



Sistema de alerta de inundaciones en tiempo casi real usando percepción remota para el río Tumbes en Perú

Near real time flood warning system for the Tumbes river in Peru using remote sensing

LUIS METZGER^{1,*} & YUNQING XUAN²

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

* lmetzger@senamhi.gob.pe

²UNESCO-IHE Institute for Water Education, PO BOX 3015 ,2601 DA Delft, The Netherlands

Resumen

La costa noroeste del Perú es una región que está expuesta a la ocurrencia de fenómenos extremos (inundaciones) que afectan como por ejemplo la ciudad de Tumbes, y ocasionan daños socioeconómicos severos. Estos efectos son con frecuencia atribuidos al impacto de El Niño (ENSO). Por otro lado, el escaso número de estaciones pluviométricas, limita la utilización de sistemas convencionales que dependen de las mediciones in situ de las lluvias. En este estudio, se hace uso de la tecnología de percepción remota como la fuente principal para construir un sistema de alerta de inundación en tiempo casi real basado en web.

La carencia de datos en tiempo casi real de la red de estaciones pluviométricas, no permite un monitoreo y modelamiento óptimo del río Tumbes para propósitos de Alerta Temprana. Este problema se puede superar utilizando la percepción remota como una fuente de datos para la estimación de la lluvia areal.

Para ello se ha creado el modelo Sacramento (SAC-SMA). Es un modelo hidrológico que permite generar descargas diarias en la estación El Tigre. Este modelo recibe las estimaciones de lluvia mejoradas del satélite y de la estación automática. Además, se ha desarrollado un sistema de disseminación basado en web para visualizar los resultados del modelo y mensajes de alerta.

El estudio permite usar la tecnología de percepción remota para el monitoreo de la lluvia en áreas con poca información. La mayor contribución, es la implementación de una nueva metodología "detección del caudal pico" para mejorar la calidad de los datos TRMM.

Palabras claves: ENSO, Sistema de alerta de inundaciones, percepción remota, satélite TRMM-3B42.

Abstract

The northwest coast of Peru is a very sensitive region that is prone to the occurrence of extreme rainfall, such as floods that affect the city of Tumbes and cause severe socio-economic damages. These effects are often attributed to the impact of El Niño Southern Oscillation (ENSO). On the other hand, insufficient number of ground rain gauge stations severely limits the use of conventional systems that highly rely on gauge observation. In this study, remote sensing technology was used as the major source to build a web-based near real-time flood warning system. The lack of near-real-time data from the pluviometric stations does not allow an effective monitoring and modeling of the Tumbes river basin for early warning purposes. This problem can be solved using remote sensing as a source of data for the estimation of areal rainfall.

The Sacramento (SAC-SMA) model is used to generate daily discharges at "El Tigre" station. This hydrologic model receives the improved rainfall estimates from the satellite, as well as from the automatic gauge station. Also, a web-based disseminating system is developed to display the model results and warning messages. This study shows the advantages of using remote sensing technology for monitoring rainfall in areas with limited information. The major contribution of this study is the implementation of a new methodology "flow peak detection" to improve the quality of the TRMM data.

Keywords: ENSO, Flood Warning System, remote sensing, satellite TRMM-3B42.

INTRODUCCIÓN

El régimen de las lluvias en la región andina del Perú está caracterizado por una temporada seca y una temporada húmeda. La temporada húmeda es de diciembre a marzo. Durante el Fenómeno “El Niño” las precipitaciones son intensas y se pueden registrar anomalías muy elevadas como en el caso de la estación Tumbes que en febrero de 1998 registró 701.4 mm lo que representó una anomalía de 1945%. En el norte del Perú los departamentos más afectados son Tumbes, Piura y Lambayeque.

Los registros históricos de descarga, estación El Tigre, en el río Tumbes, indican que durante el periodo 1967-2009 ocurrieron 13 inundaciones de magnitud considerable, eventos que han incrementado su frecuencia e intensidad en los últimos 30 años.

La cuenca Puyango-Tumbes, es una cuenca transnacional y gran parte de ésta pertenece al Ecuador. Por lo cual, para estimar la lluvia, en esta región, se necesita de la información de percepción remota. Dentro del estudio, la información del satélite TRMM 3B42 V6 es usada junto con la de la estación automática El Tigre (Perú), para la estimación de la precipitación media areal en toda la cuenca.

Actualmente, la red de estaciones convencionales del SENAMHI no tiene un sistema de transmisión de información en tiempo casi real, solo existe la estación automática El Tigre, ubicada a la salida de la cuenca, de modo que el área de influencia es muy pequeña. Por otro lado, las mayores precipitaciones ocurren en la parte alta de la cuenca, la cual pertenece a Ecuador. De esto se puede deducir que no hay un monitoreo efectivo de la lluvia en toda la cuenca.

Existe la necesidad de establecer una metodología para estimar la precipitación media areal en tiempo casi real usando la percepción remota y de esta manera se pueda alimentar a un modelo hidrológico

que permita simular el caudal que se podría presentar en el río Tumbes.

