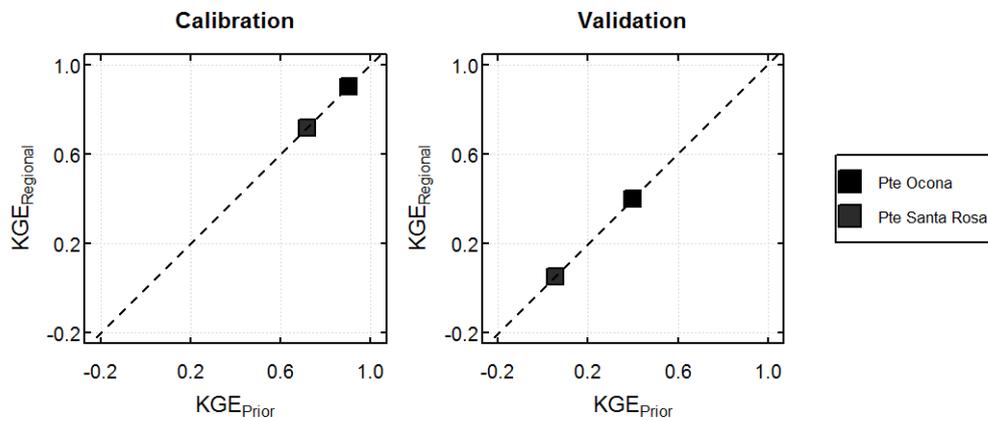


Figura 22. Variación del KGE en la evaluación de los parámetros regionales ($KGE_{Regional}$), respecto a los obtenidos en la calibración y validación individual (KGE_{Prior}), para las cuencas de la región de calibración “N”

g. Anexo G: Código en R para la ejecución del modelo regional GR2M

```

# Este script ejecuta el modelo GR2M para 781 subcuencas de la vertiente del Pacífico y Titicaca
# mediante el paquete GR2MSemiDistr (https://github.com/hllauca/GR2MSemiDistr). Además, acumula
# automáticamente los caudales de cada subcuenca mediante algoritmo Weighted Flow Accumulation.
# Los archivos de entrada (shp, dem, Qobs) deben guardarse en una carpeta llamada "Inputs"
# Requiere instalar TauDEM previamente
# Autor: Harold LLauca
rm(list=ls())
cat('\f')

# Instalar paquete
# install.packages("devtools")
# devtools::install_github("hllauca/GR2MSemiDistr", force=TRUE)

# Cargar librería
require(GR2MSemiDistr)

# Variables de entrada
Location <- 'D:/GR2M_PERU/GR2M_SemiDistr_PT'
Database <- 'D:/GR2M_PERU/FORZANTES'
File.Shape <- 'Subcuencas_PT.shp'
File.Raster <- 'Dem_PT.tif'
File.Precip <- 'PISCOO_precip_monthly_until_feb19.nc'
File.PotEvap <- 'PISCOmpe_oudin_v1.1.nc'
# File.Qobs <- 'Qobs.txt'

# Periodo de simulación
# WarmUp.Ini <- '01/1981'
RunModel.Ini <- '01/1981'
RunModel.End <- '12/2016'

# Parámetros regionales (A, C, F, J, L, M, N)
Model.Param <- c(1.320, 1.706, 1.082, 285.612, 1.163, 1.132, 3.654, # X1
                0.557, 0.759, 0.701, 1.391, 0.619, 0.483, 1.158, # X2
                0.822, 0.815, 0.815, 0.800, 1.134, 0.839, 1.096, # fprecip
                0.989, 1.016, 1.039, 0.965, 0.942, 1.080, 1.106) # fpet

# Configuración de la optimización
# Optim.Eval <- 'KGE' # Criterio de desempeño (KGE,NSE,lnNSE,R,RMSE,PBIAS)
# Optim.Basin <- 1 # ID de la salida (ver tabla de atributos del shp)
# Optim.Remove <- FALSE # Eliminar caudales en la subcuenca de salida
# No.Region <- NULL # Excluir de la optimización una región determinada
# Model.ParMin <- c(1, 0.01, 0.8, 0.8) # Rango mínimo para X1, X2, fprecip y fpet
# Model.ParMax <- c(2000, 2, 1.2, 1.2) # Rango máximo para X1, X2, fprecip y fpet

#####
##### NO CAMBIAR #####
#####
# Cambiar directorio de trabajo
setwd(Location)

#####
# Forzantes del modelo (P, PET)
#####
Create_Forcing_Inputs(Shapefile=File.Shape,
                     Database=Database,
                     Precip=File.Precip,
                     PotEvap=File.PotEvap)

#####
# Optimización mono-objetivo con SCE
#####
Opt <- Optim_GR2MSemiDistr(Parameters=Model.Param,
                          Parameters.Min=Model.ParMin,
                          Parameters.Max=Model.ParMax,
                          Max.Functions=5000,
                          Optimization=Optim.Eval,
                          Location=Location,
                          Shapefile=File.Shape,
                          WarmIni=WarmUp.Ini,
                          RunIni=RunModel.Ini,
                          RunEnd=RunModel.End,
                          IdBasin=Optim.Basin,
                          Remove=Optim.Remove,
                          No.Optim=No.Region)

# Reemplazar parámetros optimizados
Model.Param <- Opt$Param

# #####
# # Ejecutar el modelo GR2M
# #####

