



Validación de lluvia utilizando TRMM en dos cuencas amazónicas peruanas y su aplicación en modelos mensuales de balance hídrico.

Validation of rainfall using the TRMM for two Peruvian Amazon basins and its inclusion in monthly water balance models

WALDO SVEN LAVADO CASIMIRO^{1,2}, DAVID LABAT², JEAN LOUP GUYOT³,
JOSYANE RONCHAIL⁴ & JUAN JULIO ORDOÑEZ¹

¹ Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, Casilla 11 1308, Lima 11, Perú.

wlavado@senamhi.gob.pe

² LMTG-Université de Toulouse-CNRS-IRD-OMP, 14 Avenue Edouard Belin, F-31400 Toulouse, France.

³ LMTG-Université de Toulouse-CNRS-IRD-OMP, IRD, CP 7091 Lago Sul, 71619-970 Brasília DF, Brazil

⁴ Université Paris 7 (IRD) and LOCEAN, Boite 100, 4 Place Jussieu, F-75252 Paris Cedex 05, France.

Resumen

El Perú presenta aproximadamente el 10% del total de la Cuenca Amazónica y se caracteriza por ser la región con menor distribución de estaciones de lluvia, sobre todo en la Selva baja. Nosotros comparamos el producto 3B43 del Tropical Rain Measuring Mission (TRMM) con estaciones climatológicas en dos subcuencas (Urubamba y Tambo) del río Ucayali. La distribución espacial del producto 3B43 es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~ 27.8 x 27.8 km) y los datos son a nivel mensual. El periodo de comparación entre in-situ estaciones de lluvia y 3B43 TRMM son de Enero de 1998 a Diciembre del 2007. Comparaciones entre in-situ estaciones de lluvias observados y 3B43 fue realizado utilizando coeficiente de correlación y error relativo. Una mejora de los datos de lluvia del TRMM es luego propuesto basado en in-situ datos de lluvia. Luego del análisis del producto 3B43, 3 sets de datos de lluvia fueron obtenidos (*in situ*, TRMM and TRMM mejorado) para ser usados como datos de entrada en el modelo mensual de balance hídrico GR2M para simular las descargas en los ríos Urubamba y Tambo. Estadísticos clásicos en las etapas de calibración y validación demuestran más exactitud usando solo TRMM en la cuenca del Urubamba y utilizando TRMM mejorado en la cuenca del río Tambo.

Palabras claves: Cuenca del Amazonas; TRMM; Andes; Perú; modelos mensuales de balance hídrico.

Abstract

Peru encompasses approximately 10% of the Amazon Basin and is characterized by the lowest density of rainfall stations, particularly in the low rain forest region. We compared the 3B43 product of the Tropical Rain Measuring Mission (TRMM) with meteorological stations in two sub-basins (Urubamba and Tambo) of the Ucayali River. The spatial resolution of the 3B43 corresponds to $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (~ 27.8 x 27.8 km), with temporal data resolution of one month. The period of comparison between in-situ rainfall stations and 3B43 TRMM extends from January 1998 to December 2007. Comparison between in-situ observed rainfall data and data from 3B43 was done using correlation coefficient and relative error. Accordingly, an improvement of the TRMM rainfall data based on in-situ rainfall data is proposed. After analysis of the 3B43 product, three sets of rainfall data were obtained (in situ, TRMM and improved TRMM) for the purpose of its use as input data in the monthly hydrological balance GR2M model for simulating discharges of the Urubamba and Tambo rivers. Classical statistics in the calibration and validation stage show more accuracy using only TRMM data for the Urubamba basin and using improved TRMM data for the Tambo river basin.

Keywords: Amazon Basin; TRMM; Andes, Peru, monthly water balance.

INTRODUCCION

La Cuenca del río Amazonas (AB) es la más grande del planeta con una área de drenaje de 6 200 000 km² y una descarga media anual de 209 000 m³ s⁻¹ (~5% del total del agua dulce del planeta) (Molinier *et al.*, 1996; Marengo, 2006). La AB es una de las regiones con los mayores valores de precipitación en el mundo y el mayor recurso de vapor de agua (Espinoza *et al.*, 2009). También, sobre la AB es posible tener eventos extremos como la dramática sequía observada en el 2005 (Marengo *et al.*, 2008; Zeng *et al.*, 2008).

Las estaciones de lluvia sobre la cuenca amazónica peruana (~10% del total de la cuenca amazónica) están pobremente distribuidos. Valores medios a escala de cuencas sobre estas regiones es mayormente sobreestimada (Guyot, pers. comm.). Lluvias del producto 3B43 TRMM han sido usados con Buenos resultados sobre distintas partes del mundo por ejemplo Sorooshian *et al.* (2000), Adeyewa & Nakamura (2003), Chiu *et al.* (2006), Dinku *et al.* (2007) and Islam & Uyeda (2007), quienes comparan o mejoran los valores *in situ* de lluvias observadas. Asimilación de productos del TRMM en modelos hidrológicos han sido ya documentados (ver por ejemplo Wilk *et al.*, 2006; Collischonn *et al.*, 2008; Su *et al.*, 2008).

