



Análisis espacio temporal de la precipitación en las zonas de montaña de Perú (1998-2007)

Spatio-temporal analysis of rainfall in the mountain regions of Peru (1998-2007)

PEDRO RAU LAVADO^{1,*} & THOMAS CONDOM²

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Universidad, n°100, La Molina, Lima, Perú.

pedro.rau.ing@gmail.com

² Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD - Francia), UMR HydroSciences, Montpellier, calle Teruel, 357, Miraflores, Lima, Perú.

Resumen

Con el objetivo de estimar el comportamiento espacial y temporal de la precipitación sobre las zonas de montaña de los andes peruanos, se analizaron los registros mensuales de precipitación in situ y del satélite TRMM 3B43 (Tropical Rainfall Measuring Mission) del periodo 1998-2007, los cuales fueron comparados en regiones ubicadas sobre los 3000 msnm. En cada región la confiabilidad de los registros TRMM es variable en función de la raíz del error cuadrático medio relativo (%RMSE) y del coeficiente de correlación (%CC). Debido a esta variabilidad de la confiabilidad del TRMM, se propone su corrección mediante el empleo de factores aditivos y multiplicativos. Estos modelos de corrección de los datos TRMM brindan, en la mayoría de las regiones, una mejor aproximación de las precipitaciones mensuales, siendo también verificado para los valores anuales.

Palabras claves: Precipitación, Andes, TRMM 3B43, Perú.

Abstract

Aiming at estimating the spatial and temporal behavior of rainfall over the mountain areas of the Peruvian Andes, in situ monthly rainfall records (1998 - 2007) and the satellite data TRMM 3B43 (Tropical Rainfall Measuring Mission) were analyzed, which were compared to regions located above 3000 m.a.s.l. In each region the reliability of TRMM records varies depending on the root mean squared error ratio (% RMSE) and on the correlation coefficient (% CC). Due to this fluctuation of TRMM data reliability, a correction model is proposed, using additive and multiplicative factors. These correction models show, for most parts of the mountain region, a better approximation of the monthly precipitation values, which is also verified for the annual values.

Key words: Rainfall, Andes, TRMM 3B43, Peru.

INTRODUCCIÓN

En términos del clima, los sistemas montañosos desarrollan un considerable sistema complejo por sí mismos, influenciados por la característica de estrechamiento e incisión profunda de los valles. En su desempeño como almacenadores de agua, las regiones montañosas forman un importante suministro de agua en el periodo seco para las tierras bajas; y así la sociedad en su conjunto percibe cada vez más a las montañas como fuentes de agua, que abastecen a gran parte de la población mundial con recursos hídricos (Schaeffli et al. 2005). La base teórica para la comprensión de la precipitación relacionada a los procesos meteorológicos, fundamentalmente estuvo regida por el "Handbook of Hydrology" (Maidment, 1993). El capítulo 2 de este libro presenta un panorama detallado del sistema climático global abarcando conceptos de la circulación atmosférica, oceánica y procesos combinados y su relación con la precipitación. Beniston et al. (1997) describen la incertidumbre que reflejan los registros de temperatura y precipitación a diferentes escalas asociados a la complejidad de los fenómenos climáticos y la orografía. Pouyaud et al. (2003) han investigado los glaciares y su relación con los recursos hídricos en la cuenca del río Santa, situada en los Andes del Norte de Perú, utilizando un modelo hidrológico simple a paso de tiempo anual. Se presenta en este estudio una regionalización de la cuenca en base a la relación lineal entre precipitación y altitud. Garreaud et al. (2003) publican un artículo referido al clima en el Altiplano, presentando las condiciones actuales y los mecanismos de los cambios pasados (efecto de la variación orbital y glacial).

El presente estudio se enfoca sobre las zonas montañosas de Perú (con altitud superior a 3000 msnm) y que forman parte de los Andes del Norte (Cordilleras Blanca y Negra) y Andes Centrales (Cordillera Occidental, Central y Oriental), cubriendo una importante extensión de los Andes peruanos. Las cuencas hidrográficas peruanas que nacen en estas cordilleras son las siguientes: ríos Santa, Huarmey, Fortaleza, Pativilca, Alto Marañón, Mantaro, Ocoña, Camaná, Quilca, Apurímac y Urubamba.

Actualmente, hay una limitada comprensión de las múltiples interconexiones existentes entre el clima y la hidrología de las zonas de montaña (Beniston et al., 1997). Este problema es el punto de partida para la elaboración de esta investigación. Es sabido que se tiene pocos datos en las zonas sobre los 3000 metros por lo cual es necesario contar con una metodología que permita la extrapolación o la exploración espacial de las precipitaciones. Así se propone un análisis de los datos de precipitaciones de dos tipos: datos in situ del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú (SENAMHI) y datos obtenidos desde el satélite que opera bajo el proyecto TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Los datos utilizados en este estudio son mensuales de tipo TRMM 3B43.

El primer radar de precipitación lanzado a bordo de este satélite, como parte de la misión de medición de la lluvia tropical (TRMM) en 1997, generó las primeras mediciones continuas de la precipitación para todas las regiones tropicales, siendo el precursor de la misión de medición de la precipitación global (Global Precipitation Measurement, GPM). Gracias a su ángulo de observación, el radar de precipitación del satélite TRMM genera mejores descripciones de la estructura vertical de las tormentas que el radar terrestre. Además, no exhibe problemas de alcance como variaciones de sensibilidad o variaciones regionales de calibración del radar. El empleo de datos obtenidos por el satélite TRMM y la comparación con datos de terreno, se basó inicialmente en la metodología desarrollada en la publicación de Franchito et al. (2009), aplicado a todo el territorio de Brasil. En Franchito et al. (2009) se analizó un registro de tres años, obteniéndose una buena correlación estacional entre los datos TRMM y la precipitación obtenida en las estaciones de medición. El procedimiento propuesto es una metodología de corrección y una validación de los datos TRMM considerando los datos in situ.

Usando los datos TRMM corregidos, se podrá inferir en su validación y el comportamiento espacio-temporal de la precipitación en los andes peruanos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelo de elevación digital de terreno (DEM)

Es obtenido de los datos SRTM (Misión Topográfica Radar Shuttle, NASA-NGA, EEUU), el cual es una misión para la obtención de un modelo digital de elevación de la zona del globo terráqueo comprendida entre 56° S a 60° N, de modo que genere una completa base de cartas topográficas digitales de alta resolución de la Tierra. La resolución equivale a 0.0008° (90 m x 90 m de grilla de resolución). Esta información se encuentra disponible en la base de datos de la página web del CGIAR – CSI, del Consorcio para la Información Espacial. (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>).

