



Modelización hidrológica usando estimaciones de lluvia por satélite en la cuenca del río Huallaga, Perú

Hydrological modeling using satellite rainfall estimates over the Huallaga river basin in Peru

KARENA QUIROZ JIMÉNEZ^{1,*}, WALTER COLLISCHONN¹ & WALDO SVEN LAVADO CASIMIRO²

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Porto Alegre-RS, Brasil

² Servicio Nacional de Hidrología e Meteorología del Perú (SENAMHI), Lima 11, 1308, Perú

* karenaquiroz@gmail.com

RESUMEN

En los últimos años los cálculos de lluvia obtenidos por satélite son una fuente de datos potencialmente útil para estudios hidrológicos y pueden ser aplicados en modelos de transformación lluvia-escorrentía. La propuesta es de mayor interés para regiones remotas, donde los datos de lluvia obtenidos por métodos convencionales son limitados, debido a la baja densidad o escasez de estaciones pluviométricas. El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad de los productos de lluvia por satélite como datos de entrada a un modelo hidrológico en la cuenca del río Huallaga en Perú. Se evaluaron dos productos de lluvia por satélite: 3B42-TMPA y CMORPH, además, lluvia obtenida por método convencional y una última fuente que resulta de las correcciones del producto CMORPH con lluvia convencional denotado como MIXTO. El periodo de simulación está comprendido entre octubre/2003 y febrero/2009. Los caudales simulados obtenidos por el modelo hidrológico para las cuatro fuentes de lluvia se asemejan a los regímenes hidrológicos, valores máximos para épocas húmedas y mínimos para épocas secas; sin embargo, con tendencias a subestimar los caudales observados. Las expectativas de considerar la lluvia obtenida por satélite como dato para complementar la medición de pluviómetros en la cuenca del río Huallaga son poco alentadoras. Los coeficientes de desempeño mostraron valores muy bajos de lo normal (coeficiente de Nash-Sutcliffe menor a 0,50) concluyendo que los productos de lluvia por satélite evaluados en este estudio, como datos de entrada al modelo hidrológico no resultan confiables.

Palabras claves: Lluvia por satélite; modelo hidrológico; 3B42; CMORPH.

ABSTRACT

In recent years satellite rainfall estimates are a source of potentially useful data for hydrological studies and can be applied in rainfall-runoff transformation models. This study is of greater interest in remote regions where rainfall data obtained by conventional methods is limited due to low or poor density of surface rainfall stations. The aim of this study is to evaluate the quality of satellite rainfall products as input into hydrological model for the Huallaga River basin in Peru. Thus, two satellite rainfall products were evaluated: 3B42-TMPA y CMORPH and also rainfall obtained by conventional method; and a final source resulting from the corrections to the CMORPH product with conventional rainfall, referred to as MIXTO. The simulation period is from October/2003 to February/2009. The simulated discharge obtained from the hydrological model for the four sources of rain water regimes could be reproduced, maximum values for wet seasons and minimum values for dry seasons, however, it showed a trend to underestimate the observed discharge. Considering the satellite rainfall as a complement of raingauge measuring in the Huallaga River basin is not encouraging. Statistical skill showed very low values, under normal (Nash-Sutcliffe coefficient is less than 0.50) and concluded that the satellite rainfall products evaluated in this study as inputs into the hydrological model are not reliable.

Keywords: Satellite rainfall, hydrological model, 3B42; CMORPH.

INTRODUCCIÓN

La lluvia es la componente esencial del ciclo hidrológico y la variable climática más importante utilizada por los modelos hidrológicos tipo lluvia-escorrentía. La forma convencional y directa de medir la lluvia es por medio de pluviómetros instalados en superficie, localizados generalmente próximos a ciudades con fácil acceso. Esta forma de ubicación, dispersas irregularmente, dificulta monitorear la totalidad de los eventos lluviosos. Para el caso de cuencas que abarcan varios países, los datos de lluvia pueden ser limitados por los tipos de equipamiento e inconsistencias en los equipos de medición de lluvia. Estos problemas causan, en la mayoría de los casos, errores en la estimación de lluvia que aumentan la incertidumbre en el conocimiento o comprensión de los procesos hidrológicos.

Una fuente alternativa de datos de lluvia que viene siendo explorada es a partir del sensoramiento remoto por satélite, basada en la medición de la radiación emitida y reflejada por la atmósfera que es detectada o captada por los sensores a bordo de los satélites. La radiación es convertida en estimación de lluvia por medio de algoritmos. En los últimos años, una gran cantidad de productos de estimación de lluvia a escala espacial y temporal con cobertura global y en tiempo casi real han sido desarrollados y entre ellos podemos mencionar algunos: TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA, Huffman et al. 2007), Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks (PERSIANN, Sorooshian et al. 2000) y Climate Prediction Center Morphing (CMORPH, Joyce et al. 2004). Estos productos difieren en el uso del espectro de observación de las bandas visibles (VIS) e infrarrojo (IR) y del uso multiespectral, combinación de los anteriores con el espectro de microonda (MW) que mejoran la estimación de lluvia en la forma de consistencia, exactitud, cobertura y resoluciones espaciales en los algoritmos de estos productos.

Entre las ventajas que presentan la lluvia estimada por satélite frente a la obtenida por método convencional están la mayor cobertura regional y mayor información espacio-temporal de forma ininterrumpida. Sin embargo, la estimación de lluvia por satélite está sujeta a errores debido a problemas de instrumentación, naturaleza del sistema de medición, simplificaciones teóricas y limitación de la cobertura de los satélites polares. Estos errores introducen incertidumbre a los algoritmos por lo que es necesario validar con mediciones de pluviómetros (Joyce et al. 2004, Aghakouchak 2009) o analizar como variables de entrada a los modelos hidrológicos. Estos análisis son desarrollados en diversas regiones con el fin de mejorar las estimaciones de lluvia por satélite, por lo cual vienen desarrollándose nuevas misiones espaciales con nuevos y un mayor número sensores a bordo de los satélites. En octubre del 2011 fue lanzado al espacio el satélite MEGHA-TROPICS cuyo objetivo principal es el estudio del ciclo hidrológico y el análisis del cambio climático en las regiones tropicales. Este satélite incluye, además de sensores visibles e infrarrojo, el sensor de microonda de mayor frecuencia que ayudará principalmente a estudiar la precipitación en los trópicos y las propiedades de las nubes (Gosset 2011). Para el año 2013 está previsto el lanzamiento de la misión GPM (Global Precipitation Mission) que podría aumentar la exactitud y mejorar las resoluciones espaciales (menor a 0,25°) y temporales (menor a 3 horas), con aplicaciones para previsión de avenidas y monitoreo de áreas inundables inminentes (Su et al. 2008, Huffman et al. 2007, Levizzani 2000).