En el Perú las medidas de las variables hidrometeorológicas están a cargo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI (www.senamhi.gob.pe). La mayoría de los datos hidrometeorológicos están relacionados a variables climáticas (lluvia, temperatura, etc.). Desde el 2001, el proyecto HYBAM (www.ore-hybam.org) ha realizado medidas de caudales en los más grandes ríos amazónicos peruanos (Yerren *et al.*, 2004, Lavado *et al.*, 2009c). Resultados de las mediciones de descargas junto a las observaciones meteorológicas del SENAMHI han hecho posible por primera vez tener una complete base de datos sobre la Cuenca amazónica peruana (PAB) la que ha sido utilizada en este estudio. Esta base de datos ha permitido por primera vez desarrollar por primera vez modelos hidrológicos a base mensual en la PAB (Lavado *et al.*, 2009a,d). Este artículo compara los datos de lluvia *in situ* con los datos de lluvia 3B43 TRMM.

Mejoramientos de los datos de lluvia originales del 3B43 TRMM son también realizados. La asimilación de estas tres bases de datos de lluvia en el modelo hidrológico a paso de tiempo mensual GR2M son evaluados.

DATOS Y METODOS

Dos subcuencas (Urubamba y Tambo) de la Cuenca del Ucayali fueron usados en este estudio (Fig. 1 y Tabla 1). Límites de las cuencas fueron graficados tomando como base las estaciones de descarga de Maldonadillo y Tambo. Subdivisiones de las cuencas fueron realizadas usando los modelos digitales de terreno (DEM) proveido por la US National Aeronautics and Space Administration (NASA) usando la Shuttle Radar Topography Mission, SRTM (www2.jpl.nasa.gov/srtm).

Estaciones climatológicas usadas en este estudio son parte de la red del SENAMHI: Para este estudio utilizamos 24 estaciones de lluvia y temperatura (Fig. 1). Datos de lluvia y temperatura (media, máxima y mínima) están a disponibles a escala mensual y comprenden el período de Enero de 1998 a Diciembre del 2007.

Lavado *et al.* (2009b), presenta una satisfactoria relación entre las ecuaciones para calcular evapotranspiración de FAO Penman-Monteith y Hargreaves-Samani (HE) (Hargreaves & Samani, 1985); calculando un modificado método de Hargreaves-Samani (HEm) usado para este estudio, dado por:

$$HE = \frac{00023(T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} Ra}{\lambda} \quad (1)$$

$$HEm = 0.6484HE + 1.146 \quad (2)$$

Donde HEm es evapotranspiración (mm d⁻¹); T es temperatura media (°C); T_{max} es temperatura máxima (°C); T_{min} es temperatura mínima (°C); y Ra es radiación extraterrestre (MJ m⁻² d⁻¹). La fórmula para calcular Ra es dada por Allen *et al.* (1998) y λ es calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹); λ en este estudio es asumido en 2.45 MJ Kg⁻¹ (Allen *et al.*, 1998).

Para trabajar con datos de suelos, se ha utilizado la metodología descrita por Dieulin *et al.* (2006), basada en los datos del Digital Soil Map of the World (FAO/UNESCO,