El tiempo de respuesta en la cuenca está dado en horas y para que las autoridades puedan tomar una decisión acertada frente a un eminente peligro, es necesario conocer la situación real de las precipitaciones en toda la cuenca.

El mayor interés en este estudio, es validar la calidad de la información de lluvia del satélite TRMM 3B42 V6 a nivel diario. Es importante indicar que estos datos diarios acumulados del satélite (empiezan a las 00Z y terminan a las 21Z) han sido derivados del producto 3B42 V6, cada 3 horas. Asimismo, éstos son archivados, no están disponibles en tiempo casi real, y son importantes porque han sido revisados y sugeridos en la página web de TOVAS, para ser usados con propósitos de investigación.

También se implementó una nueva metodología “detección del caudal pico” para mejorar la calidad de la información diaria del satélite TRMM 3B42 V6, donde se obtuvo buenos resultados. Se espera que esta metodología funcione también con los datos del satélite en tiempo casi real 3B42RT y pueda ser usada operacionalmente en el Sistema de Alerta de Inundaciones. Finalmente se desarrolló una interface básica en formato web para proporcionar información general sobre la cuenca Puyango-Tumbes y visualizar los resultados del modelamiento.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Puyango-Tumbes (Ver Fig. 1) cubre un área de 4750 km², de los cuales 3477 km² (73.2%) pertenecen a Ecuador y 1273 km² (26.8% hasta la estación El Tigre) al Perú. Esta cuenca se ubica entre las latitudes 3°43' S - 4°17' S y las longitudes 80°41' O - 79°23' O. El río Puyango-Tumbes nace en las cumbres de Zaruma (Ecuador) a unos 3800 msnm donde el río es llamado Puyango y está formado por los tributarios de los ríos Amarillo y Calera.

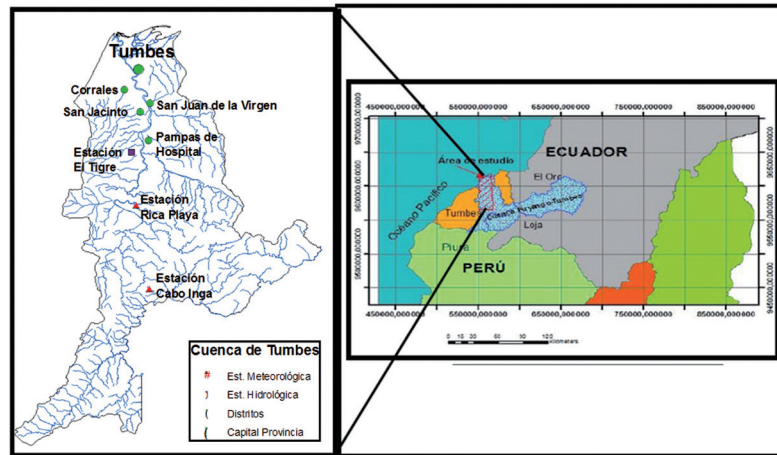


Fig.1. Ubicación de la cuenca Puyango-Tumbes

DATOS Y METODOLOGÍA

Después de hacer una revisión bibliográfica sobre estudios previos relacionados a la calidad y validación de los datos TRMM, se encontró que la mayor parte de ellos han usado una gran cantidad de estaciones para validar la precipitación en grilla del satélite a nivel de país (ver por ejemplo Oke et al., 2009; Hazarika et al., 2007; Islam & Uyeda 2005), motivo por el cual ninguno de estos estudios puede ser aplicado para el caso de Puyango-Tumbes, porque la zona de Perú solo dispone de datos diarios para 3 estaciones: El Tigre, Rica Playa y Cabo Inga (Ver Fig. 1). Por el lado de Ecuador solo se pudo obtener datos de precipitación mensual para la estación Zaruma.

La información horaria de precipitación de la única estación automática El Tigre se convirtió a precipitación diaria para que pueda ser comparada con la estación convencional. Como resultado se determinó que la estación automática ha subestimado los valores de precipitación desde el día en que fue

instalada. Para corregir los datos de la estación automática se hizo una correlación diaria para todo el periodo de información disponible y se obtuvo un R^2 de 0.77 y la ecuación de corrección fue: $Y=2.7528*X + 0.3823$.

También se comparó la información del satélite TRMM 3B42 V6 con las estaciones convencionales a nivel mensual. Para la cuenca Puyango-Tumbes y para una resolución espacial de las grillas del satélite de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ se tienen 6 puntos en la zona de estudio, 2 en Perú (PE1,PE2) y 4 en Ecuador (EC1,EC2,EC3,EC4). Debido a que el punto PE1 está próximo a la estación automática, se decidió mantener la última y por lo tanto descartar PE1. Existen 3 fuentes de datos de precipitación: estación convencional, satélite y estación automática, sin embargo para propósitos operacionales, solo del satélite y de la estación automática fueron usados para el cálculo de la precipitación areal. (Ver Fig. 2). Dos métodos fueron utilizados para estimar la precipitación areal promedio: Aritmético y Thiessen.