Varias aplicaciones fueron realizadas usando la lluvia estimada por satélite como datos de entrada a modelos semidistribuidos, entre ellos lluvia derivada del satélite TRMM en subcuencas con áreas que varían de 60 000 a 500 000 km², cuenca del río Amazonas. Los resultados de estas simulaciones muestran confiabilidad en reproducir los regímenes de lluvia y caudal en las épocas estacionales (Collischonn et al. 2008, Nóbrega et al. 2008, Lavado 2009). En los trabajos en modelos de previsión de caudales realizados por Araújo (2006), Su et al. (2008) y Li et al. (2008) evaluaron los productos CMORPH, 3B42 y 3B42-RT, respectivamente, en cuencas de América del Sur y África. Los resultados indican bajos valores de desempeño para áreas de menor drenaje y mejor desempeño para áreas de mayor drenaje.

En ese contexto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el uso de las estimaciones de lluvia por satélite en un modelo hidrológico distribuido del tipo lluvia-escorrentía en la cuenca del río Huallaga. Esta cuenca presenta una densidad de red de pluviómetros relativamente mayor comparada con otras cuencas amazónicas dentro del ámbito de la región de Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

La calidad de las estimaciones de lluvia por satélite fue evaluada usando un modelo hidrológico distribuido y comparado con caudales observados a paso de tiempo diario. En este ítem, se describen la cuenca y sus registros de lluvia y caudal, así como los productos de lluvia por satélite. El modelo hidrológico MGB-IPH para grandes cuencas fue usado para evaluar las fuentes de lluvia, asimismo se evaluó el método de calibración de los parámetros del modelo y la interpretación de los índices de desempeño.

Descripción de la cuenca del río Huallaga

La cuenca hidrográfica del río Huallaga, localizada en el área central de Perú, forma parte de las nacientes del río Amazonas, presenta una área de drenaje de 70 000 km² hasta la estación Chazuta (Figura 1a). El Huallaga tiene su origen en los Andes, con recorrido de sur a norte hasta la confluencia con el río Marañón que deriva hacia el Amazonas. La altitud de la cuenca varía aproximadamente desde 200 msnm por el este de la cuenca hasta altitudes superiores a 5000 msnm en la cordillera de los Andes. La temperatura del aire media anual es próxima a 20 °C, la evapotranspiración varía entre 3,0 y 5,5 mm.día⁻¹, siendo mayor en el este de la cuenca (Lavado 2010). La lluvia media anual es de 1700 mm.día⁻¹, la precipitación mínima se registra entre los meses de abril-noviembre y la máxima entre los meses de diciembre-marzo. El régimen de lluvias máximas está fuertemente influenciado por los vientos Alisios procedentes del Atlántico noreste que atraviesan la cuenca amazónica (Lavado 2010, Killeen et al. 2007).

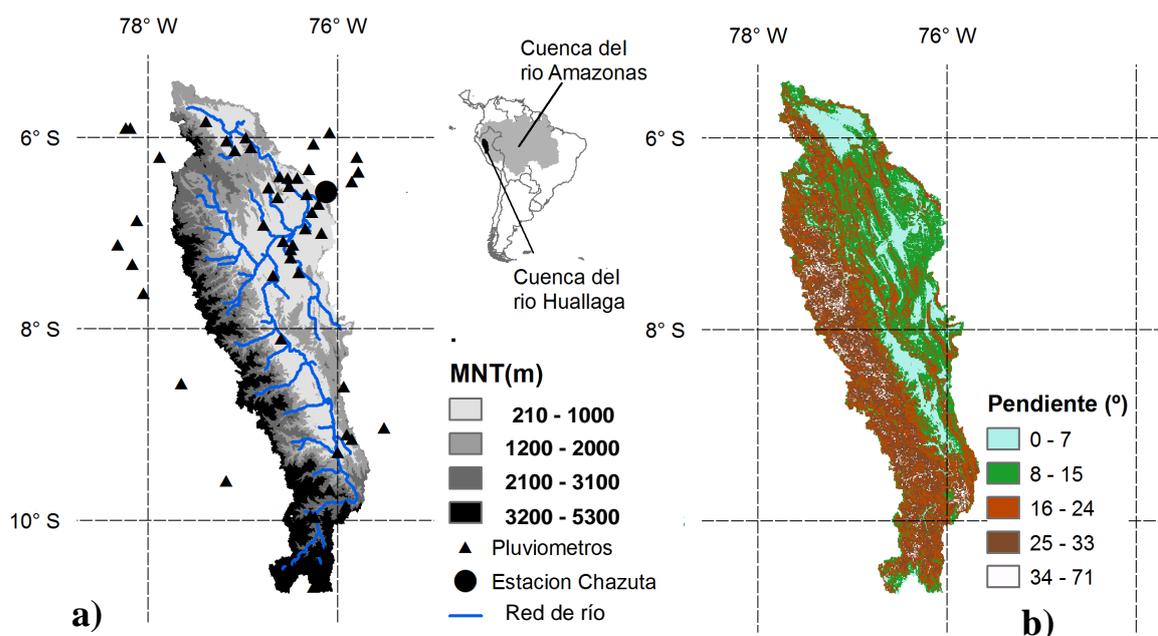


Fig. 1. Localización de la cuenca del río Huallaga. a) Modelo Numérico de Terreno (MNT) con estaciones pluviométricas y una estación pluviométrica. b) Pendiente de terreno en grados.