```

```
Mod <- Run_GR2MSemiDistr(Parameters=Model.Param,
                        Location=Location,
                        Shapefile=File.Shape,
                        RunIni=RunModel.Ini,
                        RunEnd=RunModel.End,
                        Regional=TRUE)

#####
# Ruteo de las salidas de GR2M
#####
Rout <- Routing_GR2MSemiDistr(Location=Location,
                              Qmodel=Mod$Qsub,
                              Shapefile=File.Shape,
                              Dem=File.Raster,
                              RunIni=RunModel.Ini,
                              RunEnd=RunModel.End,
                              Save=TRUE)

# Fin!!!!
```

h. Anexo H: Manual del paquete ‘GR2MSemiDistr’ elaborado en R

Package ‘GR2MSemiDistr’

October 29, 2019

Type Package

Title A package for hydrological modelling with a semidistribute GR2M model version

Version 2.0.1

Author Harold Llauca <hllauca@senamhi.gob.pe>

Maintainer Harold Llauca <hllauca@senamhi.gob.pe>

Description This package run a semidistributed GR2M version applying a Weighted Flow Accumulation algorithm using TauDEM

License HLL-16

Encoding UTF-8

Depends R (>= 3.6),

Imports airGR, foreach, hydroGOF, ncdf4, raster, rgdal, rgeos, rtop, tictoc, ProgGUIinR

LazyData true

RoxygenNote 6.1.1

RemoteType github

RemoteHost api.github.com

RemoteRepo GR2MSemiDistr

RemoteUsername hllauca

RemoteRef master

RemoteSha 74bd4f1cbf91b7c5ce9a00b0ced1a9412075bc5a

GithubRepo GR2MSemiDistr

GithubUsername hllauca

GithubRef master

GithubSHA1 74bd4f1cbf91b7c5ce9a00b0ced1a9412075bc5a

NeedsCompilation no

R topics documented:

Create_Forcing_Inputs	2
Optim_GR2MSemiDistr	2
Routing_GR2MSemiDistr	3
Run_GR2MSemiDistr	4

Index	5
--------------	----------

Create_Forcing_Inputs *Create a text file with data inputs for the model*

Description

Create a text file with data inputs for the model

Usage

```
Create_Forcing_Inputs(Shapefile, Database, Precip, PotEvap, Qobs = NULL,  
Resolution = 0.01, DateIni = "1981/01/01", DateEnd = "2016/12/01")
```

Arguments

Shapefile	Subbasins shapefile.
Database	Directory where precipitation and evapotranspiration data (as netCDF) are located.
Precip	Precipitation filename.
PotEvap	Evapotranspiration filename.
Qobs	Observed streamflow filename (data in m3/s). NULL as default.
Resolution	Raster resolution to resample forcing data and extract areal mean values. 0.01 as default.
DateIni	Initial date (in 'yyyy/mm/dd' format) to subset data. '1981/01/01' as default
DateEnd	Final date (in 'yyyy/mm/dd' format) to subset data. '2016/12/01' as default

Value

Export a text file with forcing data inputs (Dates, Precip, Evap, Qobs).