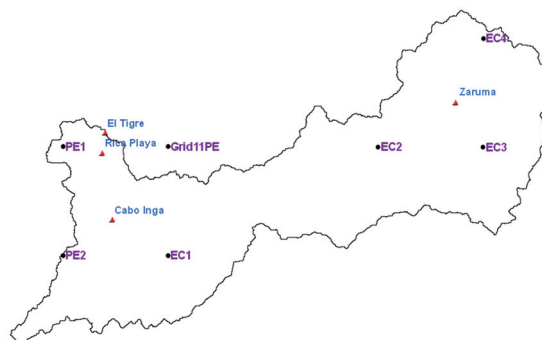


Fig.2. Ubicación de puntos de satélite (lila) y estaciones pluviométricas (azul)

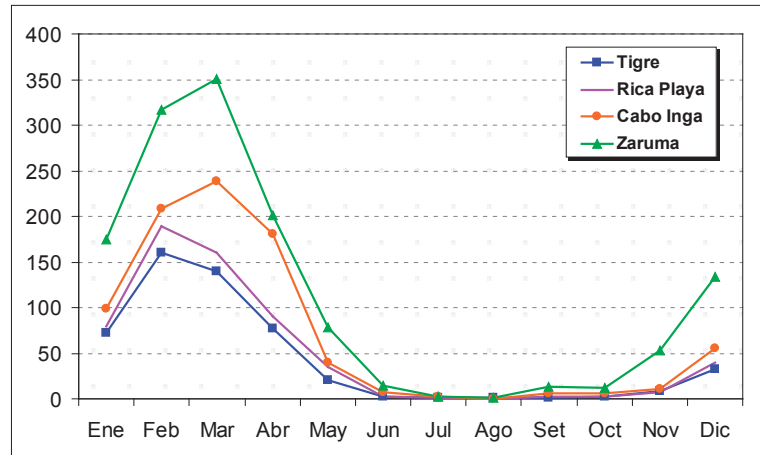


Fig. 3. Precipitación total mensual en estaciones convencionales

El siguiente paso fue clasificar los niveles de inundación, aquí se definen los caudales umbrales que serán usados por el Sistema de alerta de inundaciones para identificar el tipo de alerta que será emitida.

Esta clasificación fue desarrollada basando en dos criterios:

a) Un estudio pasado (Chavarri, 1999), que abordó los problemas de inundación fueron detectados para valores específicos de descarga medidos en la estación El Tigre.

Este estudio previo muestra la verificación del perfil de flujo para el evento máximo del Fenómeno El Niño 1998 usando el modelo hidráulico HEC-RAS, aquí se menciona que los resultados de la simulación no concuerdan con lo registrado en el Puente Tumbes y que esto había sido detectado antes por el Ing. A. Mansen.

En resumen el estudio muestra que para el evento de 1998 en la estación El Tigre:

$Q=395 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ Problemas en el dren El Piojo y aguas abajo de este punto.

$Q=600 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ Inundaciones en la margen izquierda a la altura del malecón.

$Q=1000 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ Inundaciones en todo el tramo, a la altura del malecón, el nivel está 0.5 m por debajo del nivel del dique.

$Q=1600 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow$ El nivel de agua supera la altura del malecón inundando la ciudad. Usando la curva altura-gasto 1997/1998 y a partir de los caudales, se puede calcular los niveles de agua correspondientes (Ver Fig. 4):

$Q=395 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow H=3.52 \text{ m}$

$Q=600 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow H=4.13 \text{ m}$

$Q=1000 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow H=5.00 \text{ m}$

$Q=1600 \text{ m}^3/\text{s} \rightarrow H=5.99 \text{ m}$

El estudio se elaboró hace 10 años, para ello se consideró actualizar la información utilizando las curvas altura-gasto de los años 2006 y 2007 (Tabla 1). En este caso se van a calcular los caudales correspondientes a los niveles del río cada 0.5 m a partir de los 3 m.

Tabla 1. Valores de altura de agua (H) y los caudales observados para el 2006 y 2007.

H (m)	$Q(2006)$ (m^3/s)	$Q(2007)$ (m^3/s)	$Q(\text{medio})$ (m^3/s)
3.0	430	460	450
3.5	710	780	750
4.0	1100	1230	1160
4.5	1616	1840	1730
5.0	2280	2638	2460

b) Eventos recientes de inundación: se consideraron los eventos de los años: 2006, 2008 y 2010. Para obtener los niveles críticos, se plotearon los niveles horarios en los tres eventos; donde se pudo observar que una característica común de estos eventos, son los problemas de inundación que empiezan cuando los niveles de agua están cercanos a los 3 metros. A partir de este nivel hasta el máximo histórico, las inundaciones

