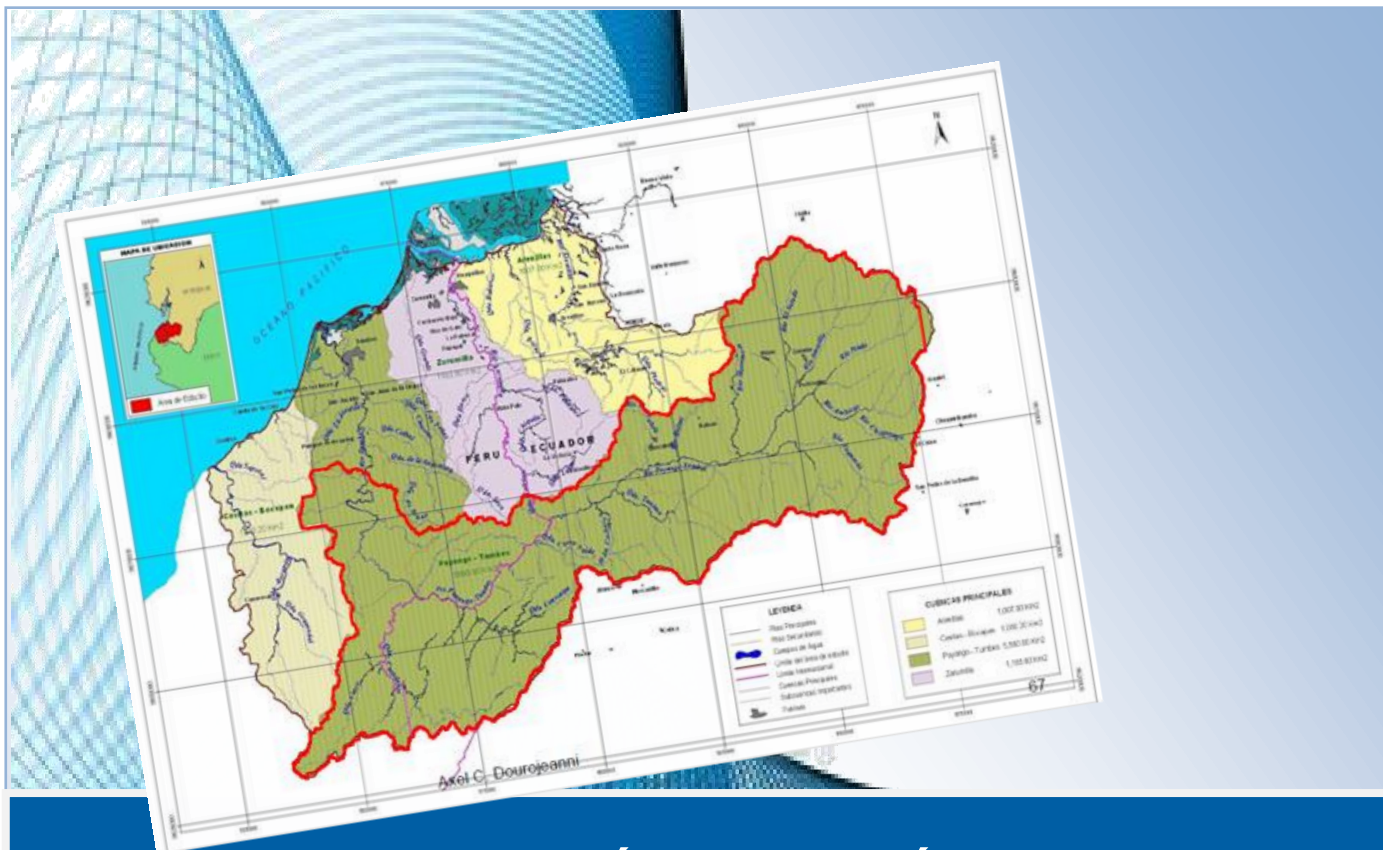




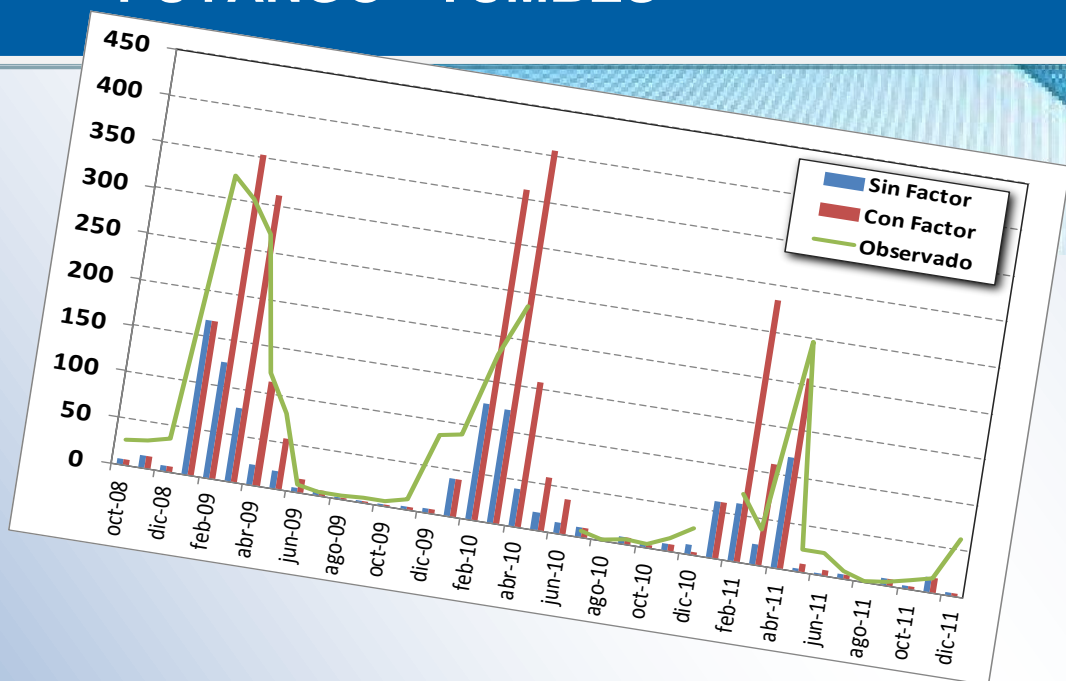
PERÚ

Ministerio del Ambiente

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI



MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y SENSORAMIENTO REMOTO EN LA CUENCA PUYANGO - TUMBES



Lima - Perú
2012





PRESIDENTA EJECUTIVA DEL SENAMHI
Ing. AMELIA DIAZ PABLÓ

DIRECTOR GENERAL DE HIDROLOGÍA Y
RECURSOS HÍDRICOS
Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GALVEZ

DIRECTOR DE HIDROLOGÍA APLICADA
Ing. OSCAR FELIPE OBANDO

DIRECTOR DE HIDROLOGÍA OPERATIVA
Ing. JUAN ARBOLEDA OROZCO

RESPONSABLE :
MSc. LUIS METZGER TERRAZAS

REVISIÓN:
Dr. JUAN JULIO ORDOÑEZ GALVEZ

LIMA – PERÚ

2012

INDICE

I. ANTECEDENTES	5
II. OBJETIVOS.....	5
III. JUSTIFICACION	5
IV. AREA DE ESTUDIO	6
V. METODOLOGIA.....	7
5.1 Misión TRMM.....	7
5.2 Sensores.....	8
5.2.1 Mapeador microondas TRMM (TMI)	8
5.2.2 Radiometro de escaneo de microondas avanzado (AMSR-E)....	8
5.2.3 Sensor especial mapeador de microondas (SSMI).....	8
5.2.4 Sensor especial mapeador de microondas (SSMIS)	8
5.2.5 Unidad de sondeo de microondas avanzado (AMSU-B).....	9
5.2.6 Sonar microondas de humedad (MHS)	9
5.2.7 Infrarojo (IR).....	9
5.3 Estimación de la precipitación observada.....	10
5.4 Estimación de la precipitación del satélite TRMM.....	10
5.5 Corrección de la precipitación del satélite TRMM.....	12
5.6 Modelamiento Hidrológico	13
VI. RESULTADOS	15
VII. CONCLUSIONES.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Cuenca Puyango – Tumbes (en color rojo hasta la estación El Tigre)	3
Figura 2.	Comparación de la precipitación observada Vs. Satélite para el año 2009	8
Figura 3.	Precipitación acumulada febrero 2009 – estaciones convencionales	9
Figura 4.	Precipitación acumulada febrero 2009 – satélite TRMM 3B42RT	9