Datos de lluvia y caudal

Para el presente estudio se consideró 53 pluviómetros de la red del SENAMHI PERÚ distribuidos: 17 estaciones fuera y 36 dentro de la cuenca del Huallaga. La serie de datos de caudal se obtuvo de la estación Chazuta, periodo comprendido de octubre/2003-febrero/2009. La característica más relevante de la localización de los pluviómetros es su distribución irregular (Figura 1a). Existe mayor presencia de estaciones pluviométricas en el noreste de la cuenca, región con menor altitud y menor pendiente de terreno (<7°). Por otra parte se aprecia un déficit de estaciones pluviométricas en el sur de la cuenca, región con mayor pendiente de terreno (>16°) (Figura 1b), área que podría estar expuesta a eventos de lluvias considerables.

Productos de lluvia por satélite

TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA)

TMPA es una base de datos de estimación de lluvia por satélite a partir principalmente del satélite TRMM y otros satélites de órbita polar y geoestacionaria. Los productos de TMPA generan dos principales tipos: estimaciones de lluvia en tiempo real (denominadas RT o Real Time) y estimaciones de lluvia corregidas en base a datos de pluviómetros (denominada Research). Este último estima varios productos de lluvia por satélite de forma secuencial, uno de ellos es el 3B42, que proporciona datos de lluvia en escala espacial en grillas de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ con cobertura espacial entre los meridianos 50°N hasta 50°S , cada 3 horas, disponibles a partir de enero de 1997 hasta la actualidad (Huffman et al. 2007).

Los productos derivados de TMPA están basados en dos fuentes de bandas espectrales: imágenes de microondas obtenidas por satélites polares e imágenes de infrarrojo (longitud de onda próxima a $10,7 \mu\text{m}$) obtenida de sensores a bordo de satélites geoestacionarios (Huffman et al. 2007). Los productos de TMPA son elaborados en cuatro etapas. En la primera etapa la lluvia fue estimada a partir de imágenes de microondas pasivas calibradas con el producto TMI (TRMM Microwave Imager) y el PR (Precipitation Radar) del satélite TRMM. En la segunda etapa la lluvia fue estimada a partir de imágenes del infrarrojo calibradas con imágenes de microonda. En la tercera etapa la lluvia se estimó a partir de la combinación de las dos etapas anteriores. Finalmente, en la última etapa, se efectuaron las correcciones con información de lluvia de pluviómetros en base a los datos del GPCP (Global Project Climatological Precipitation) y CAMS (Climate Assessment and Monitoring System) (Huffman et al. 2007).

Climate Prediction Center Morphing Method (CMORPH)

CMORPH es un producto que proporciona estimación de lluvia por satélite principalmente de imágenes de sensores de microonda a partir de satélites de órbita polar. Las imágenes de sensores de infrarrojo son usadas por el algoritmo de CMORPH para propagar la velocidad y dirección de las nubes por medio de matrices de propagación. Este producto proporciona estimaciones de lluvia espacial en los meridianos de 60°N hasta 60°S , en escala espacial con grillas de $0,0727^{\circ} \times 0,0727^{\circ}$ y $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ en escalas temporales de media hora y 3 horas, disponibles a partir de diciembre de 2002 hasta la actualidad (Joyce et al. 2004)

La resolución espacial de $0,0727^{\circ}$ ($\sim 8 \text{ km}$ en la línea ecuatorial) es concordante con las diferentes resoluciones de los sensores de satélites geoestacionarios (4 km para GOES, 5 km para Meteosat IR y 13 km para los sensores de AMSU-B y SSM/I), adecuada para representar la propagación de los sistemas de nubes en incrementos de media hora. Por otra parte, las estimaciones de lluvia desde imágenes de microonda son obtenidas en combinación de todos los sensores de satélites polares (TMI, SSM/I y AMSU-B) (Joyce et al. 2004).

Las imágenes de infrarrojo muestran sistemas de nubes y movimientos que son usadas para realizar la propagación de las imágenes de microonda con mayor exactitud por su resolución espacial más refinada. El método que utiliza CMORPH para detectar los sistemas de nubes es el CSAV (Cloud System Advection Vector) que consiste en detectar los movimientos de nubes (dirección y velocidad) a partir de imágenes de satélites de órbita geoestacionaria. Finalmente, el método CMORPH estima lluvia con ponderación de propagación efectuada con lluvia derivada de sensores básicamente de microonda, considerando el tiempo (Joyce et al. 2004).

Modelo hidrológico MGB-IPH

El modelo hidrológico MGB-IPH descrito por Collischonn (2001a), Collischonn & Tucci (2001b) y Paiva (2009) es un modelo hidrológico distribuido para grandes cuencas ($> 10\,000 \text{ km}^2$). El MGB-IPH es distribuido porque subdivide a la cuenca en minicuenas ligadas entre sí por la red de ríos. A su vez cada minicuenca está dividida en bloques de uso de suelo y su cantidad está determinada por el número resultante de la combinación de las características de uso, cobertura vegetal y tipo de suelo. El modelo hidrológico conceptualiza el ciclo hidrológico basado en relaciones físicas calculando los procesos del ciclo hidrológico como la interceptación, evapotranspiración, balance hídrico en el suelo, escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea, además de la propagación de caudales en el río por el modelo de Muskingum-Cunge e hidrodinámico. A continuación se explica de forma resumida las etapas de los procesos

hidrológicos considerados por el modelo MGB-IPH. El cálculo del balance hídrico del suelo en cada bloque de una minicuenca está expresado en la ecuación 1. Considerando un bloque, el balance hídrico está expresado en [mm], tal como sigue:

$$(W_{i,j}^t - W_{i,j}^{t-1}) \cdot \Delta t = P_{i,j} - ET_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}} \quad (1)$$

donde: $(W_{i,j}^t - W_{i,j}^{t-1})$ es la variación del volumen almacenado en el suelo durante un intervalo de tiempo $[\Delta t]$, $P_{i,j}$ es la precipitación efectiva, $ET_{i,j}$ es la evapotranspiración, $D_{sup_{i,j}}$ es la escorrentía superficial, $D_{int_{i,j}}$ es la escorrentía subsuperficial, y $D_{bas_{i,j}}$ es la escorrentía subterránea. Las variables de escorrentía son calculadas para el paso de tiempo t y los parámetros del modelo, de acuerdo a las ecuaciones 2 al 4.