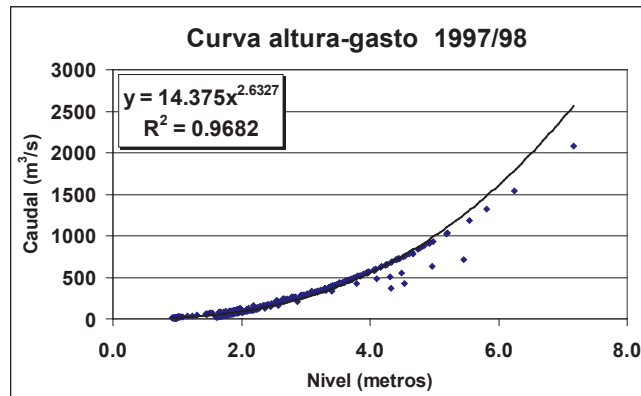


Fig. 4. Curva altura-gasto estación El Tigre

se han clasificado como: menor, moderado y mayor. (Ver Fig. 5).

c) Mejoramiento de los datos TRMM: se desarrolló una nueva metodología “Detección del caudal pico”. Esta técnica considera la precipitación diaria acumulada como un indicador para encontrar los caudales pico.

La programación permitió procesar gran cantidad de información y facilitó la tarea de detección de los caudales pico, siendo el primer paso para realizar el mejoramiento de los datos del satélite TRMM. La metodología está basada en el uso de factores de corrección mensuales aplicados a la serie de tiempo de precipitación areal original obtenido con los datos de satélite sin corregir.

Si la precipitación areal original en un día es mayor que 0.5 mm, este es considerado en el proceso de acumulación; cuando la precipitación acumulada exceda 10 mm se espera que ocurra el máximo caudal pico. Sin embargo es posible tener picos cuando la precipitación acumulada está en el rango de 2-10 mm.

Si la precipitación areal es menor que 0.5 mm, el proceso de acumulación termina y empieza nuevamente de cero, esperando el próximo valor el cual tendrá que ser mayor que 0.5 mm para que pueda ser acumulado, esto se repite hasta que todos los datos diarios de precipitación han sido leídos. A continuación se muestra dos ejemplos del proceso de acumulación. (Ver Fig. 6 y 7).

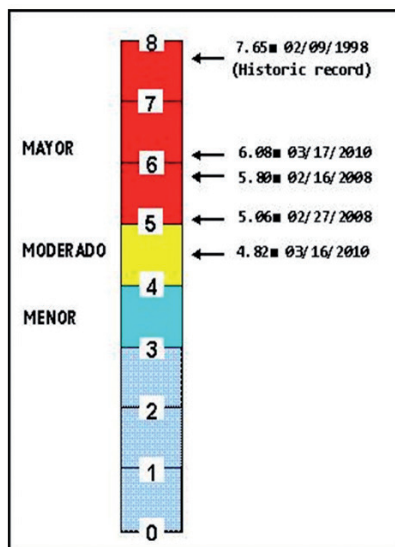


Fig. 5. Clasificación de niveles de inundación

A pesar de no estar trabajando todavía con los caudales generados por el modelo hidrológico, es posible que a partir de la precipitación areal original, se obtenga una aproximación de las fechas en que los caudales pico podrían ocurrir.

Se realizaron varias pruebas para determinar el algoritmo que detectaba mejor el caudal-pico. Para ello fue necesario utilizar la serie de tiempo original de precipitación areal, calculado por el método aritmético o Thiessen.

Una vez detectados los caudales-pico, se empleó un código de programación que fue elaborado para realizar la corrección de la serie de tiempo diaria de precipitación areal original, en donde se aplican factores sólo a

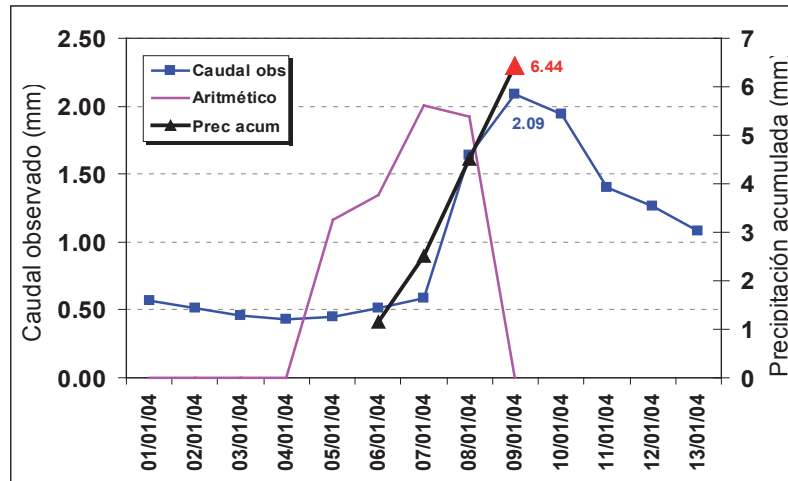


Fig. 6. Caudal pico detectado el 9-1-2004. La línea rosada es la serie de tiempo de precipitación areal original estimada con el método aritmético (también se utilizó Thiessen). El caudal observado (línea azul) y la serie de tiempo de precipitaciones diarias calculada con el método aritmético están plotados en el eje Y (izq.), mientras que las precipitaciones acumuladas (línea negra) están plotadas en el eje Y (der.).

los días en que ocurre la acumulación de la precipitación.