Figura 5.	Subestimación del satélite 3B42RT V6 en el periodo enero 2004 – abril 2007...	10
Figura 6.	Precipitación diaria del satélite 3B42RT corregida para el mes de febrero 2009	11
Figura 7.	Representación de la transferencia de flujos por el modelo Sacramento	13
Figura 8.	Corrección de la precipitación TRMM (precipitación areal estimada con Kriging)	14
Figura 9.	Corrección de la precipitación TRMM (precipitación areal estimada con inverso distancia).....	14
Figura 10.	Simulación de caudales con precipitación de satélite sin corregir (método distancia).....	16
Figura 11.	Simulación de caudales con precipitación de satélite corregida (método distancia).....	16
Figura 12.	Simulación de caudales con precipitación de satélite sin corregir (método Kriging)	17
Figura 13.	Simulación de caudales con precipitación de satélite corregida (método Kriging)	17

LISTA DE CUADROS

Tabla 1	Resumen de los sensores que contribuyen con la data TMPA-RT	7
Tabla 2	Factores de corrección por mes y rango de lluvia acumulada	11
Tabla 3	Resultados estadísticos para toda la serie	15
Tabla 4	Resultados estadísticos para el periodo febrero-junio	15

MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA Y SENSORAMIENTO REMOTO EN LA CUENCA PUYANGO - TUMBES

I. ANTECEDENTES

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) tiene la misión de informar al público en general sobre las condiciones meteorológicas e hidrológicas a nivel nacional.

Las actividades realizadas en la Dirección de Hidrología Aplicada de la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos están orientadas a la implementación de metodologías, elaboración de herramientas y/o sistemas que permitan mejorar la calidad de los productos generados tales como: pronósticos, boletines, estudios, artículos científicos, etc.