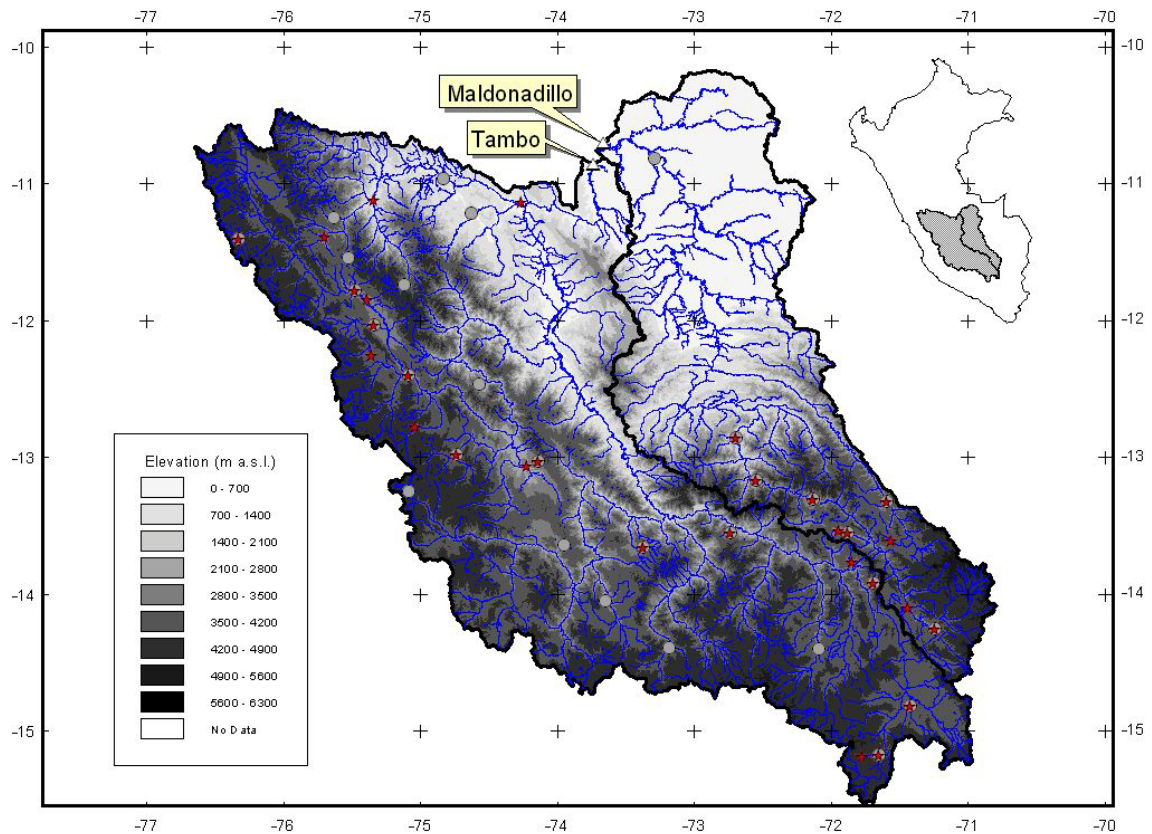


Fig. 1 Localización de la zona de estudio. Límites de las cuencas tomando como base las estaciones de descargas Tambo y Maldonadillo (o Urubamba). Círculos grises son las estaciones de lluvia, estrellas rojas son las estaciones de temperatura.

1981). Capacidad de retención de agua de los suelos es denominada WHC en este estudio. Distribución espacial del producto 3B43 TRMM es de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ($\sim 27.8 \times 27.8$ km) y es a escala mensual desde Enero de 1998. El periodo de comparación entre las estaciones de lluvia y los datos del 3B43 TRMM es de Enero de 1998 a Diciembre del 2007.

Mejoramiento de los datos de lluvia del TRMM fue realizado utilizando los datos in situ de las estaciones siguiendo estas ecuaciones (Collischonn, 2006):

$$P'(x_i, y_i) = P(x_i, y_i) - P_m(x_i, y_i) \quad (3)$$

Donde $P'(x_i, y_i)$ es la fluctuación de los datos TRMM con los datos de lluvia in situ; $P(x_i, y_i)$ es in situ datos de lluvia estimados localizados en la celda (x_i, y_i) ; $P_m(x_i, y_i)$ es la lluvia estimada del TRMM sobre la celda (x_i, y_i) . Conceptualmente, la metodología interpola los valores de P' , en lugar de los valores de lluvia in situ $P(x_i, y_i)$, porque se considera que la variabilidad de el primero es menor que del segundo (ver Collischonn,

2006).

Así tenemos:

$$\hat{P}'(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot P'(x_i, y_i) \quad (4)$$

Donde $\hat{P}'(x, y)$ es la fluctuación (o residual) interpolada en la celda (x, y) . Para cualquier (x, y) , TRMM es mejorado usando la siguiente ecuación:

$$\hat{P}(x, y) = P_m(x, y) + \hat{P}'(x, y) \quad (5)$$

En resumen, tres bases de datos son usados para nuestros análisis: in situ (Obs.R); datos de lluvia del TRMM (TRMM); y datos de lluvia mejorado (Obs.R TRMM).

La versión del modelo GR2M usado en este estudio es descrito Niel *et al.* (2003), y está basado en el modelo GR2M (Edijatno & Michel, 1989; Kabouya, 1990), y revisado por Makhoulf & Michel (1994), este es un modelo conceptual basado en dos reservorios. La concepción del modelo se basa en entradas semi-distribuidas, así tenemos que la lluvia y evapotranspiración son interpolados espacialmente en celdas de

Tabla 1 Estaciones de descarga, localización, área de drenaje (Dr. Ar.) y periodo de tiempo de descargas usados en este estudio. R: Lluvia; E: Evapotranspiration Potencial; F: Descarga.

Estación de descarga	Rio	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Altitud (m s.n.m.)	Dr. Ar. (km ²)	R (mm año-1)	E (mm año ⁻¹)	F (m ³ s ⁻¹)
Maldonadillo	Urubamba	10.74	73.71	287	60301	985	83	2289
Tambo	Tambo	10.85	73.71	290	135252	754	85	1824

0.25° × 0.25° (~ 27.8 × 27.8 km), basados en el método de Kriging. Las capacidades de retención de agua de los suelos calculados de el Digital Soil Map of the World (FAO/UNESCO, 1981) fueron interpolados sobre nuestra región de estudio obteniendo valores de celdas de 0.25° × 0.25°, siguiendo la metodología dada por Dieulin *et al.* (2006). En este estudio, la metodología de calibración utilizada es realizada utilizando una automática calibración usando el Shuffled Complex Evolution Metropolis algoritmo (SCEM-UA), que es una modificada versión del original SCE-UA optimización global algoritmo (Duan *et al.*, 1992) usando la estrategia de Metropolis Hastings (Metropolis *et al.*, 1953; Hastings, 1970), para una detallada descripción de este método ver Vrugt *et al.* (2003).