Se trabajaron con cuatro cuadrantes que cubren los siguientes límites: Latitud: 5° S hasta 20° S; Longitud: 80° W hasta 70° W.

Para estudiar las zonas altas, donde hay pocos datos disponibles se ha definido el límite topográfico de 3000 msnm desde el formato grid de la data SRTM. También se obtuvo, indirectamente, la delimitación de las principales cuencas hidrográficas que sirvieron de referencia para la verificación de la ubicación de las estaciones meteorológicas y para la regionalización de éstas.

Información de datos de precipitación in situ

Se trabajó con la información (provista por el SENAMHI) de estaciones ubicadas en las

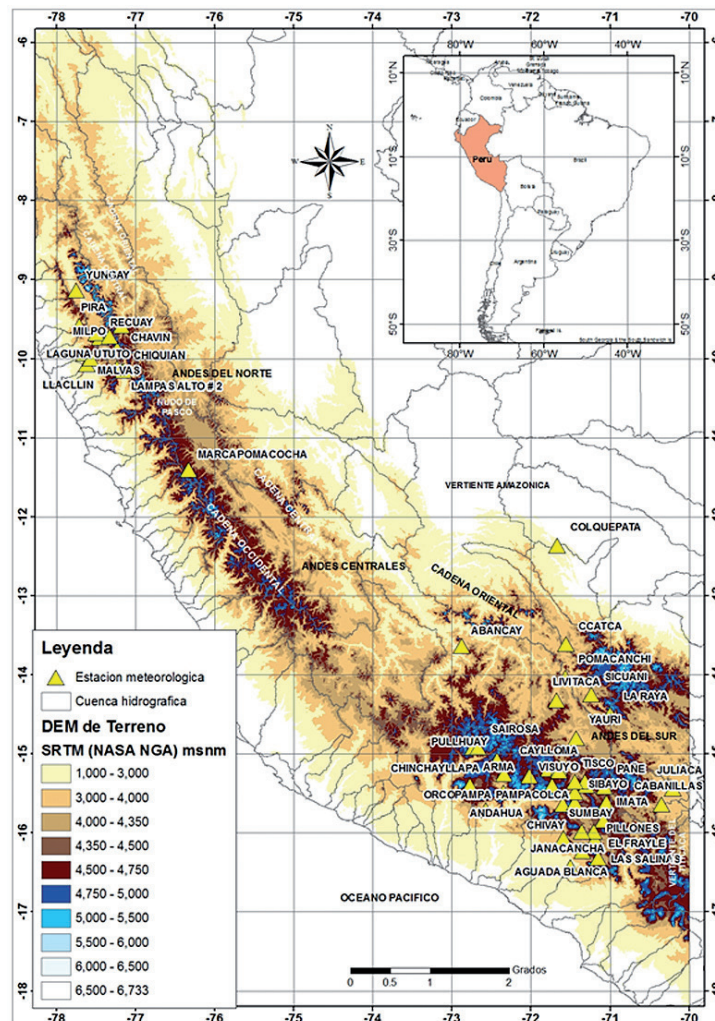


Fig. 1. Plano altitudinal y ubicación de estaciones meteorológicas (datos in situ, SENAMHI), las altitudes provienen del modelo de elevación digital del terreno SRTM con 90 m de resolución.

cuencas hidrográficas de los ríos Santa, Huarmey, Fortaleza, Pativilca y Alto Marañón en los Andes del Norte y de los ríos Mantaro, Ocoña, Camaná, Quilca, Apurímac y Urubamba en los Andes Centrales, un total de 49 estaciones pluviométricas (PLU). La distribución de las estaciones se ha basado en el modelo digital de terreno SRTM que se muestra en la Fig. 1.

Las estaciones se ubican sobre los 3000 msnm y también sobre los 2500 msnm en casos excepcionales (estaciones de Abancay y Yungay). Las mediciones in situ efectuadas por SENAMHI, encajan en la categoría del error por muestreo que incluyen desde los errores en el manejo de los equipos, por parte del personal en campo, hasta el efecto de los fenómenos climáticos en la medición, como es el caso del viento; el cual “se considera como el factor que contribuye a tener mayor error en las mediciones pluviométricas”. (Franchito et al., 2009).

Datos TRMM y obtención de precipitación por percepción remota

Para la presente investigación se emplearon los datos mensuales TRMM 3B43, los cuales se encuentran libremente disponibles desde la base de datos de la NASA (http://trmm.gsfc.nasa.gov/data_dir/data.html). La serie de tiempo analizada va desde enero de 1998 hasta diciembre del 2007. El algoritmo 3B43 proporciona la mejor estimación de la precipitación total mensual en un registro completo desde 1998 hasta el 2007. Especialmente, estos registros abarcan grillas de 0.25 x 0.25 grados cubriéndose aproximadamente 770 km² de área por cada grilla.

Estos datos, producto del algoritmo 3B43, por hallarse comprimidos en formatos HDF fue necesario el procesamiento computacional para la obtención de los registros. Para ello se empleó un código libre (Collischonn, 2005) que procesa los archivos en forma matricial, convirtiendo cada grilla TRMM en una serie de precipitación de fácil manejo.

Los tipos de errores comunes a las mediciones TRMM son debido a la característica de la toma de muestras discreta. El satélite TRMM es de órbita baja de aproximadamente 350 km de altitud, los sensores de lluvia muestrean la atmósfera regional solo a intervalos de tiempo discretos que a veces no permiten captar las tormentas de duración corta. Muchos estudios han mostrado que el rango de errores de muestreo temporal es desde ± 8 hasta $\pm 12\%$ por mes para la precipitación media (Shin & North, 1988; North & Nakamoto, 1989; Bell et al., 1990).

Métodos de análisis de las precipitaciones Análisis de la información de precipitación in situ

La completación de datos de precipitación in situ mensual se realizó considerando la teoría de la media y el ruido asociado a una serie estandarizada, donde el valor “x” a completar estaría dado por la siguiente relación.

$$x = \bar{x} + \sigma(\delta) \quad (1)$$

Donde:

\bar{x} : Media del registro, σ : Desviación estándar del registro, δ : Ruido asociado, obtenido de una distribución estandarizada $N(0,1)$. Con fines prácticos: δ es un valor muy pequeño, demostrándose que el dato completado es la media del mes. De este modo, quedaría el registro de los datos in situ, resuelto para poder emplearse en comparaciones posteriores.