En ese sentido para mejorar la calidad de los pronósticos hidrológicos se ha considerado dentro del Plan Operativo Institucional del SENMHI - POI 2012 la realización del informe "Modelización Hidrológica y Sensoramiento Remoto en la cuenca Puyango-Tumbes".

II. OBJETIVOS

2.1 General

Validar la información de precipitación del satélite TRMM 3B42RT del periodo Octubre 2008 a Diciembre de 2011 en el ámbito de la cuenca Puyango-Tumbes.

2.2 Específicos

- Evaluar la calidad de los datos de sensoramiento remoto y su posible uso en la Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos para suplir la carencia de información en tiempo casi real.
- Utilizar los modelos hidrológicos para elaborar estudios y evaluar hipótesis que puedan surgir como parte de la investigación realizada.

III. JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta actividad se sustenta en la necesidad de disponer de información en tiempo casi real para la estimación de la precipitación. Asimismo, la información que puede proporcionar el sensoramiento remoto cubre una gran área que no solo se limita al territorio nacional y en este caso en particular abarca la región de Ecuador que es donde nace la cuenca Puyango-Tumbes.

La red de estaciones pluviométricas que tiene actualmente Senamhi tiene grandes limitaciones como por ejemplo en la región Amazónica y en las zonas de montaña. Es por eso la importancia de establecer el sensoramiento remoto como una actividad a realizar en la Dirección de Hidrología Aplicada.

La realización de esta actividad permitirá validar la metodología empleada en el estudio: “Sistema de alerta de inundaciones en tiempo casi real para la cuenca del río Tumbes en Perú usando sensoramiento remoto”. Esta metodología se aplicó por primera vez en el año 2009 para mejorar la calidad de los datos del satélite TRMM 3B42 V6 y el periodo evaluado fue del año 2004 al 2007.