$$D_{sup_{i,j}} = \Delta t \cdot P_{i,j} - (W_{m_j} - W_{i,j}^{t-1}), \text{ para } \delta \leq 0$$

$$D_{sup_{i,j}} = \Delta t \cdot P_{i,j} - (W_{m_j} - W_{i,j}^{t-1}) + W_{m_j} \cdot \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{t-1}}{W_{m_j}} \right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_{i,j}}{W_{m_j} \cdot (b_j + 1)} \right]^{b_j+1}, \text{ para } \delta > 0 \quad (2)$$

$$\text{donde: } \delta = \left[\left(1 - \frac{W_{i,j}^{t-1}}{W_{m_j}} \right)^{\frac{1}{b_j+1}} - \frac{\Delta t \cdot P_{i,j}}{W_{m_j} \cdot (b_j + 1)} \right]$$

donde: W_{m_j} [mm] es el almacenamiento máximo en la capa superficial del suelo del bloque j ; b_j es el parámetro del modelo que representa la distribución estadística de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

El flujo subsuperficial es calculado, en función de la ecuación 3, semejante a la ecuación de conductividad hidráulica para suelos no saturados.

$$D_{int_{i,j}} = K_{int_j} \cdot \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - W_{z_j}}{W_{m_j} - W_{z_j}} \right)^{3+\frac{2}{\lambda}} \quad (3)$$

donde: W_{z_j} [mm] es el límite inferior a partir del cual no ocurre flujo subsuperficial; K_{int_j} [mm.día⁻¹] es el parámetro del modelo que define el drenaje subsuperficial cuando el suelo está saturado, y λ es el índice de porosidad del suelo.

La escorrentía subterránea es calculada a partir de la relación lineal entre el almacenamiento de agua en el suelo y el almacenamiento máximo del suelo, basado en la ecuación 4.

$$D_{bas_{i,j}} = K_{bas_j} \cdot \left(\frac{W_{i,j}^{t-1} - W_{c_j}}{W_{m_j} - W_{c_j}} \right) \quad (4)$$

donde: W_{c_j} [mm] es el límite inferior a partir del cual no existe percolación; K_{bas_j} [mm.día⁻¹] es el parámetro que define la percolación máxima, cuando el suelo está saturado. El flujo generado sobre y en el suelo (ecuaciones 2 al 4) es realizado a través de la minicuenca, usando tres reservorios lineales, uno para cada tipo de flujo: superficial, subsuperficial y subterráneo. Los flujos de salida de los reservorios son calculados en base a las ecuaciones 5 al 7.

$$Q_{sup_i} = \frac{1}{TKS_i} V_{sup_i} \quad (5)$$

$$Q_{int_i} = \frac{1}{TKI_i} V_{int_i} \quad (6)$$

$$Q_{bas_i} = \frac{1}{TKB_i} V_{bas_i} \quad (7)$$

donde: Q_{sup_i} [$m^3.s^{-1}$] es el flujo de salida superficial en la minicuenca i ; Q_{int_i} [$m^3.s^{-1}$] es el flujo de salida subsuperficial en la minicuenca i ; Q_{bas_i} [$m^3.s^{-1}$] es el flujo de salida subterránea en la minicuenca i ; V_{sup_i} , V_{int_i} y V_{bas_i} [m^3] son los volúmenes en los reservorios de la minicuenca superficial, subsuperficial y subterránea, respectivamente; TKS_i , TKI_i y TKB_i [s] son parámetros de tiempo. La propagación del flujo en los cursos de los ríos está basada en el método de propagación de Muskingum-Cunge. Los parámetros normalmente considerados en el proceso de calibración son: W_m , b , K_{bas} , K_{int} , W_z , W_c , TKS , TKI y TKB . En Collischonn (2001a) y Collischonn & Tucci (2001b) son mostrados los límites de valores de los parámetros del modelo MGB-IPH que se pueden considerar para la simulación de las cuencas.

Previamente al uso del modelo hidrológico debe efectuarse la etapa del geoprocetamiento a partir del modelo numérico de terreno la cuenca es subdividida en minicuenas, subcuencas y trechos de ríos. A partir de los mapas de uso y tipos de suelos son creados los bloques, donde el número de bloques está de acuerdo al número de grupos resultantes de la combinación del uso y tipo de suelo Collischonn (2001a). Los procesos hidrológicos verticales incluyendo la interceptación y percolación al acuífero son simulados en los bloques. Los volúmenes generados en los bloques son sumados y propagados por la red de ríos. La definición de las subcuencas sigue la disposición de estaciones de nivel o caudal o por puntos de control sobre la red de ríos a criterio del modelador (por ejemplo, puntos de confluencia, proximidad a áreas urbanas, etc.).

En este trabajo el modelo MGB-IPH fue implementado sobre la cuenca del río Huallaga subdividido en 75 minicuenas que varían de 0,5 a 3725 km^2 (Figura 2). La delimitación de las subcuencas para la simulación se hizo de acuerdo con el criterio de la existencia de estaciones de caudal, en este caso la única estación disponible fue Chazuta (Figura 1). El número de bloques fue obtenido a partir de la combinación de los mapas de uso de suelo y tipo de suelo realizado por los integrantes del equipo del Proyecto de Investigación MMH-IPH (Proyecto Integrado de Cooperação Amazônica e Modernização do Monitoramento Hidrológico) en el año 2009. A partir del mapa de bloques fueron encontrados 6 tipos: floresta inundable (0,1%), floresta en suelo fluvial (7,6%), floresta en cambisol (60%), vegetación de bajo porte en suelo poco profundo-raso (27%), vegetación de bajo porte en suelo fluvial (5%) y superficies de agua (0,3%).