Regionalización

De acuerdo a las condiciones geomorfológicas, la región de estudio puede agruparse en dos sectores bien definidos correspondientes a los Andes del Norte y Centrales. La delimitación de cuencas sirvió como base para la identificación de las barreras naturales entre la vertiente del Pacífico, Amazonas y Titicaca. Finalmente, en función de una correlación aceptable de la precipitación media total anual con la altitud, longitud y latitud, se pudo agrupar las estaciones en 9 regiones representativas.

Tabla 1. Estaciones de precipitación in situ (SENAMHI) y correspondencia con las celdas de la grilla TRMM.

REGION	ESTACION	GRILLA TRMM	Periodo Común
R1: SANTA	YUNGAY	7787912 / 7762912	1998 - 2007
	RECUAY	7737962	1998 - 2007
	MILPO	7712987	1998 - 2006
R2: PACIFICO NORTE	PIRA	7762962	1998 - 2006
	MALVAS	7762987	1998 - 2007
	CHIOQUIAN	77121012	1998 - 2007
R3: COLCA	ORCOPAMPA	72371537	1998 - 2007
	ANDAHUA	72371537	1998 - 2007
	PAMPACOLCA	77621562	1998 - 2007
	CHIVAY	71621562	1998 - 2007
	SIBAYO	71371537	1998 - 2007
	TISCO	71371537	1998 - 2007
	PORPERA	71371537	1998 - 2007
R4: QUILCA	JANACANCHA	71621637 / 71371637	1998 - 2002
	PAMPA DE ARRIEROS	71621612	1998 - 2007
	LAS SALINAS	71121637	1998 - 2007
	EL FRAYLE	71121612	1998 - 2007
	SUMBAY	71371587	1998 - 2007
	PILLONES	71121587	1998 - 2007
	IMATA	71121587	1998 - 2007
R5: APURIMAC	LA ANGOSTURA	71621512	1998 - 2007
	YAURI	71371487	1998 - 2007
	ABANCAY	72871362	1998 - 2007
R6: URUBAMBA	SICUANI	71121437 / 71121412	1998 - 2007
	POMACANCHI	71621412	1998 - 2007
	CCATCA	71621362	1998 - 2007
	COLQUEPATA	71621237	1998 - 2007
R7: OCOÑA	CHINCHAYLLAPA	72621487	1998 - 2007
	PULLHUAY	72371512	1998 - 2007
R8: MANTARO	MARCAPOMACOCHA	76371137	1998 - 2007
R9: ALTO MARAÑON	CHAVIN	7712962	1998 - 2007

En la sección siguiente, se compara los registros de precipitación in situ y TRMM 3B43. La Tabla 1 muestra la disponibilidad de estaciones y el periodo de comparación entre los registros de precipitación in situ y TRMM. En total se trabaja con 31 estaciones, los cuales cumplen requisitos de correspondencia espacial y temporal con los datos TRMM 3B43.

Para la comparación de las dos fuentes de datos se emplea la ecuación 2.

$$\Delta P_i = \mu_{\text{TRMM}_i} - \mu_{\text{SENAMHI}_i} \quad (2)$$

Donde:

i = número del mes (1, 2, ..., 12)

μ_{TRMM_i} = media del registro TRMM para el mes i

μ_{SENAMHI_i} = media del registro SENAMHI para el mes i

Obtención de patrones comunes entre la precipitación in situ y TRMM

En un paso inicial, se realiza el análisis de histogramas de frecuencia a todo el conjunto de datos de precipitación total mensual in situ y TRMM por cada mes y región. Se visualiza su comportamiento probabilístico y su comparación a una distribución normal para la determinación de potenciales

similitudes probabilísticas entre los puntos y celdas de correspondencia y facilitar el empleo de pruebas estadísticas.

Un segundo paso, corresponde a la estimación de errores. La confiabilidad de las estimaciones del TRMM sobre cada estación in situ perteneciente a cada una de las 9 regiones, será validada con el Error Medio relativo (%MBE), el Error Medio Absoluto relativo (%AE) y la Raíz del Error Cuadrático Medio relativo (%RMSE).

El error medio (MBE) corresponde a las diferencias entre la precipitación total mensual estimada por TRMM y la precipitación total mensual medida por SENAMHI.

$$MBE = \frac{\sum (P_{TRMM_i} - P_{SENAMHI_i})}{N} \quad (3)$$

P_{TRMM_i} : Precipitación estimada por TRMM en el mes i (mm/mes)

$P_{SENAMHI_i}$: Precipitación medida por SENAMHI en el mes i (mm/mes)

i : mes de la serie continua (1998-2007)

N : Número de pares comparados.

La raíz del error cuadrático medio (RMSE) corresponde a la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado entre la precipitación total mensual estimada por TRMM y la precipitación total mensual observada.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_{TRMM_i} - P_{SENAMHI_i})^2}{N}} \quad (4)$$

El error medio absoluto (AE), es el promedio de las diferencias absolutas entre la precipitación estimada y medida. Los errores anteriores representan los mejores parámetros de estimación y sugieren una mejora en la exactitud de estas estimaciones y mediciones, en comparación con otros parámetros clásicos de estimación, como lo es, el error cuadrático medio, el cual es sensible a estimar grandes errores para la precipitación (Franchito, et al, 2009).

Estos errores son denominados absolutos y

mantienen la unidad de medición en mm. Los errores absolutos no indican de forma clara qué valor o rango de valores se podrían considerar confiables cuando se consideran regiones que presentan rangos diversos de valores de precipitaciones. Para ello, estos errores absolutos fueron divididos entre la media del registro de precipitación in situ (SENAMHI) en cada región y por cada mes. De esta forma, se obtienen los errores relativos expresados en porcentajes: el error medio relativo (%MBE), el error absoluto relativo (%AE) y la raíz del error cuadrático medio relativo (%RMSE). En este análisis el %RMSE y %MBE son usados para determinar los componentes sistemáticos y aleatorios del error en los datos TRMM (Adeyewa & Nakamura, 2003). El parámetro %RMSE es usado para evaluar la confiabilidad de cada fuente de dato en las diferentes estaciones. Cuando el RMSE de la precipitación estimada es menor al 50% de la cantidad de precipitación medida, esa estimación es confiable. Por otro lado cuando el RMSE es igual o mayor que el 50% de la magnitud de la precipitación de referencia, la estimación es considerada no confiable para dicha región. (Franchito et al., 2009)

En un tercer paso, se establece una relación cuantitativa entre estas dos fuentes de información en base a la estimación del coeficiente de correlación de una regresión lineal con intersección en el eje de coordenadas. Las correlaciones son significativas ($p > 0.01$) cuando presentan un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.7.