El factor a usar va depender del mes en que ocurra la lluvia y del valor de la precipitación acumulada, tal como se muestra en la Tabla 2. El resultado obtenido es una nueva serie de tiempo de lluvias diarias corregidas que es usada como dato de entrada por el modelo hidrológico Sacramento (SAC-SMA).

Para la validación de la precipitación con la nueva metodología utilizada en el estudio se ha considerado el coeficiente de correlación de Pearson (R) y la raíz cuadrada del error

cuadrático medio (RMSE). Otra manera de verificar la calidad de la nueva serie de precipitación generada, con la metodología, fue usando esta información en el modelo hidrológico.

Tabla 2. Factores de corrección mensual

Precipitación Acumulada	Meses				
	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
>0 y <0,5	2	6	6	3	3
>=0,5 y <2	4	5	4	3	3
>=2 y <4	5	6	6	3	3
>=4 y <6	6	7	4	3	3
>=6 y <8	7	5	4	3	3
>=8 y <10	9	5	4	3	3
>10	2	2	1	3	3

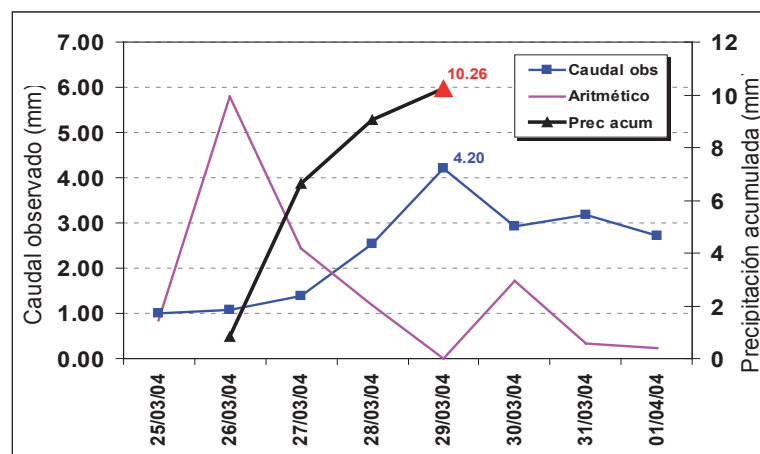


Fig. 7. Caudal-pico detectado el 29-3-2004

Finalmente se utilizaron tres criterios estadísticos para medir la eficiencia del modelo Sacramento: a) Estadísticas propias del modelo Sacramento, b) RMSE c) Coeficiente, Clente Nash & Sutcliffe (1970).

La raíz cuadrada del error cuadrático medio, se usa con frecuencia para comparar resultados de modelos. Esta medida matemática cuantifica en cuánto el modelo sobreestima o subestima las mediciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Q_o^i - Q_p^i)^2} \quad (1)$$

Donde: *n* es el número de observaciones, *Q_o* y *Q_p* son las descargas observadas y pronosticadas respectivamente.

Nash & Sutcliffe (1970) propusieron un coeficiente de eficiencia del modelo. Este coeficiente es usado para evaluar la capacidad de predicción de los modelos hidrológicos. Está definido como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_o^i - Q_p^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2} \quad (2)$$

Tabla 3. Prueba de detección de caudales - pico

Caudal pico observados	Prueba 1	Prueba 2
01/09/2004		✓
02/20/2004	✓	
03/08/2004		03/07/2008
03/29/2004	03/28/2004	✓
04/03/2004		
04/15/2004	✓	✓
04/26/2004		✓
02/16/2005	✓	✓
03/02/2005		✓
03/08/2005	03/07/2005	
03/16/2005	✓	
03/17/2005		
03/29/2005		
04/28/2005	✓	✓

RESULTADOS

Los datos de precipitación histórica observada indican que existe una marcada relación entre la precipitación y la altura de las estaciones.

Se encontró un error sistemático en la medición de la precipitación por la estación automática El Tigre. El mismo que se corrigió mediante la ecuación de regresión lineal siguiente:

$$Y = 2.7528 \cdot X + 0.3823$$

Donde:

X: Precipitación Automática (mm)

Y: Precipitación Convencional (mm)

La ecuación de corrección se aplicó solo para valores diarios mayores que cero registrados en la estación automática. Si el valor fue cero entonces la ecuación de corrección no se aplicó.

Los hidrogramas horarios registrados en la estación automática muestran que en inundaciones recientes tales como en el 2006 y 2008, el tiempo al pico fue de 16 y 13 horas respectivamente, mientras que en el 2010 fue mucho más rápido. Se observó también en estos tres años que los picos que ocasionaron las inundaciones se originaron a partir de un nivel de agua de 3 metros.