En modelos hidrológicos dos test son comúnmente utilizados: eficiencia de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) y error relativo en volumen expresado en porcentaje (%V), donde $Q_{o,j}$ son los valores observados; \bar{Q}_o es la media de los valores observados; $Q_{s,j}$ son los valores simulados por el modelo; y n es el numero de datos:

$$\text{Nash} = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \bar{Q}_o)^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{o,j} - \bar{Q}_o)^2} \right] \quad (6)$$

$$\%V = 100 \times \left[\frac{\sum_{j=1}^n Q_{s,j} - \sum_{j=1}^n Q_{o,j}}{\sum_{j=1}^n Q_{o,j}} \right] \quad (7)$$

RESULTADOS

En orden de comparar los datos TRMM (producto 3B43) y datos de lluvia in situ de 1998 a 2007, los estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson y error relativo ((TRMM – Obs.R)/Obs.R) entre ambas bases de datos fueron comparados (ver Fig. 2).

En general, similares valores de mapas interpolados son calculados usando ambos datos considerando los valores medios multianuales para el periodo 1998-2007 sobre las dos cuencas analizadas. Sin embargo, subestimaciones de lluvia son observados usando TRMM en las zonas bajas de la cuenca del Urubamba (región con menor distribución de estaciones pluviométricas, ver Fig. 1). Coeficientes de correlación son mayormente significativos ($\alpha = 0.05$) con mejores valores en la frontera de ambas subcuencas. También, subestimaciones usando TRMM es observado en los valores interpolados de errores relativos; valores negativos esta localizados sobre todo al oeste de ambas subcuencas. Figura 3 muestra las comparaciones de los valores mensuales medios areales de los tres bases de datos de lluvia utilizados sobre Maldonadillo y Tambo; en promedio, buenas estimaciones se presentan para Maldonadillo y subestimaciones son evidentes para Tambo. Sin embargo, mejorados datos de lluvia (Obs.R TRMM) presentan buenas relaciones con datos de lluvia in situ.

En la Tabla 2, observamos los valores de Nash y %V para las dos cuencas analizadas así como para las tres bases de datos de lluvia utilizadas. Figuras 4 y 5 describen las muestras de parámetros y los hidrogramas durante el proceso de calibración (Enero de 1998 a Diciembre de 2004) y validación (Enero 2005 a Diciembre del 2007).

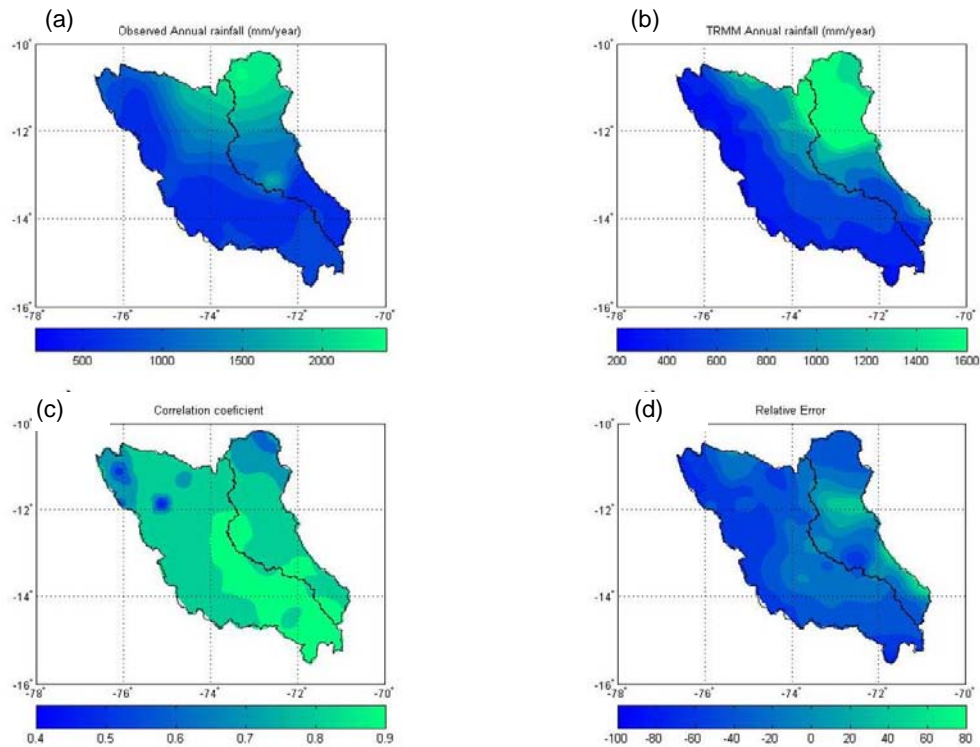


Fig. 2 (a) Interpolados valores medios multianuales (1998–2007) para datos de lluvia in situ; (b) como en (a) pero usando datos de lluvias del TRMM (1998–2007); (c) Coeficiente de correlación de entre datos de lluvia mensuales in situ y TRMM (Enero 1998–Diciembre 2007); y (d) como en (c) pero para el estadístico error relativo.