IV. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca Puyango-Tumbes es una cuenca transfronteriza que comparte el Perú con el Ecuador. Cubre un área de 4 750 km², de las cuales 3 477 km² (73.2%) pertenecen al Ecuador y 1 273 km² (26.8% hasta la estación el Tigre, ver **Figura 1**) al Perú. La cuenca Puyango-Tumbes está ubicada entre las latitudes 3°43'S - 4°17'S y las longitudes 80°41'W - 79°23'W.

La cuenca del río Puyango-Tumbes está formada en su cabecera por varios ríos que nacen en las provincias del Oro y Loja en Ecuador. En territorio peruano lleva el nombre de río Tumbes y desemboca en el Océano Pacífico.

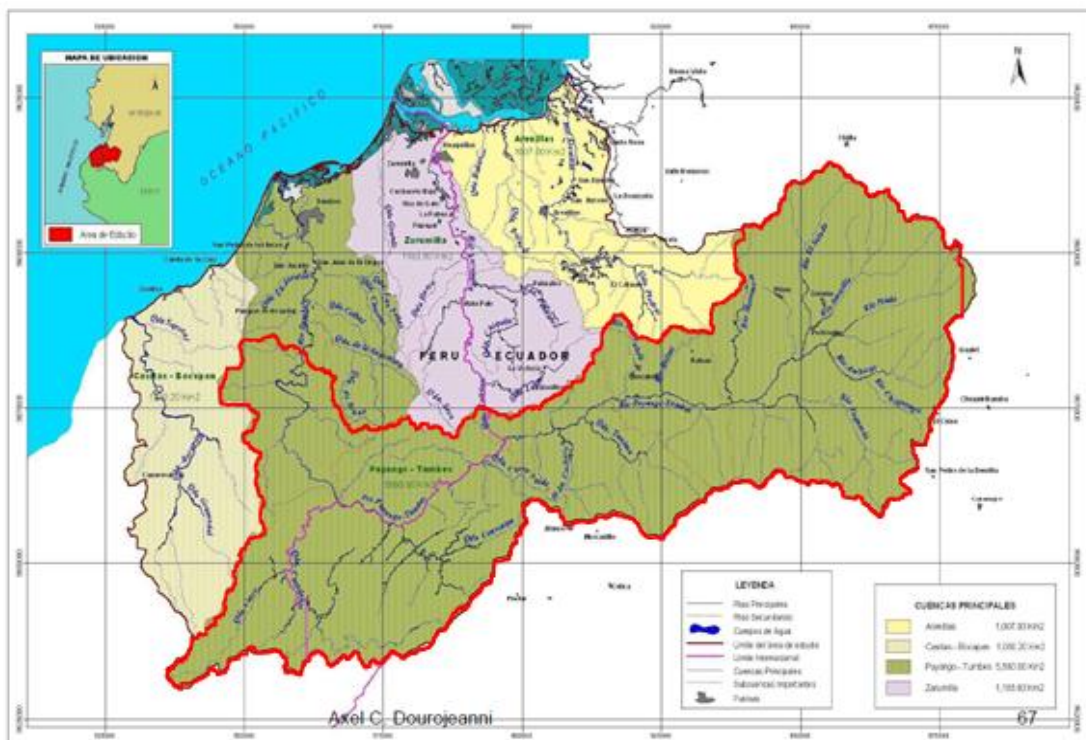


Figura 1. Cuenca Puyango Tumbes (en color rojo hasta la estación El Tigre)

Fuente: Elaboración propia

V. METODOLOGÍA

Es importante mencionar que para este informe se ha considerado validar los datos del satélite TRMM 3B42RT, el cual es un producto experimental y es el que tiene una resolución temporal de 3 horas, por lo que puede ser utilizado para fines de pronóstico. Estos datos inician su registro en octubre del año 2008.

5.1 Misión TRMM

Los creadores de la base de datos de precipitación del satélite TRMM son G.J. Huffman, D.T. Bolvin, E.J. Nelkin, y R.F. Adler, quienes trabajan en el Laboratorio de Procesos Atmosféricos a Mesoescala de la NASA.