El tipo de distribución probabilística, en todas las estaciones de precipitación SENAMHI, presenta una fuerte asimetría negativa debido a la presencia de un amplio rango de precipitaciones mínimas y de valor “cero” en los periodos secos. Esta asimetría disminuirá al convertir los datos a logaritmos naturales, incrementado en la unidad. Esta transformación es posible con la ecuación (5):

$$\text{Precipitación transformada} = \text{Log}(\text{Precipitación} + 1) \quad (5)$$

Según la teoría estadística aplicada a la

precipitación, estas transformaciones son válidas. Jones & Hulme (1996) transforman estos datos como un porcentaje de la media y desviación estándar. Diaz et al. (1989) y Hutchinson (1995) validan la transformación en términos de algunas otras distribuciones incluida la logarítmica. Los registros TRMM presentan en su mayoría el mismo comportamiento asimétrico negativo, para lo cual es necesario una transformación. Seguidamente se propone realizar estas dos ecuaciones del tipo aditivo y multiplicativo.

Modelos de corrección de los datos TRMM 3B43

Modelo aditivo

La obtención de un patrón común del TRMM en función de la información SENAMHI, haría posible la corrección de los registros TRMM utilizando la ecuación (6).

$$\Delta P_i = \mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})} - \mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})} \quad (6)$$

i = número de mes (1,...,12)

$\mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})}$ = media del registro SENAMHI transformado para el mes i

$\mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})}$ = media del registro TRMM transformado para el mes i

Con la obtención de un vector mensual F_1 como patrón común, la ecuación 6 se representaría de la siguiente forma (eq. 7):

$$\mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})} - \mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})} = F_{1i} \quad (7)$$

Este vector F_1 se aplicará a cada valor del TRMM. Cada elemento del vector estará representado por f_{1i} .

Finalmente, se obtienen los valores de precipitación total mensual TRMM corregida, para cada mes de los 10 años de registro (1998-2007), obtenidos con la siguiente ecuación (eq. 8):

$$\text{TRMM}_{i,cj} = \sqrt{f_{1i} \text{TRMM}_j + 1} - 1 \quad (8)$$

$\text{TRMM}_{i,cj}$ = Precipitación TRMM corregida para el mes i del año j

i = número de mes (1,...,12)

j = año de la serie (1998, 1999,...,2007)

Modelo multiplicativo

Otra manera de corregir los datos TRMM originales es usando el modelo multiplicativo (eq. 9).

$$\Delta P_i = \frac{\mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})}}{\mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})}} \quad (9)$$

i = número de mes (1,...,12)

$\mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})}$ = media del registro SENAMHI transformado para el mes i

$\mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})}$ = media del registro TRMM transformado para el mes i

Con la obtención de un vector mensual F_2 como patrón común, la ecuación 9 se representaría de la siguiente forma:

$$\frac{\mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})_i}}{\mu_{\log(\text{TRMM}_{i+1})_i}} = F_{2i} \quad (10)$$

$\mu_{\log(\text{SENAMHI}_{i+1})}$ = media del registro SENAMHI transformado para el mes i
 i = mes de la serie histórica continua (1, 2,...,12)

Este vector F_2 se aplicará a cada dato de grilla del TRMM. Cada elemento del vector estará representado por f_{2i} (ver eq. 10)

Finalmente, se obtienen los valores de precipitación total mensual TRMM corregida para cada mes a lo largo de los 10 años de registro (1998-2007), obtenidos con la siguiente ecuación:

$$\text{TRMM}_{i,cj} = \sqrt{f_{2i} \text{TRMM}_j + 1} - 1 \quad (11)$$

$\text{TRMM}_{i,cj}$ = Precipitación TRMM corregida para el mes i del año j

i = número de mes (1, 2,...,12)

j = año de la serie (1998, 1999...2007)

Las ecuaciones 8 y 11 son modelos

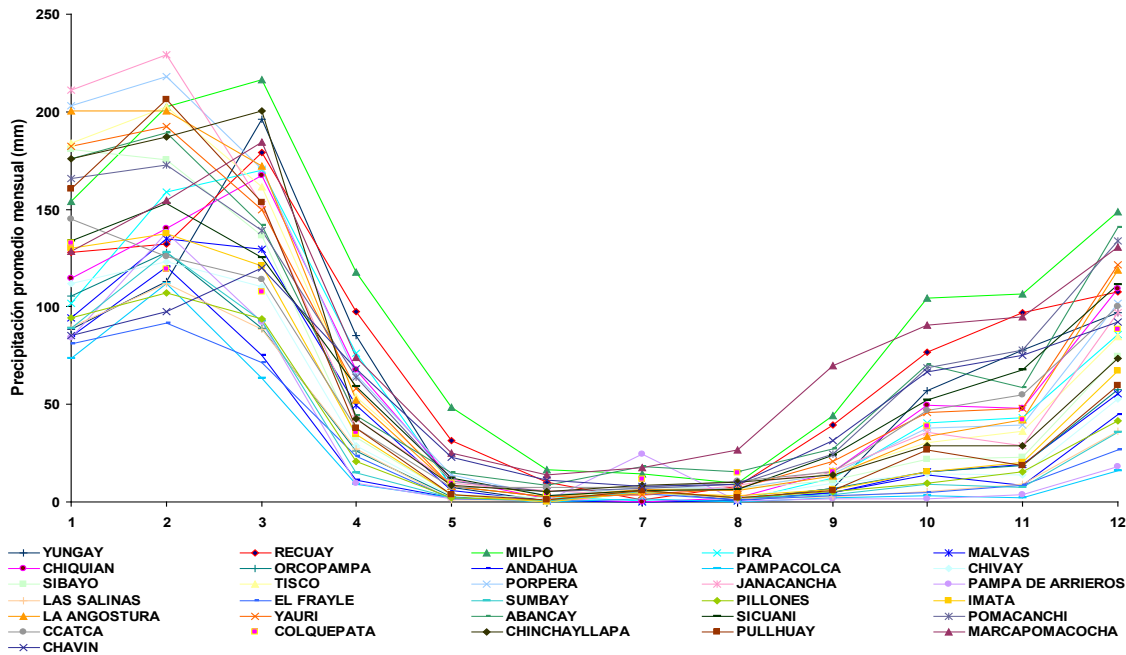


Fig. 2. Régimen pluviométrico estacional en las 31 estaciones in situ, en el eje X se presenta los meses de 1 (enero) hasta 12 (diciembre).

propuestos para la corrección de los datos TRMM en la zona de los Andes Centrales y parte de los Andes del Norte. Dichos valores corregidos serán verificados con la teoría de errores, el coeficiente de correlación y la pendiente de la ecuación de regresión lineal sin término constante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación in situ