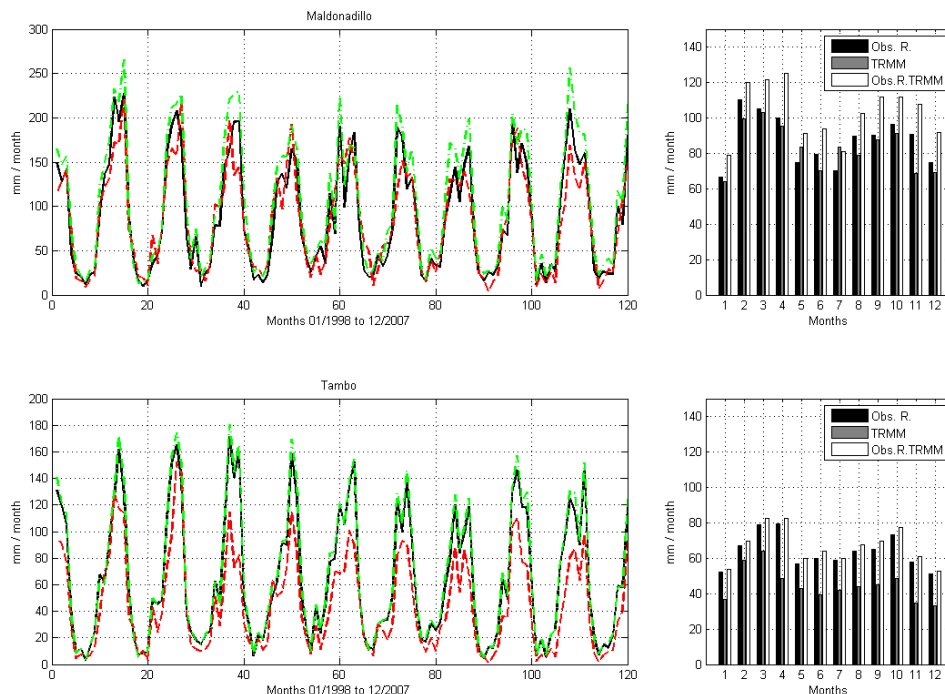


Fig. 3 Arriba: Comparación entre valores medios de lluvia interpolados sobre la cuenca de Maldonadillo. Abajo: Comparación entre valores medios de lluvia interpolados sobre la cuenca del Tambo. Línea negra es datos de lluvia in situ, línea rayada roja son datos de lluvia de TRMM y las líneas rayadas y con puntos verde son datos de lluvia mejoradas observadas TRMM.

Tabla 2 Comparación de Nash y el error relativo en volumen (%V) para las tres bases de datos de lluvia usados. Mejores valores están mostrados en oscuro. Cal.: calibración (Enero de 1998 a Diciembre de 2004) y Val.: validación (Enero 2005 a Diciembre del 2007).

Lluvia	Estadístico	Maldonadillo:		Tambo:	
		Cal.	Val.	Cal.	Val.
Obs.R	Nash	0.80	0.87	0.92	0.92
	%V	0.57	3.90	0.01	8.83
TRMM	Nash	0.84	0.81	0.57	0.40
	%V	2.22	7.38	12.23	32.35
Obs.R TRMM	Nash	0.92	0.92	0.86	0.82
	%V	0.66	8.04	1.35	5.31

En resumen, la introducción de los datos TRMM sin mejoramientos en el modelo GR2M en la Cuenca de Maldonadillo da buenos resultados simulando descargas mensuales (Nash igual a 0.84 y %V igual a 2.22 durante el período de calibración), pero valores no aceptables sobre la cuenca del Tambo (Nash igual a 0.57 y %V igual a 12.23 durante el período de calibración). Usando mejorados datos de lluvia (Obs. R TRMM) se obtienen mejores resultados en ambas subcuencas.

CONCLUSION

Datos del TRMM y su mejoramiento (Obs. R TRMM) se comportan como los mejores para describir los regímenes hidrológicos sobre regiones con pobre distribución de estaciones pluviométricas en la cuenca amazónica peruana pero in-situ estaciones de lluvia son indispensables para validar y mejorar los datos de lluvia. Futuros trabajos en esta región se centraran en mejorar los datos TRMM a nivel diario (producto 3B42) usando información observada así como modelos hidrológicos a pasa de tiempo diario.

REFERENCIAS

Adeyewa, Z. D. & Nakamura, K. (2003). Validation of TRMM radar lluvia data over major climatic regions in Africa. *J. Appl. Met.* **42**(2), 331–347.