Optim_GR2MSemiDistr *Optimization of GR2M model parameters with SCE-UA algorithm.*

Description

Optimization of GR2M model parameters with SCE-UA algorithm.

Usage

```
Optim_GR2MSemiDistr(Parameters, Parameters.Min, Parameters.Max,  
Max.Functions = 10000, Optimization = "NSE", Location, Shapefile,  
Input = "Inputs_Basins.txt", WarmIni, RunIni, RunEnd, IdBasin,  
Remove = FALSE, No.Optim = NULL, IniState = NULL)
```

Routing_GR2MSemiDistr

3

Arguments

Parameters	GR2M (X1 and X2) model parameters and a multiplying factor to adjust monthly P and PET values.
Parameters.Min	Minimum GR2M (X1, X2, fprecip and fpet) model parameters values.
Parameters.Max	Maximum GR2M (X1, X2, fprecip and fpet) model parameters values.
Max.Functions	Maximum number of functions used in the optimization loop. 10000 as default.
Optimization	Mono-objective evaluation criteria for GR2M (NSE, lnNSE, KGE, RMSE, R, PBIAS).
Location	Work directory where 'Inputs' folder is located.
Shapefile	Subbasins shapefile.
Input	Model forcing data in airGR format (DatesR,P,T,Qmm). 'Inputs_Basins.txt' as default.
WarmIni	Initial date (in 'mm/yyyy' format) of the warm-up period.
RunIni	Initial date (in 'mm/yyyy' format) of the model simulation period.
RunEnd	Final date (in 'mm/yyyy' format) of the model simulation period.
IdBasin	ID for the outlet subbasin (from shapefile attribute table).
Remove	Logical value to remove streamflows of the outlet subbasin (IdBasin). FALSE as default.
No.Optim	Calibration regions not to be optimized.
IniState	Initial GR2M states variables. NULL as default.

Value

Best GR2M model parameters.

Routing_GR2MSemiDistr *Routing simulated monthly streamflows.*

Description

Routing simulated monthly streamflows.

Usage

```
Routing_GR2MSemiDistr(Location, Qmodel, Shapefile, Dem, RunIni, RunEnd,
    Save = TRUE)
```

Arguments

Location	Work directory where 'Inputs' folder is located.
Qmodel	Simulated streamflow matrix (Dates, ID) from Run_GR2MSemiDistr
Shapefile	Subbasins shapefile.
Dem	Raster DEM.
RunIni	Initial date 'mm/yyyy' of the model simulation period.
RunEnd	Final date 'mm/yyyy' of the model simulation period.
Save	Logical value to save Streamflow Accumulation rasters. TRUE as default.

Value

Routed streamflows for each subbasin.

Run_GR2MSemiDistr	<i>Run GR2M model for each subbasins.</i>
-------------------	---

Description

Run GR2M model for each subbasins.

Usage

```
Run_GR2MSemiDistr(Parameters, Location, Shapefile,
  Input = "Inputs_Basins.txt", WarmIni = NULL, RunIni, RunEnd,
  IdBasin = NULL, Remove = FALSE, Plot = TRUE, IniState = NULL,
  Regional = FALSE)
```

Arguments

Parameters	GR2M model parameters (X1 and X2) and a multiplying factors for P and PET.
Location	Work directory where 'Inputs' folder is located.
Shapefile	Subbasins shapefile.
Input	Model forcing data in airGR format (DatesR,P,T,Qmm). 'Inputs_Basins.txt' as default.
WarmIni	Initial date (in 'mm/yyyy' format) of the warm-up period.
RunIni	Initial date (in 'mm/yyyy' format) of the model simulation period.
RunEnd	Final date (in 'mm/yyyy' format) of the model simulation period.
IdBasin	ID for the outlet subbasin (from shapefile attribute table).
Remove	Logical value to remove streamflows of the outlet subbasin (IdBasin). FALSE as default.
Plot	Logical value to plot observed and simulated streamflow timeseries. TRUE as default.
IniState	Initial GR2M states variables. NULL as default.
Regional	Logical value to simulate in a regional mode (more than one outlet).

Value

GR2M model outputs for each subbasin.