El estudio ha demostrado que la calidad de los datos del satélite TRMM depende en cierta forma de la altitud, por ejemplo cuando se comparan los puntos del satélite PE1 y Grid11PE, los más cercanos al Tigre y Rica Playa ubicados a una altitud menor a 100 msnm; de 4 periodos de lluvia solo 2 estuvieron cerca de los valores observados. Para la estación Cabo Inga, ubicada a 205 msnm, los puntos de satélite más cercanos son PE2 y EC1; solo 2 periodos de lluvia estuvieron cerca de los valores observados. Finalmente, la estación Zaruma, ubicada a 1100 msnm,

se comparó con los puntos de satélite EC3 y EC4, en este caso la subestimación es muy alta. Considerando que gran parte de la cuenca está por encima de los 200 msnm, esto significa que no podemos confiar en los datos TRMM para la cuenca Puyango-Tumbes, sino más bien que estos datos necesitan un tratamiento previo de corrección.

Se han utilizado las curvas altura-gasto de los años 2006 y 2007 (no se dispone de información más reciente) para estimar los caudales correspondientes a los

diferentes niveles del río. Estos caudales han sido clasificados por rangos con la finalidad de poder diferenciar el nivel de alerta y el tipo de mensaje que debe ser emitido.

Tabla 4. Resumen estadístico del modelamiento Hidrológico

	Calibración		Validación	
	Aritmético	Thiessen	Aritmético	Thiessen
R	0.907	0.914	0.843	0.856
RMSE	0.701	0.734	1.699	1.616
NS	0.818	0.774	0.820	0.838

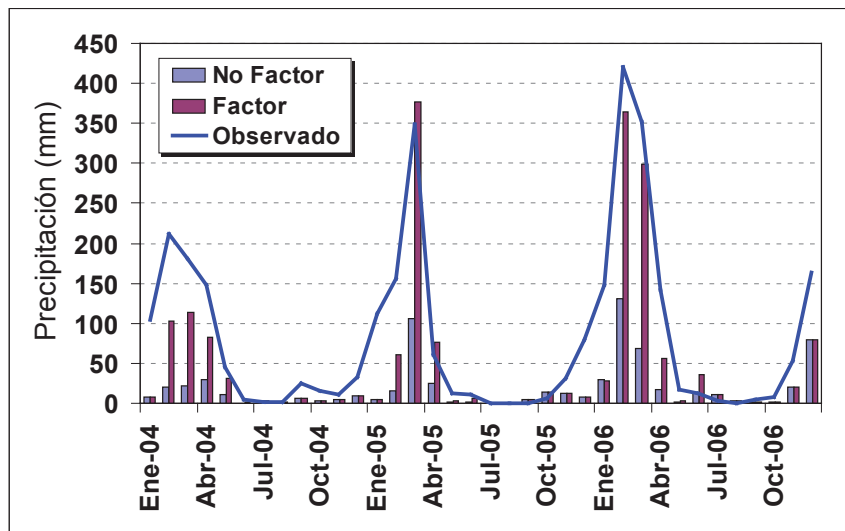


Fig. 8. Validación de la precipitación areal Método Aritmético

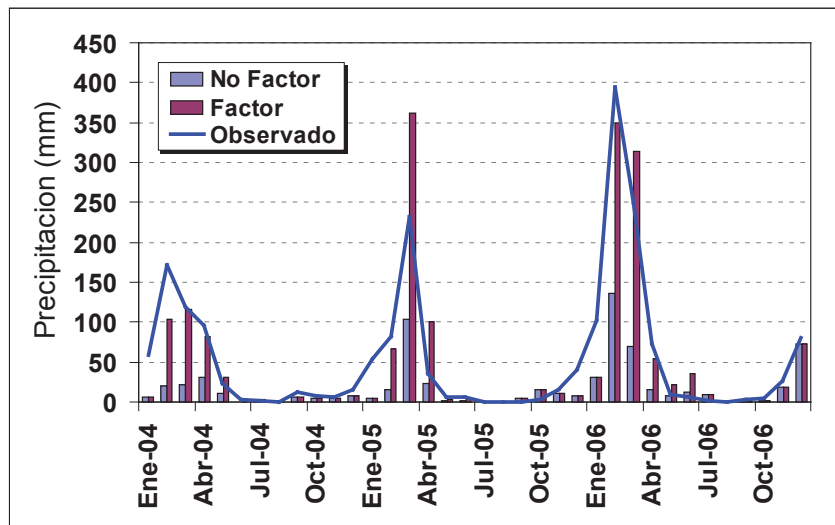


Fig. 9. Validación de la precipitación areal Método Thiessen

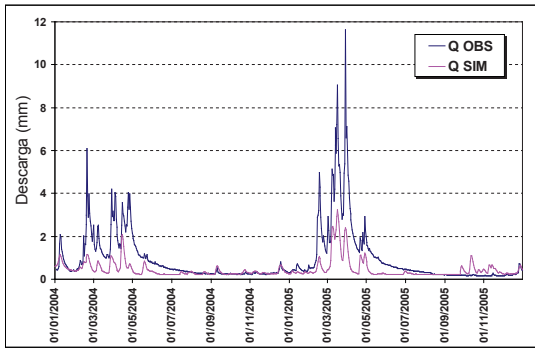


Fig.10 Simulación sin factor de corrección Calibración (Método aritmético)