Allen, G. R., Periera, L. S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrig. Drain. Paper 56*. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Collischonn, B. (2006). Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Collischonn, B., Collischonn, W. & Tucci, C. E. M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM lluvia estimates. *J. Hydrol.* **360**(1-4), 207–216.

Chiu, L. S., Liu, Z., Vongsaard, J., Morain, S., Budge, A., Neville, P. & Bales, C. (2006). Comparison of TRMM and water district rain rates over New Mexico. *Adv. Atmos. Sci.* **23**(1), 1–13.

Dieulin, C., Boyer, J. F., Ardoin-Bardin, S. & Dezetter, A. (2006). The contribution of GIS to hydrological modelling. In: *Climate Variability and Change—Hydrological Impacts* (Proc. Conf. La Habana, Cuba, November 2006), 68–74. IAHS Publ. 308, IAHS Press, Wallingford, UK.

Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, M., Connor, S. J. & Ropelewski, C. F. (2007). Validation of satellite lluvia products over East Africa's complex topography. *Int. J. Remote Sens.* **28**(7-8), 1503–1526.

Duan, Q., Sorooshian, S. & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual lluvia-runoff models. *Water Resour. Res.* **28**(4), 1015–1031.

Edijatno & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche* **2**, 113–121.

Espinoza, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Filizola, N., Noriega, L., Lavado, W., Pombosa, R. & Romero, R. (2009). Spatio-temporal lluvia variability in the Amazon Basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia and Ecuador). *Int. J. Climatol.* (accepted).

FAO/UNESCO (1981). CD-ROM :Soil Map of the World, Ten volumes. UN Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