A continuación se presenta el comportamiento de las precipitaciones in situ a una escala mensual (Fig. 2). Se puede apreciar un comportamiento estacional con precipitaciones medias mensuales que varían desde los 0 mm/mes, en los meses secos junio, julio y agosto para las estaciones de la zona Pacífico Norte (cuenca de los ríos Fortaleza, Huarmey, Casma y Pativilca) y parte de la cuenca del Colca y Quilca más próximos al Pacífico, hasta precipitaciones medias mensuales máximas de alrededor de los 200 mm/mes durante el mes de enero (centro de la época húmeda) para la zona de la cuenca del Apurímac y Urubamba

Región	Variable(s) con mayor influencia	Gradiente
Santa	Altitud	+
	Latitud	-
	Longitud	+ al oeste de Querococha y - al este de Querococha
Pacífico Norte	Altitud	-
	Latitud	+
Pacífico Sur	Altitud	+ en todas las subregiones
	Latitud	+ paralelo en dos subregiones
	Longitud	+ en la cuenca del Colca
Apurímac	Altitud	+ en dos subregiones
	Latitud	+
Urubamba	Latitud	-

Tabla 2. Gradientes de precipitación en función de la altitud, latitud y longitud sobre las regiones analizadas. Gradiente positivo (+): indica la relación directa entre la variable y la precipitación media total anual. Gradiente negativo (-): indica la relación inversa entre la variable y la precipitación media total anual.

próximos a la vertiente amazónica (zona de selva). Se presenta el cuadro resumen de las variables de influencia sobre la precipitación media total anual en cada región con respecto al incremento de la altitud, con respecto a la variación de la latitud en sentido Sur a Norte y con respecto a la longitud en sentido Oeste a Este. La altitud y latitud tienen una influencia muy notoria en todas regiones (ver Tabla 2).

Precipitaciones in situ y TRMM

La Tabla 3 muestra la confiabilidad de los datos TRMM originales (sin corrección) en

cada región. Esta confiabilidad está definida por la raíz del error cuadrático medio relativo (%RMSE) menor al 50% y un coeficiente de correlación mayor a 0.7. Con respecto al %MBE se obtuvo valores negativos en su mayor parte para los meses húmedos, lo cual indica que en este período la precipitación TRMM subestima las precipitaciones in situ, el caso contrario se aprecia en los meses secos, donde se obtiene un %MBE positivo. El error medio absoluto relativo (%AE) presenta valores por debajo del 50% en los meses húmedos (noviembre hasta abril). La Fig. 3, muestra el comportamiento estacional de las diferencias

Tabla 3. Confiabilidad del TRMM 3B43 original en cada región. Las regiones en gris representan el periodo confiable válido del TRMM. * Coeficiente de correlación (%CC) no significativo para una prueba t-Student de dos colas a un nivel de confianza del 99%. Pero sí es significativo para un 95% de confianza.

REGION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
R1 SANTA	✓	✓	✓	✓	X	X*	X*	X*	X	X	✓	✓
R2 P. NORTE	✓	✓	✓	✓	X	X*	X	X*	X	✓	✓	✓
R3 COLCA	X	X	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	X
R4 QUILCA	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
R5 APURIMAC	✓	✓	✓	✓	X	X	X	✓	✓	✓	✓	✓
R6 URUBAMBA	✓	✓	X	X	X	X*	X	X	X	X	X	X
R7 OCOÑA	✓	✓	✓	✓	X	X*	X	X	X	X	✓	✓
R8 MANTARO	✓	✓	✓	✓	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓
R9 CHAVIN	✓	✓	✓	✓	✓	X*	✓	✓	✓	✓	✓	✓

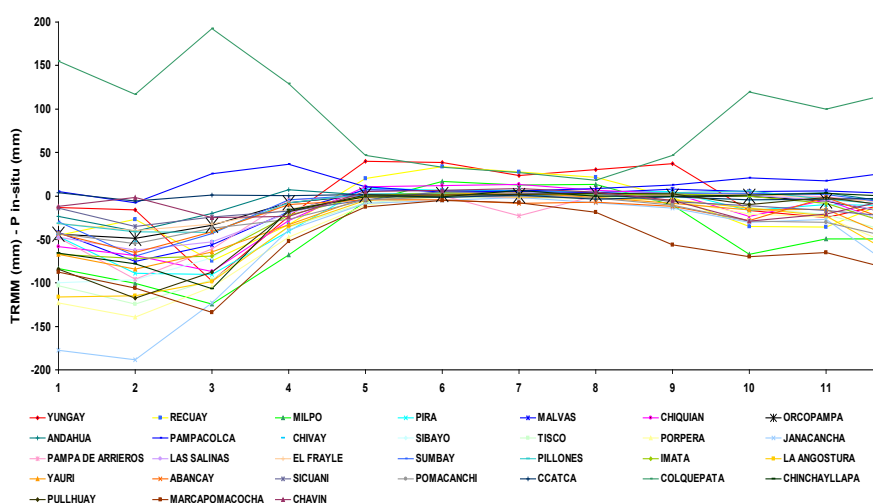


Fig. 3. Variación estacional de las diferencias entre los datos TRMM y datos in situ, en el eje X se presenta los meses de 1 (enero) hasta 12 (diciembre). En general hay una subestimación de los datos TRMM con respecto a los datos in situ en el periodo húmedo a excepción de las estaciones Colquepata y Pampacolca.

aritméticas entre los datos TRMM y los datos in situ. En esta figura se observa que en la estación Colquepata, perteneciente a la región Urubamba que se halla más próxima a la vertiente amazónica y en la estación Pampacolca (región Colca) que se halla más próxima al Pacífico, los datos TRMM sobreestiman los datos in situ para el periodo húmedo, siendo un comportamiento contrario a las demás estaciones.

Corrección de las fuentes de información TRMM 3B43

Modelos aditivo y multiplicativo

La validación de estos modelos fue posible con la estimación de la raíz del error cuadrático medio relativo (%RMSE), el

coeficiente de correlación (%CC) y la pendiente de una regresión lineal sin término constante. A continuación las Fig. 4 y 5, muestran a modo de ejemplo la dispersión entre los datos SENAMHI, TRMM originales y TRMM corregidos por el modelo aditivo y multiplicativo en un mes húmedo, enero y un mes seco, julio en la región R2 (Pacífico Norte).

Los resultados para la región 2 (Fig. 4) muestra que el modelo aditivo aproxima la pendiente lineal a la unidad, corrigiendo de este modo la pendiente con los datos TRMM originales de 0.509. El modelo multiplicativo logra corregir la pendiente en un valor de 0.830. El coeficiente de determinación (R²) es superior a 0.8 en todos los casos.