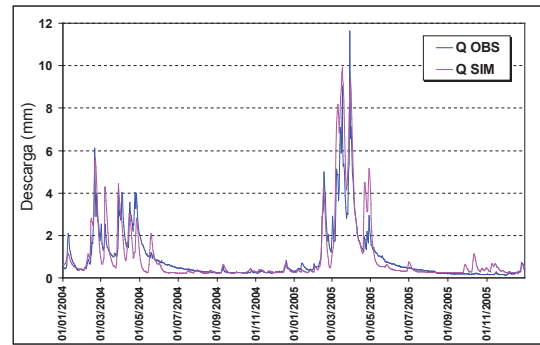


Fig.11 Simulación con factor de corrección Calibración (Método aritmético)

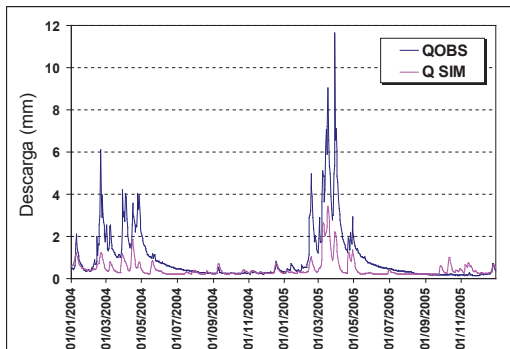


Fig.12 Simulación sin factor de corrección Calibración (Método Thiessen)

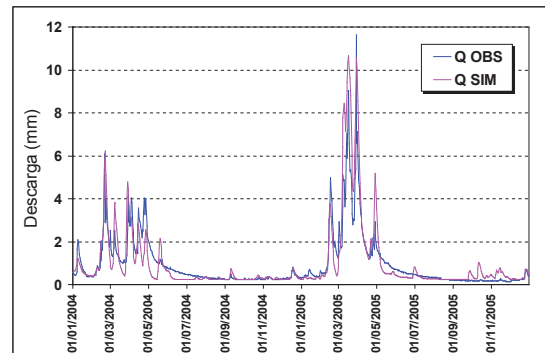


Fig.13 Simulación con factor de corrección Calibración (Método Thiessen)

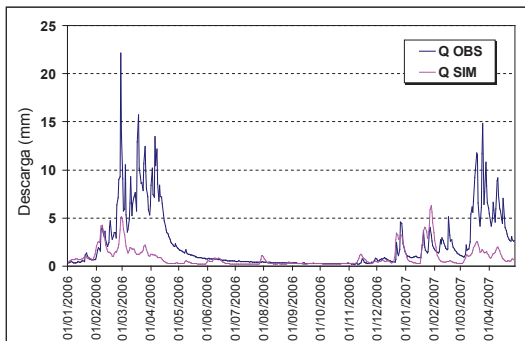


Fig.14 Simulación sin factor de corrección Validación (Método aritmético)

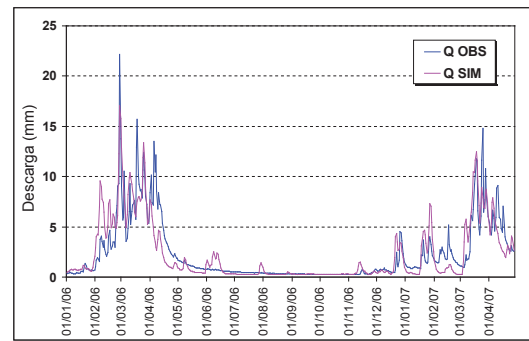


Fig.15 Simulación con factor de corrección validación (Método aritmético)

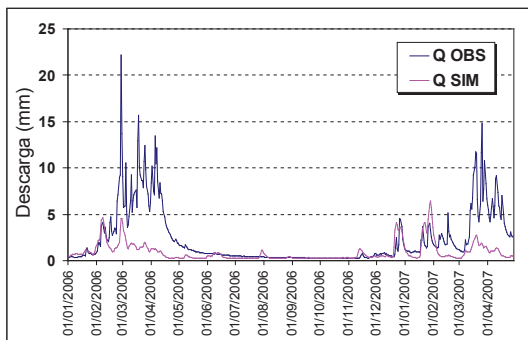


Fig.16 Simulación sin factor de corrección Validación (Método Thiessen)