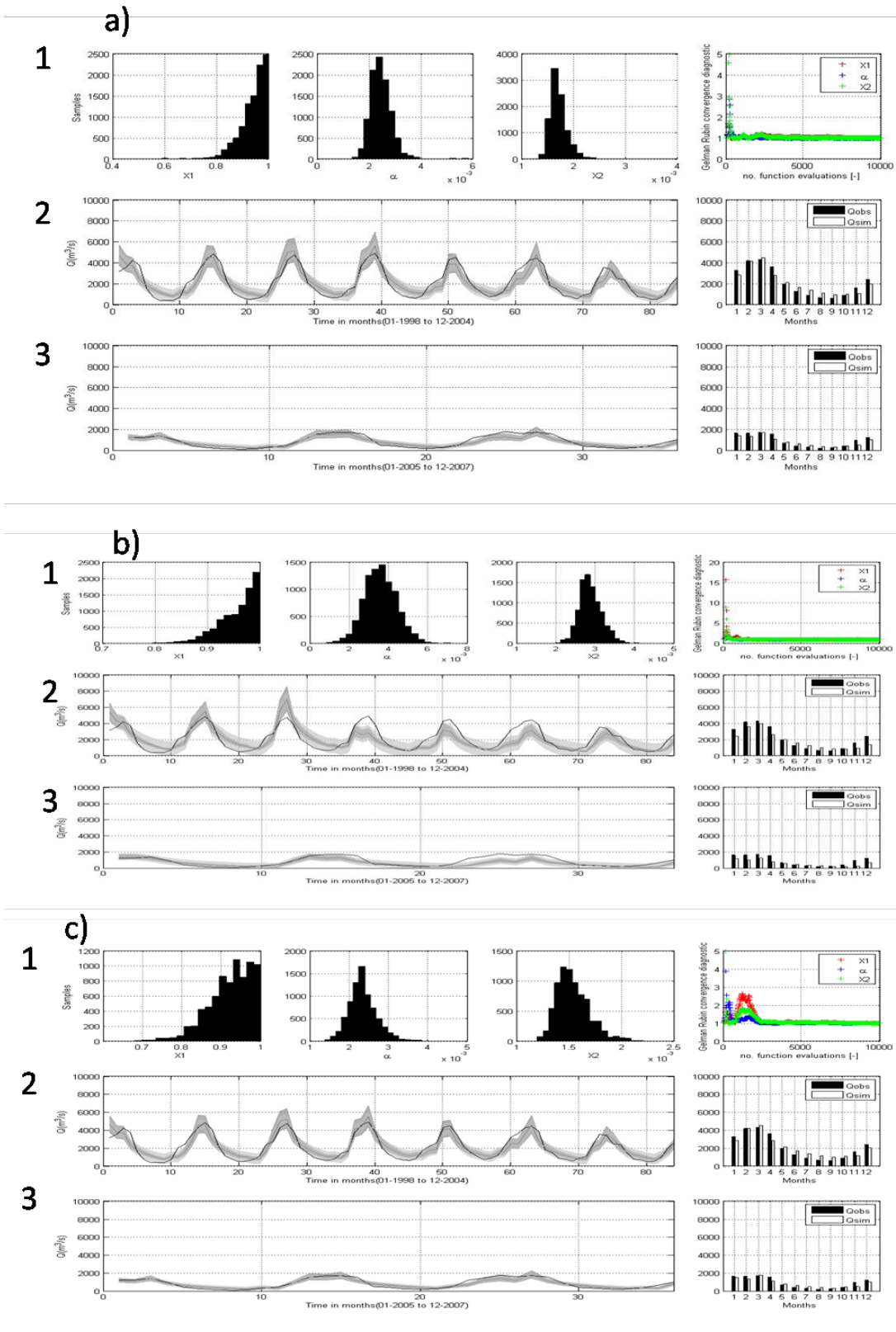


Fig. 4 Procedimiento de validación y calibración para el modelo GR2M sobre la cuenca de Maldonadillo: (a) Usando datos de lluvia in situ: 1: histogramas de los parámetros en el modelo y evolución de la escala de reducción Gelman y Rubin. 2: hidrograma de incertidumbre de predicción para el periodo de calibración (01/1998 al 12/2004) y valores mensuales observados (Qobs) y simuladas descargas (Qsim). 3: hidrograma de incertidumbre de predicción para el periodo de

validación (01/2005 al 12/2007) y valores mensuales observados (Qobs) y simuladas descargas (Qsim). (b) como en (a) pero para datos de lluvia de TRMM. (c) como en in (a) pero para datos observados mejorados de lluvia TRMM. Las descargas son representadas por la línea negra. Las simuladas descargas son denotadas por la línea gris. El área achurada oscura denota la incertidud de predicción que resulta de la incertidud de los parámetros del modelo. El área achurada clara denota la incertidud de predicción que resulta de la incertidud de los valores calculados con el modelo.

- Hargreaves, G. H. & Samani, Z. A. (1985).** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Engng Agric.* **1**(2), 96-99.
- Hastings, W. K. (1970).** Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika* **57**(1), 97-109.
- Islam, M. N. & Uyeda, H. (2007).** Use of TRMM in determining the climatic characteristics of lluvia over Bangladesh. *Remote Sens. Environ.* **108**(3), 264-276.
- Kabouya, M. (1990).** Modélisation pluie-débit au pas de temps mensuel et annuel en Algérie septentrionale. These de doctorat Université Paris-Sud, Paris, France.
- Lavado, C. W. S., Labat, D., Guyot, J. L., Ardoin-Bardin, S. & Ordoñez, J. J. (2009a).** Monthly water balance models in the Amazon drainage basin of Peru: Ucayali River basin. *Hydrol. Sci. J. (submitted)*
- Lavado, C. W. S., Labat, D., Guyot, J. L., Boulet, G., Ordoñez, J. J. & Solis, O. (2009b).** Comparison of reference evapotranspiration models with the standard FAO Penman-Monteith model in the Peruvian Amazon-Andes basin. *J. of Hydrol. (submitted)*
- Lavado, C. W. S., Labat, D., Guyot, J. L., Ronchail, J., Espinoza, J. & Ordoñez, J. (2009c).** Recent trends in lluvia, temperature and evapotranspiration in the Peruvian Amazon-Andes basin: Huallaga and Ucayali basins. *Int. J. Climatol. (submitted)*.
- Lavado, C. W. S., Labat, D., Guyot, J. L., Vrugt, J. & Ordoñez, J. (2009d).** Monthly water balance models to predict possible climatic change impacts using three IPCC AR-4 models in the Peruvian Amazon-Andes basin. *J. Hydrology. (submitted)*
- Makhlouf, Z. & Michel, C. (1994).** A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *J. Hydrol.* **162**(3-4), 299-318.
- Marengo, J. (2006).** On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia* **21**(3), 1-19.
- Marengo, J. A., Nobre, C. A., Tomasella, J., Oyama, M. D., De Oliveira, G. S., De Oliveira, R., Camargo, H., Alves, L. M. & Brown, I. F. (2008).** The drought of Amazonia in 2005. *J. Climate* **21**, 495-516.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. & Teller, E. (1953).** Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.* **21**(6), 1087-1092.
- Molinier, M., Guyot, J.-L., Oliveira, E. D. & Guimarães, V. (1996).** Les régimes hydrologiques de l'Amazonie et de ses affluents. L'hydrologie tropicale: géoscience et outil pour le développement, Paris, Mai 1995. In: IAHS Series of Proceedings and Reports. Vol. 238. pp. 209-222. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970).** River descarga forecasting through conceptual models, Part I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* **10**(3), 282-290.
- Niel, H., Paturel, J.-E. & Servat, E. (2003).** Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. *J. Hydrol.* **278**(1-4), 213-230.
- Sorooshian, S., Hsu, K. L., Gao, X., Gupta, H. V., Imam, B. & Braithwaite, D. (2000).** Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical lluvia. *Bull. Am. Met. Soc.* **81**(9), 2035-2046.
- Su, F. G., Hong, Y. & Lettenmaier, D. P. (2008).** Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata Basin. *J. Hydromet.* **9**(4), 622-640.
- Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bouten, W. & Sorooshian, S. (2003).** A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. *Water Resour. Res.* **39**(8) 1201.
- Wilk, J., Kniveton, D., Andersson, L., Layberry, R., Todd, M. C., Hughes, D., Ringrose, S. & Vanderpost, C. (2006).** Estimating lluvia and water balance over the Okavango River Basin for hydrological applications. *J. Hydrol.* **331**(1-2), 18-29.
- Yerren, J., Lavado, W., Fraizy, P. & Guyot, J. (2004).** Les régimes hydrologiques dans le bassin amazonien du Pérou. (Los regimenes hidrológicos en la Cuenca Amazónica del Perú). III LBA Scientific Conference. Surface hydrology and water chemistry, LBA, Brasilia.
- Zeng, N., Yoon, J. H., Marengo, J. A., Subramaniam, A., Nobre, C. A., Mariotti, A. & Neelin, J. D. (2008).** Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environ. Res. Lett.* **3**, 014002.