La misión de medición de la lluvia tropical (TRMM) es un proyecto internacional de la NASA y JAXA, designados para proporcionar estimaciones mejoradas de la precipitación en los trópicos, que es donde ocurre la mayor parte de la precipitación sobre la tierra.

TRMM empezó a registrar datos en Diciembre 1997 y está colocada en una órbita de 46-días con una inclinación de 35°. Esta órbita le permite al satélite TRMM construir una vista completa del ciclo climatológico diurno, así como proporcionar calibración para otros sensores de la precipitación

En este estudio se ha utilizado los datos del satélite TRMM, pero también se podría utilizar la información que se muestra a continuación:

- Turk (1999), usa pasos individuales SSM/I a desnivel para calibrar las estimaciones de precipitación geo-IR;
- Sorooshian et al. (2000), aplica la red neuronal PERSIANN para calibrar el IR con microonda
- Joyce et al. (2004), aplica el esquema CMORPH para interpolar en el tiempo los patrones de microondas con los vectores de movimiento basados en IR.
- Kubota et al. (2007), aplica el esquema GSMaP para interpolar en el tiempo los patrones de microonda con los vectores de movimiento basados en IR.

Características de la data 3B42RT

- ✓ Resolución Temporal: 3 horas
- ✓ Resolución Espacial: 0.25°x0.25° lat/lon

- ✓ Datum de referencia: WGS84
- ✓ Cobertura Espacial: 60°N-S

5.2 Sensores

5.2.1 Mapeador microondas TRMM (TMI)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo. Los canales tienen campos efectivos de visión que varían de 4.6x6.9 km para los 85 GHz a 29.1x55.2 km para los 10 GHz. En consecuencia, el canal de 85 GHz es submuestreado, y todos los otros canales son más o menos sobremuestreado.

5.2.2 Radiómetro de escaneo de microondas avanzado (AMSR-E)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo proporcionado por la Agencia Japonesa Aeroespacial de Exploración. Este sensor proporciona valores de polarización vertical y horizontal para las frecuencias 6, 10, 18, 23, 36 y 89 GHz (excepto solo vertical en 23) con escaneo cónico, similar al SSMI. Los canales tienen resoluciones que varían de 4x6 km para los 89 GHz a 43x74 km para los 6 GHz.

5.2.3 Sensor especial mapeador de microondas (SSMI)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo que ha sido utilizado en el Programa de Satélite de Defensa Meteorológico (DMSP) desde mediados de 1987. El SSMI proporciona valores de polarización vertical y horizontal para las frecuencias 19, 22, 37 y 85 GHz (excepto solo vertical en 22) con escaneo cónico. Los canales tienen resoluciones que varían de 12.5x15 km para los 85 GHz a 60x75 km para los 19 GHz.

5.2.4 Sensor especial mapeador de microondas y sonido (SSMIS)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo que también ha sido utilizado en el programa DMSP. Este sensor proporciona valores de polarización vertical y horizontal para las frecuencias SSMI-como 19, 22, 37, y 91 GHz (excepto solo vertical en 22), con escaneo cónico.

Los canales tienen resoluciones 46.5x73.6 km (19, 22 GHz) 31.2x45.0 km (37 GHz) 13.2x15.5 km (91 GHz) con el ángulo de visión inclinada y procesamiento en línea determinando la forma oval.

5.2.5 Unidad de sondeo de microondas avanzado (AMSU-B)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo que se utilizó en plataformas de la NOAA desde el 2000 hasta el 2011. El sensor completo contiene 20 canales, los primeros 15 referidos al sensor AMSU-A y los últimos 5 como AMSU-B. Estos canales (identificados como 16 hasta 20) cubren las frecuencias 89.0 ± 0.9 , 150.0 ± 0.9 y 183.31 ± 1 , 3, y 7, todo en GHz, con escaneo cruzado.

5.2.6 Sonar microondas de humedad (MHS)

Es un radiómetro multi-canal de microondas pasivo que se utilizó en plataformas de la NOAA desde el 2005. El MHS contiene 5 canales, similar al AMSU-B. Estos canales cubren las frecuencias 89.0, 157.0, 183.311 ± 1 y 3, y 190.311 , todo en GHz, con escaneo cruzado.