Los resultados para la región 2 (Fig. 5) muestran que ambos modelos logran

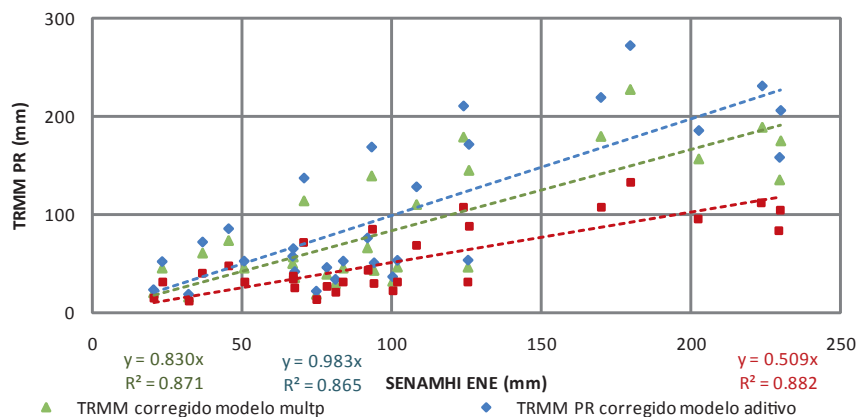


Fig. 4. Regresión lineal sin término constante entre los datos SENAMHI, TRMM corregido con el modelo aditivo y multiplicativo en el mes de enero sobre la región R2.

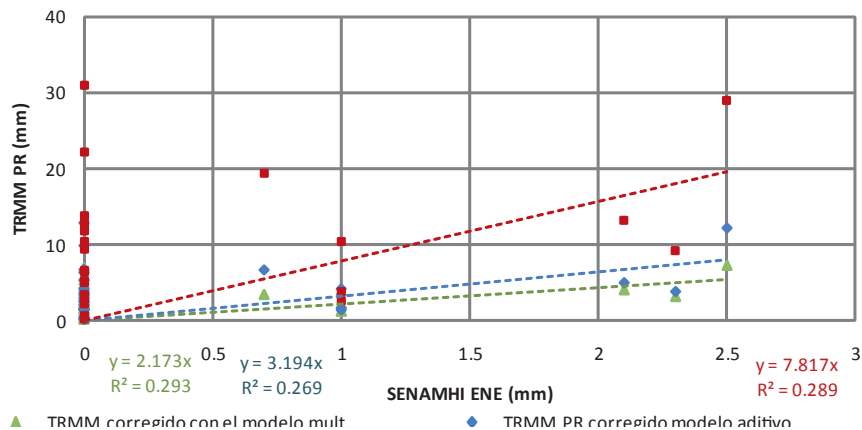


Fig. 5. Regresión lineal sin término constante entre los datos SENAMHI, TRMM corregido con el modelo aditivo multiplicativo en el mes de julio sobre la región R2.

disminuir la pendiente inicial de 7.82. El modelo multiplicativo logra corregir la pendiente en un valor de 2.17, sin llegar a la unidad por lo cual ambas correcciones serán insuficientes. El coeficiente de determinación

(R2) se encuentra por debajo de 0.3 (valor no significativo). Esta corrección insuficiente entre los datos corregidos TRMM y los datos in situ puede ser considerada menos grave cuando se considera los balances

Tabla 4. Resumen de la validez a nivel mensual de los datos TRMM originales sin corrección “S/C”, datos TRMM corregidos con el modelo aditivo “A” y los datos TRMM corregidos con el modelo multiplicativo “M”; ✓: Confiabilidad de los datos TRMM. X: No confiabilidad de los datos TRMM. El valor numérico indica la pendiente o coeficiente de la precipitación media in situ, obtenido con una regresión lineal sin término constante con los datos TRMM originales, TRMM corregidos con el modelo aditivo y multiplicativo. En color gris se encuentran los valores cuya confiabilidad está verificada con todos los parámetros empleados (%RMSE, %CC y pendiente). La pendiente debe ser superior a 0.7 y no excederse de 1.3, una pendiente cercana a la unidad será la mejor aproximación.

REGION	MODELO	ENE		FEB		MAR		ABR		MAY		JUN	
R1 SANTA	S/C	✓	0.55	✓	0.57	✓	0.40	✓	0.41	X	1.01	X	1.50
	A	✓	1.02	✓	1.10	✓	0.80	✓	0.65	X	0.87	X	0.83
	M	✓	0.92	✓	0.99	✓	0.73	✓	0.63	X	0.51	X	0.27
R2 P.NORTE	S/C	✓	0.51	✓	0.42	✓	0.47	✓	0.47	X	1.49	X	0.88
	A	✓	0.98	✓	0.82	✓	0.95	✓	0.75	X	1.24	X	0.43
	M	✓	0.83	✓	0.70	✓	0.85	✓	0.70	X	0.81	X	0.24
R3 COLCA	S/C	X	0.49	X	0.47	X	0.48	X	0.34	X	0.29	X	0.61
	A	✓	0.89	✓	0.88	X	0.99	X	0.54	X	0.23	X	0.15
	M	✓	0.80	✓	0.78	X	0.85	X	0.47	X	0.19	X	0.20
R4 QUILCA	S/C	X	0.40	X	0.36	X	0.38	X	0.24	X	0.44	X	0.14
	A	X	0.76	✓	0.69	✓	0.79	X	0.42	X	0.34	X	0.04
	M	X	0.64	X	0.58	✓	0.63	X	0.33	X	0.30	X	0.05
R5 APURIMAC	S/C	✓	0.59	✓	0.53	✓	0.54	✓	0.39	X	0.47	X	0.52
	A	✓	1.07	✓	0.98	✓	1.09	✓	0.62	X	0.38	X	0.19
	M	✓	1.00	✓	0.91	✓	0.98	✓	0.56	X	0.29	X	0.16
R6 URUBAMBA	S/C	✓	1.10	✓	0.96	X	1.12	X	0.97	X	1.31	X	1.24
	A	X	1.98	X	1.77	X	2.23	X	1.54	X	1.11	X	0.56
	M	X	1.98	X	1.71	X	2.20	X	1.55	X	0.69	X	0.26
R7 OCOÑA	S/C	✓	0.48	✓	0.45	✓	0.38	✓	0.37	X	0.57	X	0.41
	A	✓	0.86	✓	0.83	✓	0.76	✓	0.58	X	0.47	X	0.17
	M	✓	0.80	✓	0.76	✓	0.68	✓	0.52	X	0.37	X	0.15
R8 MANTARO	S/C	✓	0.27	✓	0.30	✓	0.25	✓	0.30	✓	0.44	✓	0.48
	A	✓	0.50	✓	0.58	✓	0.50	✓	0.50	✓	0.21	✓	0.39
	M	✓	0.42	✓	0.49	✓	0.42	✓	0.43	✓	0.12	✓	0.27
R9 CHAVIN	S/C	✓	0.84	✓	0.88	✓	0.78	✓	0.56	✓	1.17	X	0.56
	A	X	1.58	X	1.71	X	1.56	✓	0.90	X	1.00	X	0.30
	M	X	1.40	X	1.53	X	1.43	✓	0.85	✓	0.63	X	0.13