El modelo hidrológico necesita cinco variables meteorológicas para calcular la evapotranspiración potencial: temperatura de aire, presión atmosférica, velocidad de viento, insolación y humedad relativa. Debido a la dificultad de obtener datos climáticos observados, fueron usados datos climáticos de CRU (Climate Research Unit). Esta base es de información global con datos climáticos a nivel mensual representada espacialmente en grillas de 10 minutos. La base de CRU fue obtenida a partir de estaciones meteorológicas administradas por agencias meteorológicas nacionales alrededor del mundo, con datos que cubrieron el periodo de 1961-1990 (New et al. 2002).

El modelo MGB-IPH trabaja con series continuas de lluvia a paso diario en el centroide de cada minicuenca, por lo tanto es necesario un método de interpolación. Para el caso de lluvia con fuente de pluviómetros, fueron utilizadas 53 estaciones dispersas dentro y fuera de la cuenca. Para el caso de la lluvia por satélite se requirió 90 puntos que representaban los centros en cada grilla, dentro de la cuenca del Huallaga (Figura 2).

El método del inverso de la distancia al cuadrado fue utilizado para interpolar puntos que representan las estaciones de pluviómetros (o centro de satélite) y para calcular en los centroides de las minicuenas. El proceso de interpolación calcula la distancia mínima entre un centroide y los puntos con datos, los puntos que estén situados a un radio menor o igual a dos veces la distancia mínima serán los puntos que intervienen en el cálculo de la interpolación. Este procedimiento es repetido para cada centroide de la minicuenca obteniendo finalmente series de lluvia diaria en cada centroide y para cada fuente de lluvia. Las fuentes que serán evaluadas como datos de entrada al modelo MGB-IPH son las siguientes:

- a. simulación con interpolación de pluviómetros (PLU)
- b. simulación con lluvia de satélite interpolado (3B42)

- c. simulación con lluvia de satélite interpolado (CMORPH)
- d. simulación con lluvia corregida de CMORPH basado en pluviómetros (MIXTO).

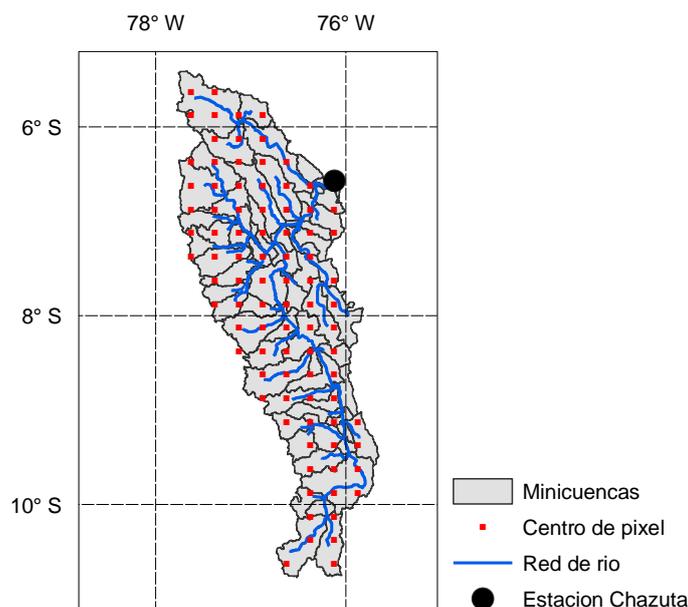


Fig. 2. Subdivisión de la cuenca del río Huallaga para el modelo MGB-IPH y representación de los centros de grillas para los datos de lluvia por satélite.

La simulación con MIXTO está descrita con más detalle en los trabajos de Collischonn (2006) y Lavado (2009). El método consiste en superponer el campo de lluvia por satélite y el mapa con puntos que representan los pluviómetros, se identifica las grillas donde existe coincidencia y se hace una diferencia entre sus valores, denominándolo el mapa de residuos. Se efectúa una distribución de valores por un método de interpolación al mapa de residuos, este último mapa es sumado al mapa de lluvia por satélite y se repite el procedimiento para cada intervalo de tiempo.

Calibración de los parámetros del modelo

Existen dos grupos de parámetros que incluye el modelo MGB-IPH: fijos y calibrados. Los parámetros fijos tienen valores que son definidos e invariables; por otro lado los parámetros calibrados son variables por bloques. Entre los parámetros calibrados los más sensibles son los parámetros de escorrentía y de almacenamiento máximo en el suelo. La calibración de los parámetros variables que considera el modelo MGB-IPH puede ser efectuada de forma manual (visual) o automática. La calibración manual (conocida también por tentativa y error) es un proceso iterativo donde los parámetros son alterados en cada simulación. Este proceso continúa hasta que se decida que el resultado encontrado sea satisfactorio en la comparación visual en los hidrogramas de los caudales calculados y observados. Por otro lado, la calibración automática en el modelo MGB-IPH utiliza el algoritmo MOCOM-UA (Yapo et al.1998). Éste es un algoritmo de optimización global multiobjetivo basado en técnicas de búsqueda aleatoria, algoritmos evolutivos y algoritmos de búsqueda simple (Collischonn & Tucci 2003). Por ser multiobjetivo, el algoritmo busca minimizar diferentes tipos de errores entre los hidrogramas simulados y los observados en las estaciones fluviométricas. En este trabajo se efectuó la calibración automática de los parámetros del modelo para cada fuente de datos de lluvia.