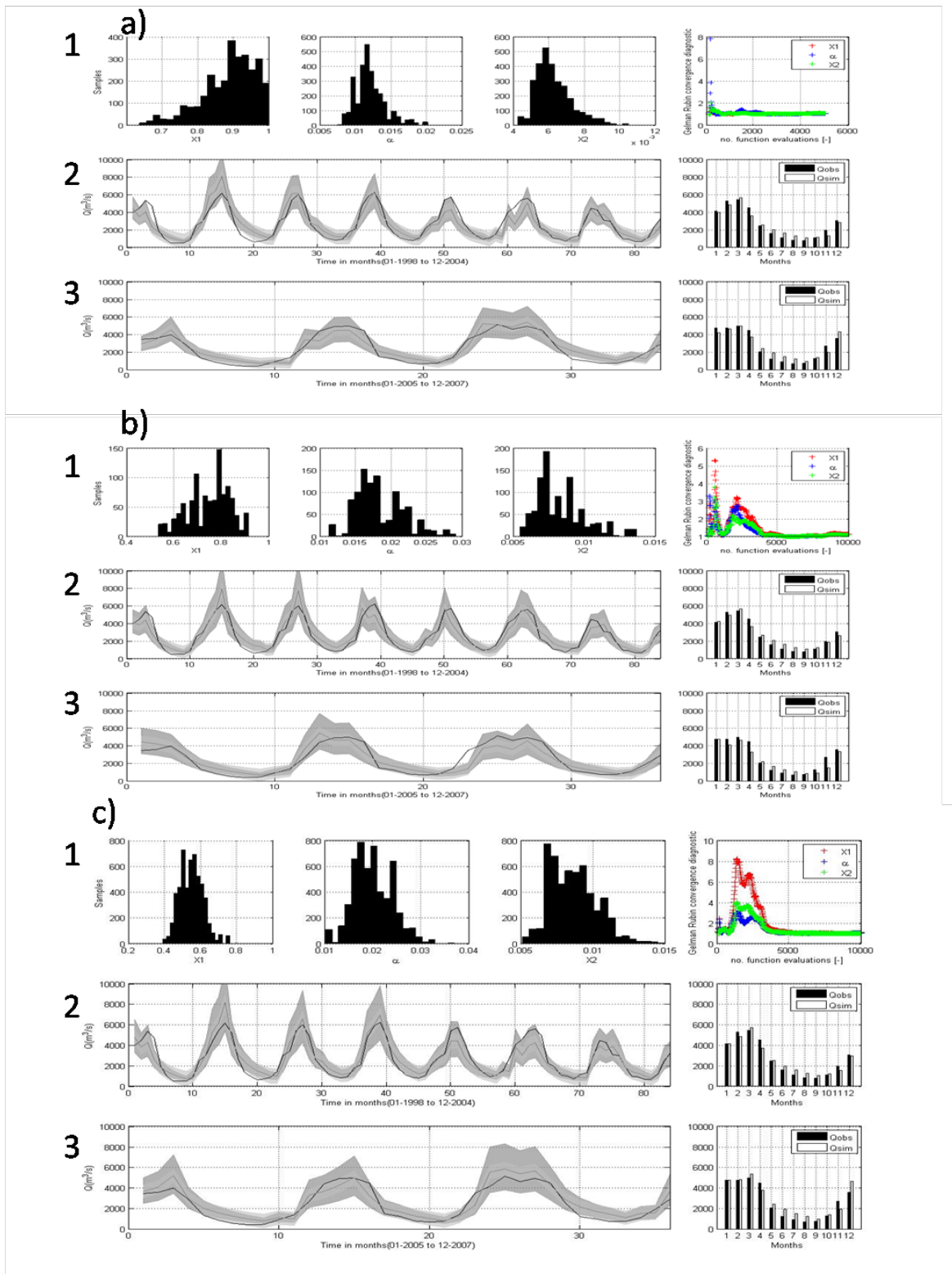


Fig. 5 Como en la Fig. 4 pero para la cuenca del río Tambo.