Tabla 4. Continuación

REGION	MODELO	JUL		AGO		SEP		OCT		NOV		DIC	
R1 SANTA	S/C	X	1.27	X	1.29	X	0.67	X	0.35	✓	0.42	✓	0.74
	A	X -	0.65	X -	0.81	X -	0.60	X -	0.36	✓ -	0.43	✓ +	1.07
	M	X -	0.30	X -	0.41	X -	0.40	X +	0.27	X +	0.32	✓ +	0.99
R2 P.NORTE	S/C	X	7.82	X	1.09	X	0.82	✓	0.57	✓	0.66	✓	0.77
	A	X -	3.19	X -	0.59	X -	0.72	X +	0.60	✓ -	0.66	✓ +	1.13
	M	X -	2.17	X -	0.41	X -	0.52	✓ -	0.45	✓ +	0.51	✓ -	1.02
R3 COLCA	S/C	X	0.74	X	0.51	X	0.67	X	0.47	X	0.38	X	0.48
	A	X +	0.16	X -	0.25	X -	0.57	X -	0.49	X -	0.38	X -	0.69
	M	X +	0.07	X -	0.22	X -	0.44	X +	0.38	X +	0.31	X -	0.61
R4 QUILCA	S/C	X	0.10	X	0.45	X	0.59	X	0.44	X	0.34	X	0.36
	A	X +	0.02	X -	0.21	X -	0.49	X +	0.46	X -	0.34	X -	0.52
	M	X +	0.01	X -	0.21	X -	0.39	X -	0.36	X +	0.28	X -	0.44
R5 APURIMAC	S/C	X	0.60	✓	0.48	✓	0.53	✓	0.54	✓	0.65	✓	0.57
	A	X +	0.21	X +	0.25	✓ +	0.45	✓ -	0.57	✓ -	0.65	✓ -	0.81
	M	X +	0.10	X +	0.19	X +	0.33	✓ +	0.43	✓ +	0.50	✓ -	0.75
R6 URUBAMBA	S/C	X	1.25	X	1.12	X	0.84	X	1.06	X	0.93	X	0.94
	A	X -	0.56	X -	0.66	X -	0.74	X +	1.10	X +	0.93	X +	1.34
	M	X -	0.18	X -	0.35	X -	0.50	X +	0.80	X -	0.69	X +	1.27
R7 OCOÑA	S/C	X	1.38	X	0.64	X	0.61	X	0.46	✓	0.73	✓	0.70
	A	X -	0.38	X -	0.36	X -	0.53	X -	0.48	✓ -	0.74	✓ +	1.01
	M	X +	0.08	X -	0.25	X -	0.37	X +	0.37	✓ -	0.58	✓ +	0.91
R8 MANTARO	S/C	✓	0.54	✓	0.30	✓	0.16	✓	0.24	✓	0.31	✓	0.33
	A	✓ +	0.23	✓ +	0.17	✓ +	0.14	✓ -	0.25	✓ -	0.31	✓ -	0.48
	M	✓ +	0.13	✓ +	0.12	✓ +	0.11	✓ +	0.19	✓ +	0.24	✓ -	0.42
R9 CHAVIN	S/C	✓	1.41	✓	0.95	✓	0.66	✓	0.46	✓	0.70	✓	0.94
	A	✓ -	0.66	✓ -	0.57	✓ -	0.59	✓ -	0.48	✓ -	0.71	X +	1.35
	M	✓ -	0.28	✓ +	0.33	✓ +	0.41	✓ +	0.36	✓ +	0.54	X +	1.26

hídricos mensuales porque el periodo seco, en general, solo representa una pequeña parte de la lluvia anual.

El análisis anterior se resume en los siguientes cuadros de aplicabilidad de los modelos de corrección para los datos TRMM (Tabla 4). También se evalúa el incremento del %RMSE con el modelo aditivo o multiplicativo con respecto al %RMSE de los TRMM originales representados por el signo (+). La disminución del %RMSE con el modelo aditivo o multiplicativo con respecto al %RMSE de los TRMM originales está representado con el signo (-).

Otra forma de validación de corrección es el análisis a escala anual, basado en la comparación de la precipitación media total anual en cada región para el periodo 1998-2007, con ello se busca establecer un cierto rango de superestimación o subestimación de los datos TRMM originales, corregidos con el modelo aditivo y multiplicativo respecto a las láminas media totales anuales medidas por SENAMHI.

Los datos TRMM corregidos con el modelo aditivo (TRMM A) se aproximan mucho a los datos in situ medidos por SENAMHI en las

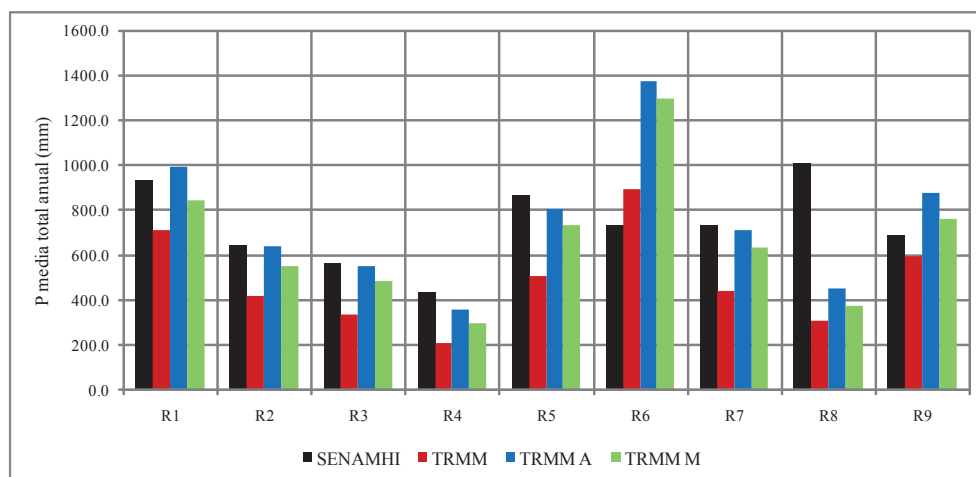


Fig. 6. Precipitaciones medias totales anuales medidas in situ (SENAMHI), estimadas por TRMM sin corrección, corregidas por el modelo aditivo (TRMM A) y multiplicativo (TRMM M).