Índices de desempeño

La calidad de la calibración es verificada en un punto de control con valores de caudal disponible. Los índices de desempeño considerados son: Coeficiente de Nash Sutcliffe (NS), Coeficiente de Nash Sutcliffe para logaritmo (NS_{log}) y la diferencia entre volúmenes calculados y observados mediante el Error en el volumen (ΔV), mostrados en las ecuaciones del 8 al 10.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nt} (Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t))^2}{\sum_{i=1}^{nt} (Q_{obs}(t) - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (8)$$

$$NS_{log} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{nt} (\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{cal}(t)))^2}{\sum_{i=1}^{nt} (\ln(Q_{obs}(t)) - \overline{\ln(Q_{obs})})^2} \quad (9)$$

$$\Delta V = \frac{\sum_{i=1}^{nt} (Q_{cal}(t)) - \sum_{i=1}^{nt} (Q_{obs}(t))}{\sum_{i=1}^{nt} (Q_{obs}(t))} \quad (10)$$

El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) tiene un valor máximo igual a 1, que significa un ajuste perfecto con los caudales calculados y está fuertemente influenciado por errores en los valores máximos. NS_{log} varía de $-\infty$ a 1 siendo que cuanto mayor el valor mejor será la simulación y está fuertemente influenciado por los valores mínimos. El error en el volumen no tiene valor máximo ni mínimo y no está influenciado por periodos de avenidas o de estiajes, apenas expresa la diferencia entre la suma de todos los valores calculados y observados (Collischonn 2001).

RESULTADOS

La evaluación de los productos de lluvia por satélite fueron comparados en varias etapas; la primera a nivel de lluvia media mensual (estacional) y anual, el segundo análisis a nivel de caudales simulados a partir del modelo MGB-IPH y el último un breve análisis de los coeficientes de escorrentía. Cabe resaltar que debido a la distribución irregular de las estaciones pluviométricas sobre la cuenca la lluvia media calculada a partir de éstas puede no ser perfecta, sin embargo es la única fuente directa y real que se tiene para realizar comparaciones con otras fuentes no convencionales.

Comparación de lluvia media mensual y anual

La Figura 3 muestra la lluvia media mensual de la cuenca del río Huallaga para cada fuente de lluvia en análisis. La lluvia media mensual calculada con los productos de satélite siguió los patrones estacionales con épocas húmedas y secas de la región mostrando una notoria subestimación en todos los meses para el producto 3B42. Los productos CMORPH y 3B42 muestran valores semejantes para los meses secos (mayo, julio, agosto y setiembre), en épocas húmedas el CMORPH se aleja de la lluvia mensual de 3B42 ajustándose mejor con la lluvia mensual de PLU. Con MIXTO (corrección de CMORPH con estaciones convencionales) tiene valores semejantes con la lluvia media mensual de PLU para todos los meses.

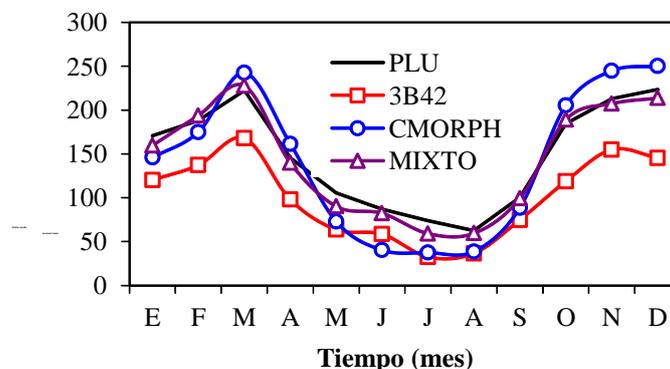


Fig. 3. Lluvia media mensual de la cuenca del río Huallaga para el período 2003-2009.

La Figura 4 muestra la lluvia media por año en la cuenca del río Huallaga, período de 2004-2008, para cada fuente de lluvia en análisis. Para el producto 3B42 la lluvia media anual es subestimada para todos los años, no superando el valor de 1500 mm.año⁻¹. Para el caso de CMORPH estima lluvia anual menor que PLU en todos los años a excepción del año 2004. Con MIXTO la lluvia media anual es semejante para el año 2005 y 2006 y menor para el año 2007 y 2008.

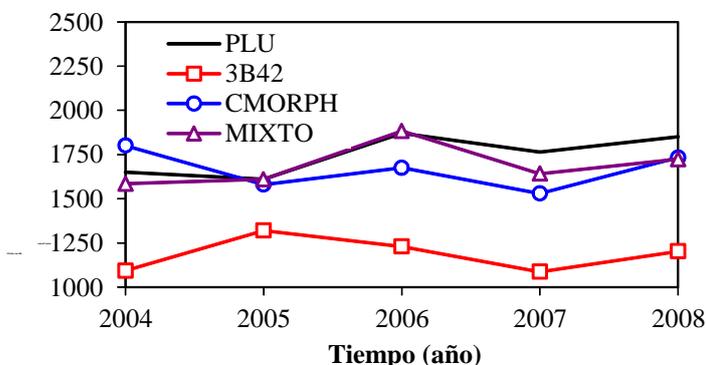


Fig. 4. Lluvia media anual de la cuenca del río Huallaga para el período 2004-2008.

Evaluación de caudales simulados

En este ítem son presentados los resultados de las cuatro fuentes de lluvia como variables de entrada al modelo hidrológico MGB-IPH a paso diario para el periodo de octubre/2003 hasta febrero/2009. La calibración automática de los parámetros fue realizada para cada fuente. El desempeño del modelo es evaluado por los índices de performance y visualmente por los hidrogramas representados en la figura 5. El hidrograma observado en la estación Chazuta presenta picos muy acentuados, comportamiento esperado de cuencas en nacientes o en cuencas hidrográficas montañosas con grandes pendientes.

La Figura 5 muestra dos gráficos para cada fuente de lluvia analizada, hidrograma con caudales simulados frente a los observados y el error de volumen para cada valor diario. La simulación con 3B42 muestra subestimación, observando diferencias relativas negativas en casi todo el periodo de simulación. La simulación con CMORPH muestra grandes diferencias relativas positivas sugiriendo que existen caudales calculados que sobrestiman en mayor medida algunos picos observados. Los hidrogramas de PLU y MIXTO muestran similitudes, tanto en caudales máximos como en mínimos.

La Tabla 1 resume los resultados de los índices de desempeño para la simulación hidrológica sobre la cuenca del río Huallaga. El mejor valor de coeficiente de Nash Sutcliffe (NS) fue para PLU (0,81), seguido de MIXTO (0,75). Entre las fuentes originales de lluvia por satélite, el CMORPH (0,45) tuvo mejor desempeño comparado con 3B42 (0,36).