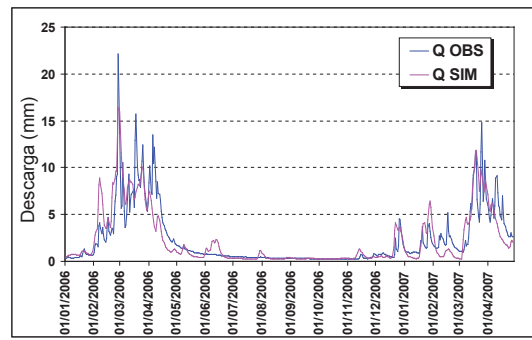


Fig.17 Simulación con factor de corrección validación (Método Thiessen)

La validación de la precipitación areal con los métodos aritmético y Thiessen se realizó a nivel mensual para el periodo enero 2004-diciembre 2006. (Ver Fig. 8 y 9)

Se puede observar una gran mejora cuando se aplica el método “Detección del caudal pico” (FACTOR) en contraste con el cálculo de la precipitación areal cuando no se da ningún tratamiento a los datos del satélite (NO FACTOR).

El tiempo de concentración fue calculado con el software SMADA, se usaron las ecuaciones de Kirpich y Kerby con las cuales se estimaron 17.6 y 15.2 horas respectivamente. De aquí se calculó el tiempo de concentración promedio hasta la estación El Tigre igual a 16.4 horas.

El modelamiento hidrológico realizado considera toda la cuenca como una unidad y para ambos periodos: Calibración y Validación, los resultados son satisfactorios. Ambos métodos (Aritmético y Thiessen) dan similares resultados, sin embargo en el período de validación el método Thiessen fue superior. (Ver Tabla 4 y Fig. 10 a 17)

Se elaboró una página web que tiene la finalidad de brindar información general sobre el área de estudio, asimismo permitirá conocer cuál es el comportamiento pluviométrico en toda la cuenca, el pronóstico de caudal en la estación de aforos El Tigre y el nivel de alerta según corresponda de acuerdo a la clasificación de niveles de inundación. (Ver Fig. 18 y 19)

CONCLUSIONES

Los datos del satélite TRMM 3B42 V6 para la cuenca Puyango-Tumbes no deben ser usados de manera directa. Primero se deben corregir adecuadamente, porque se ha demostrado que estos datos subestiman la precipitación observada. Se ha observado que la subestimación es directamente proporcional a la altitud, a mayor altitud la subestimación es mayor.

En la validación mensual de la lluvia se muestra que la metodología utilizada en este estudio “Detección del caudal pico” ha mejorado la calidad de los datos de lluvia proporcionado por el satélite TRMM.

El primer mensaje de alerta deberá ser emitido cuando el caudal pronosticado exceda los 450 m³/s.

Ambos métodos el Aritmético y Thiessen pueden ser usados para el cálculo de la precipitación areal. Sin embargo, debido a que el método Thiessen fue ligeramente mejor, será usado para fines operacionales mientras que el método aritmético será una segunda opción.

Los resultados obtenidos del modelamiento hidrológico confirman que la metodología empleada logra corregir gran parte de los datos TRMM.

REFERENCIAS

- Chavarri, V. (1999).** Simulación hidráulica del río Tumbes desde la estación puerto El Cura hasta 900 m aprox. aguas abajo del puente Tumbes.
- Hazarika, MH., Kafle T.P, Sharma R., Karki S., Shresta R.M, Samarkoon L. (2007).** Statistical approach to discharge prediction for flood forecasts using TRMM data.
- Islam, M. N. & Uyeda H. (2005).** Comparison of TRMM 3B42 Products with Surface Rainfall over Bangladesh.” International Geoscience and remote Sensing Symposium 6: 4112-4115.
- Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V. (1970).** River flow forecasting through conceptual models, Part I.- A discussion of principles. J.Hydrol. 10(3), 282-290.
- Oke, A.M.C., Frost, A.J., Beesley, C.A. (2009).** The Use of TRMM satellite data as a predictor in the spatial interpolation of daily precipitation over Australia. Water division, Australian Bureau of Meteorology.

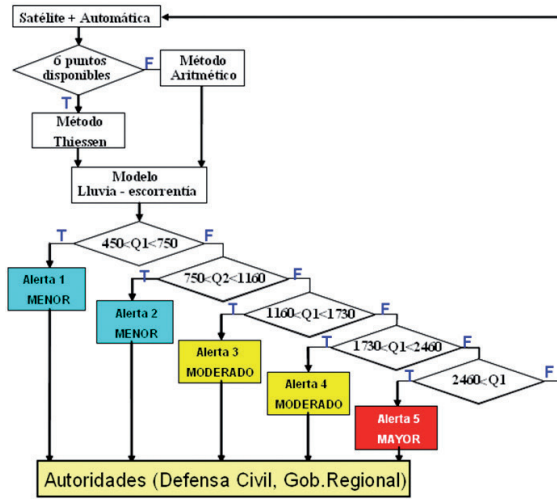


Fig. 18. Esquema del Sistema de alerta de Inundaciones operacional



Fig. 19. Vista de la página web que mostrará los resultados del Sistema de alerta