Tabla 5. Variación en porcentaje (%) de los datos TRMM con respecto a la precipitación media total anual SENAMHI en cada región.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
TRMM	76.3	64.9	59.8	48.5	58.3	122.4	60.3	30.5	86.4
TRMM A	106.2	99.4	98.0	82.2	93.2	187.6	96.7	44.8	127.5
TRMM M	90.8	85.5	86.3	68.6	84.5	176.8	86.7	37.3	111.0

regiones del Santa (R1), Pacífico Norte (R2), Colca (R3), Quilca (R4), Apurímac (R5) y Ocoña (R7). En la región Urubamba (R6) los datos TRMM originales sin corrección tienen mejor aproximación a los datos medidos por SENAMHI. Eso podría ser explicado por la presencia muy cercana de la selva amazónica. En efecto, estaciones in situ de bajas altitudes, menores de 3000 msnm, son utilizadas para la calibración de los datos TRMM 3B43 (Global Precipitation Climatology Project, Inventario de estaciones, 1999). En la región Alto Marañón (R9) se tiene mejor aproximación con el modelo multiplicativo. La región Mantaro (R8) no tiene una buena aproximación con los datos TRMM originales ni corregidos, el porcentaje de aproximación máximo es 44.8% para el modelo aditivo muy por debajo de los porcentajes en las demás regiones. En la Tabla 5, los valores que más se aproximan al 100% están sombreados de color gris.

Para un período anual, la corrección con ambos modelos proporciona un acercamiento a los datos SENAMHI, a excepción de las regiones R6 y R8 (Fig. 6). Para la

región R6 (Urubamba), de clima húmedo, se aprecia que sin necesidad de corrección los datos TRMM están muy cercanos a los datos observados, a la humedad existente de forma permanente en el lugar debido a la influencia muy marcada de la selva amazónica. Para la región R8, los resultados de poca aproximación se deberían a que solo se analizó una estación (estación Marcapomacocha) por ello los resultados obtenidos serán válidos solo para dicha estación.

CONCLUSIONES

La precipitación total mensual en las 31 estaciones SENAMHI (datos in situ) ubicadas sobre los 3000 msnm, mantiene una estacionalidad muy marcada. Los valores elevados se hallan en el período húmedo (enero a marzo) y los más bajos en el período seco (junio a agosto).

En el período de octubre a marzo, los datos in situ son mayores al TRMM, estas diferencias son muy notorias en las

estaciones de Janacancha (R4, región Quilca) y Colquepata (R6, región Urubamba). En el periodo de mayo a agosto, el TRMM sobre estima los datos in situ.

En la región R1 (Santa), el empleo de los datos TRMM originales es confiable solo en el periodo noviembre a abril. Para R2 (Pacífico Norte) en el periodo octubre a abril, con una mejor aproximación en el mes de noviembre. En R3 (Colca) y R4 (Quilca) no es confiable en todos los meses. En R5 (Apurímac) es confiable de agosto a abril. En R6 (Urubamba) solo en los meses de enero y febrero. En R7 (Ocoña) en el periodo de noviembre a abril. En R8 (Mantaro) es aceptable en todos los meses. En R9 (Chavín) no es aceptable solo en el mes de junio. En los meses húmedos existe una buena aproximación de los datos TRMM en contraste del periodo seco donde las estimaciones TRMM no se garantizan con ningún parámetro evaluado.

Dos modelos estadísticos son planteados para la corrección de los datos de TRMM, uno aditivo y otro multiplicativo. El modelo aditivo ofrece buenas aproximaciones en las regiones Santa (R1), Pacífico Norte (R2), Colca (R3), Quilca (R4), Apurímac (R5) y Ocoña (R7). El modelo multiplicativo brinda mejores resultados en la región Alto Marañón (R9).

Existiendo zonas del territorio peruano con escasa cobertura de estaciones pluviométricas, esta validación de los datos TRMM ofrece un mejor entendimiento de la variabilidad espacial de las precipitaciones y el conocimiento de las magnitudes de precipitación que existen en las zonas de montaña.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen mucho a los revisores del presente artículo, Jhan Carlos Espinoza y Waldo Lavado.

BIBLIOGRAFÍA

- Adeyewa, Z. & Nakamura K. (2003).** Validation of TRMM radar rainfall data over climatic regions in Africa. *American Meteorological Society*, 42: 331-347.
- Bell, T., Abdullah, A., Martin, L. & North, G. (1990).** Sampling errors for satellite-derived tropical rainfall: Monte Carlo study using a space-time stochastic model. *J. Geo. Res.*, 95 (D3), 2195-2205.
- Beniston, M., Diaz, H.F. & Bradley, R.S. (1997).** Climatic change at high elevation sites an overview. *Climatic Change*, 36, Kluwer Academic Publishers. Netherlands, 233-251.
- Collischonn, B., Collischonn, W. and Morelli, C. (2008).** Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *Journal of Hydrology*, 330 (1-4): 207-216.
- Franchito S.H., Brahmananda, R., Vasques. A.C., Santo, C.M. & Conforte J.C. (2009).** Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *J. Geophys. Res.* 114 D02105, doi:10.1029/2007JD009580.
- Garreaud, R., Vuille, M. & Clement A. C. (2003).** The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194, 1(3): 5-22.
- Jones, P. & Hulme, M. (1996).** Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Inter. J. Climatology*, 16, 361-377.
- Hutchinson, M. (1995).** Stochastic space-time weather models from ground-based data. *Agric. Forest. Meteor.* 73: 237-265.
- Maidment, D. R. (1993).** *Handbook of Hydrology*. Mc Graw Hill. United States.
- North, G. & Nakamoto, S. (1990).** Formalism for comparing rain estimation designs. *J Atmos. Ocean. Technol.* 6: 985-992.
- Pouyaud, B., Vignon, F., Yerren, J. & Suarez, W. (2003).** Glaciares y Recursos Hídricos en la Cuenca del Santa. IRD, SENAMHI, INRENA-UGRH, EGENOR, report, 41p.
- Schaeffli, B., Hingray, B., Niggli, I. & Musy, A. (2005).** A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences* 9:95-109.
- Shin, K., North, G. (1988).** Sampling errors study for rainfall estimate using a stochastic model. *J. Applied Meteorology*. 27: 1218-1231.