Los mejores valores de coeficiente de Nash-Sutcliffe para logaritmos (NS_{log}) fueron para PLU (0,84) y MIXTO (0,83). Entre las fuentes originales de satélite el CMORPH (0,69) obtuvo mejor desempeño que 3B42 (0,23). Para el caso de coeficiente de Error en el Volumen (ΔV), el mejor valor fue para PLU (1%), las otras fuentes generaron valores negativos, 3B42 (-29%), CMORPH (-4%) y MIXTO (-8%). Los resultados de desempeño para MIXTO mostraron mejores valores en comparación a las fuentes de lluvia por satélite (3B42 y CMORPH). Sin embargo, los caudales calculados con esta fuente filtran los picos máximos y mínimos, esta fuente podría ser útil si se trabaja con escalas temporales mayores (por ejemplo paso de tiempo mensual) los errores podrían ser menores.

Tabla 1. Índices de desempeño para evaluar la simulación de la cuenca del río Huallaga.

Índice	PLU	3B42	CMORPH	MIXTO
NS	0,81	0,36	0,45	0,75
NS_{log}	0,84	0,23	0,69	0,83
ΔV	1%	-29%	-4%	-8%

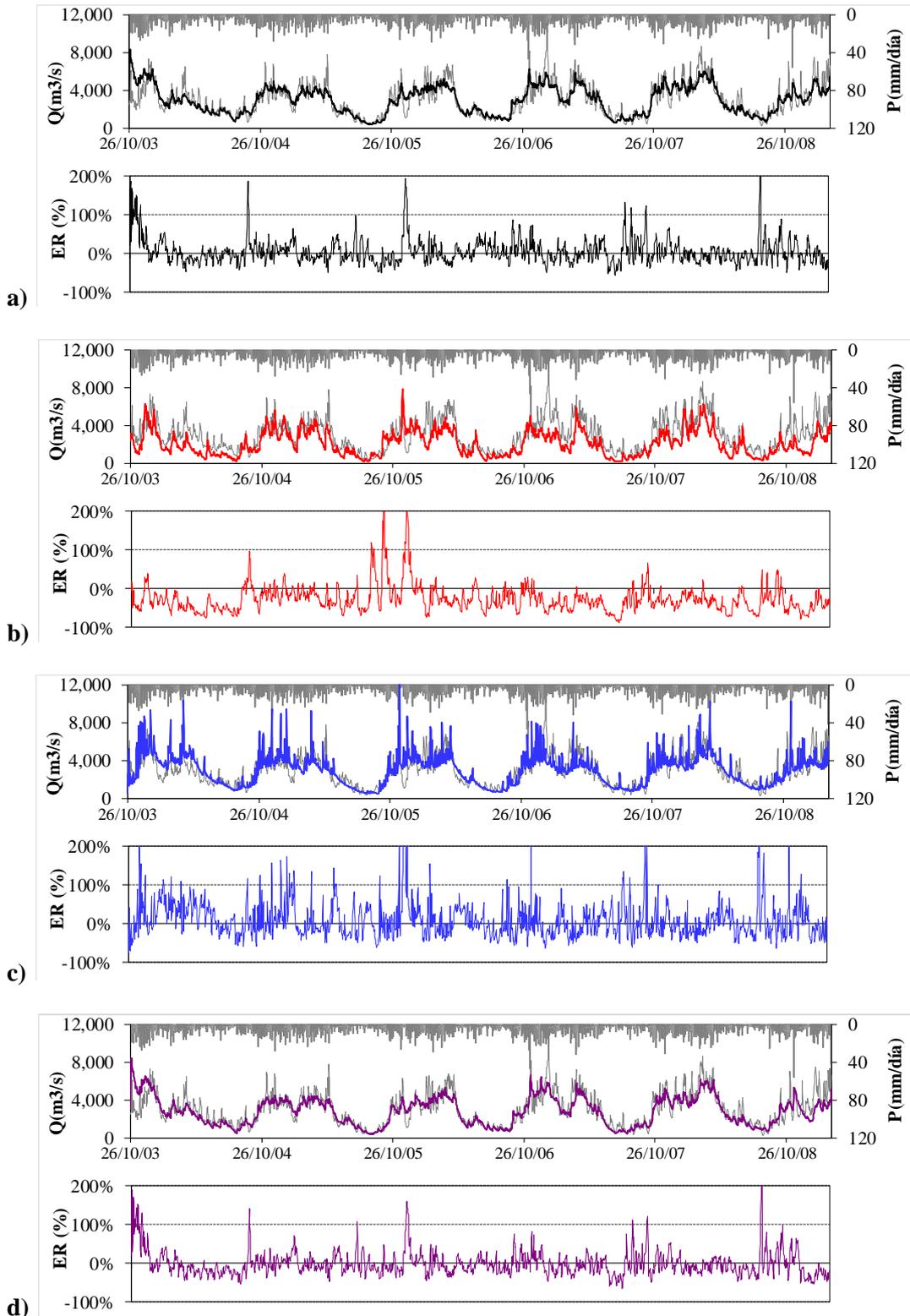


Fig. 5. Hidrograma calculado frente al observado y el Error de Volumen diario sobre la cuenca del río Huallaga para el período del 26/10/2003 al 27/02/2009. a) Lluvia con PLU; b) Lluvia con 3B42; c) Lluvia con CMORPH; d) MIXTO.

El balance hídrico de una cuenca hidrográfica está en función de entrada (precipitación) y salida (evapotranspiración y escorrentía superficial) y el porcentaje de lluvia que se transforma en escorrentía superficial es denominado coeficiente de escorrentía. Para intervalos anuales la variación de almacenamiento se desprecia y teóricamente el coeficiente de escorrentía varía de 0 a 1 y en la práctica varía entre 0,05 y 0,5 (Hornberger et al. 1998). En ese contexto, a partir del

caudal medio observado en la estación Chazuta ($2938 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), se calcularon los coeficientes de escorrentía y la evapotranspiración para cada fuente de lluvia en análisis (Tabla 2). Los resultados mostraron para el caso del producto 3B42 valores no comunes para la evapotranspiración y para el coeficiente de escorrentía, en tanto que para PLU, CMORPH y MIXTO los coeficientes mostraron valores muy altos, superando de lejos rangos globales establecidos en la literatura como si el área de estudio fuese una región muy árida.

Tabla 2. Balance hídrico medio anual para la cuenca del río Huallaga, en base al caudal $Q=2938 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ para el periodo 2004-2008.

Variable	PLU	3B42	CMORPH	MIXTO
P ($\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$)	1749	1187	1664	1689
ET ($\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$)	428	-134	343	368
Q/P	0,74	1,08	0,76	0,76

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue evaluar el uso de los productos de lluvia por satélite dentro del modelo hidrológico distribuido tipo lluvia-escorrentía MGB-IPH en la cuenca del río Huallaga, sin descartar la fuente convencional. La simulación con datos de lluvia medida convencionalmente (PLU) exige que el modelo sea calibrado con valores de parámetros extremos para compensar la subestimación de la lluvia. La simulación con datos de lluvia por satélite muestra diferencias significativas: para el caso del producto 3B42 no consigue ajustar los caudales observados ni máximos, ni mínimos en casi todo el periodo de simulación, es decir, presenta índices de desempeño muy por debajo de lo aceptable ($NS < 0,40$). El producto CMORPH consigue una mejora en el ajuste en caudales máximos y mínimos en comparación con el 3B42. Para el caso de MIXTO (corrección de CMORPH con pluviómetros) presenta los mejores índices de desempeño entre los productos de satélite ensayados aunque con diferencias relativas muy altas, mayores al 100% en algunos casos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue realizado gracias a la colaboración de CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por la concesión de la beca de estudios de maestría al primer autor. Agradecer también al Proyecto de Amazonas MMH-FINEP por conceder los mapas de Unidades de respuesta hidrológica, a SENAMHI PERÚ por conceder los datos de lluvia y caudal, y finalmente a NASA y NOAA por conceder gratuitamente la base de datos de lluvia por satélite.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghakouchak, A., Nasrollahi, N. & Habib, E. (2009). Accounting for uncertainties of the TRMM satellite estimates. *Remote Sensing*, 1 (3): 606-619.
- Araújo, A. N. & Guetter, A. K. (2007). Validação da chuva estimada por satélite "CMORPH" na modelagem hidrológica do Alto Iguaçu. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12 (3): 189-198.
- Behrangi, A., Khakbaz, B., Chun, T. J., Aghakouchak, A., Hsu, K. & Sorooshian, S. (2011). Hydrologic evaluation of satellite precipitation products over a mid-size basin. *Journal of Hydrology*, 397 (3-4): 225-237.
- Collischonn, W. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. 250 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Collischonn, W & Tucci, C.E.M. (2001). Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, 6(1): 95-118.
- Collischonn, W. & Tucci, C.E.M. (2003). Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, ABRH, 8(3): 27-39.
- Collischonn, B., Collischonn, W. & Tucci, C.E.M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 360 (1-4): 207-216.
- Gosset, M. (2011). The Megha-Tropiques Sattelite Mission. In: Quatrième réunion scientifique de l'Observatoire de Recherche en Environnement HYBAM sur les fleuves amazoniens, Lima (Pérou) 6-9 Septembre 2011. Présentation en Power Point.
- Hornberger, G.M., Raffensperger, J. P., Wiberg, P. L & Eshleman, K. N. (1998). Elements of Physical Hydrology, Johns Hopkins, Baltimore, Maryland.
- Huffman, G., Adler, R., Bolvin, D., Gu. G.; Nelkin, E., Bowman, K., Hong, Y., Stocker, E. & Wolff, D. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): quasi-global, multiyear, combined sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8 (1): 38-55.

- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A. & Xie, P. (2004). CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *Journal of Hydrometeorology*, 5 (3): 487-503.
- Killeen, T., Douglas, M., Consiglio, T., Jorgensen, P. & Mejia, J. (2007). Dry spots and wet spots in the Andean hotspot. *Journal of Biogeography*, 34(8): 1357-1373.
- Lavado Casimiro, W.S., 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. In: New approaches to hydrological prediction in data-sparse regions symposium (2009: Hyderabad, India). New approaches to hydrological prediction in data-sparse regions: proceedings. Wallingford: IAHS. 245-252pp.
- Levizzani, V., Amorati, R. & Meneguzzo, F. (2000). A review of satellite-based rainfall estimation methods. Bologna: Consiglio Nazionale delle Ricerche Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima. 66 pp.
- Li L., Hong, Y., Wang, J., Adler, Robert F., Policelli, F.S., Habib, S., Irwn, D., Korme, T. & Okello, L. (2009). Evaluation of the real-time TRMM-bases multi-satellite precipitation analysis for an operational flood prediction system in Nzoia basin, Lake Victoria, Africa. *Natural Hazards*, 50 (1): 109-123.
- New, M., Lister, D., Hulme, M. & Makin, I. (2002). A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Research*, 21: 1-25.
- Nóbrega, R.S., Souza, E. P. & Souza F.A.S. (2008). Análise da utilização de dados do satélite TRMM em modelo hidrológico Semidistribuído na bacia do rio Jamari. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 1(1): 47-61.
- Paiva, R.C.D. (2009). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias, estudo de caso: bacia do rio Solimões. 168 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H. V., Irmam, B. & Braithwaite, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system Satellite-Based Estimates of troical rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(9): 2035-2046.
- Su, F., Hong, Y. & Lettenmaier, D. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Analysis (TMPA) and its utility in hydrologic prediction in the La Plata basin. *Journal of Hydrometeorology*, 9 (4): 622-640.
- Yapo, P. O., Gupta, H. V. & Sorooshian, S. (1998). Multiobjective global optimization for hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 234 (3-4): 83-97.