5.2.7 Infrarojo (IR)

Los datos infrarojo son coleccionados de una variedad de sensores ubicados en satélites meteorológicos de órbita geosíncrona – satélites de ambiente operacionales geosíncrona (GOES, USA), el satélite meteorológico geosíncrono (GMS) y el satélite meteorológico (Meteosat, de la Comunidad Europea). Usualmente hay dos plataformas GOES activas, GOES-ESTE y -OESTE, los cuales cubren la parte este y oeste de los Estados Unidos.

La información IR geosíncrona de la tierra es coleccionada por escaneo (partes de la tierra). Según acuerdo internacional, todos los operadores de satélite coleccionan imágenes de la tierra al menos en horas de observación sinópticas (00, 03, ..., 21 UTC).

Tabla 1. Sensores que contribuyen con la data TMPA-RT

Sensor	Fecha inicio	Fecha fin	Fuente	Comentarios
AMSR-E	19-jun-02	03-oct-11	NSIDC AE_Rain.2 V10 GPROF	frozen at V10/V11 (GPROF2004)
SSMIS DMSP F13	17-feb-00	31-jul-09	CSU GPROF2010 V1a	coverage too sparse later
SSMIS DMSP F14	17-feb-00	23-ago-08	CSU GPROF2010 V1a	
SSMIS DMSP F15	23-feb-00	13-ago-06	CSU GPROF2010 V1a	beacon interference later
SSMIS DMSP F16	20-nov-05	Funcionando	CLASS TDR, GPROF2004V	start of CLASS TDR archive
SSMIS DMSP F17	19-mar-08	Funcionando	CLASS TDR, GPROF2004V	start of CLASS TDR archive
SSMIS DMSP F18	08-mar-10	Funcionando	CLASS TDR, GPROF2004V	start of CLASS TDR archive
AMSU-B NOAA-15	17-feb-00	14 Set 2010	CICS; CLASS	CICS before 1 June 2007
AMSU-B NOAA-16	04-oct-00	30-abr-10	CICS; CLASS	CICS before 1 June 2007
AMSU-B NOAA-17	28-jun-02	17-dic-09	CICS; CLASS	CICS before 1 June 2007
MHS NOAA-18	25-may-05	Funcionando	CICS; CLASS	CICS before 1 June 2007
MHS NOAA-19	09-mar-09	Funcionando	CICS; CLASS	CLASS starts 7 May 2009
MHS MetOp-A	05-dic-06	Funcionando	CICS; CLASS	CICS before 1 June 2007
TMI	17-feb-00	Funcionando	CSU GPROF2010 V1	
IR	17-feb-00	Funcionando	CPC 4km Tb	

Fuente: Elaboración propia

5.3 Estimación de la precipitación Observada

La estimación de la precipitación observada en la cuenca Puyango-Tumbes se ha realizado utilizando dos métodos: (1) Inverso de la distancia al cuadrado y (2) Kriging. Cabe mencionar que la precipitación estimada es areal, es decir se calcula un valor para toda la cuenca Puyango-Tumbes.

Por el lado de Perú se ha recopilado información de 3 estaciones pluviométricas: Cabo Inga, Rica Playa y El Tigre para el periodo Octubre 2008 - Diciembre 2011. Por el lado de Ecuador ha sido muy difícil encontrar información diaria y solo se encontró información mensual de algunas estaciones del año 2009.

5.4 Estimación de la precipitación del satélite TRMM

De manera similar, para estimar la precipitación mensual, se ha descargado la información diaria de precipitación del satélite TRMM 3B42RT desde Octubre 2008 hasta Diciembre 2011. Se utilizó también los métodos: Inverso de la distancia al cuadrado y Kriging para que puedan ser comparados con la precipitación observada.

En la **Figura 2**, podemos apreciar la distribución de los valores de precipitación registrada en la red observacional y los obtenidos a través del satélite TRMM, donde observamos claramente que los datos de los pluviómetros registran valores superiores en promedio a 100% durante el período analizado.

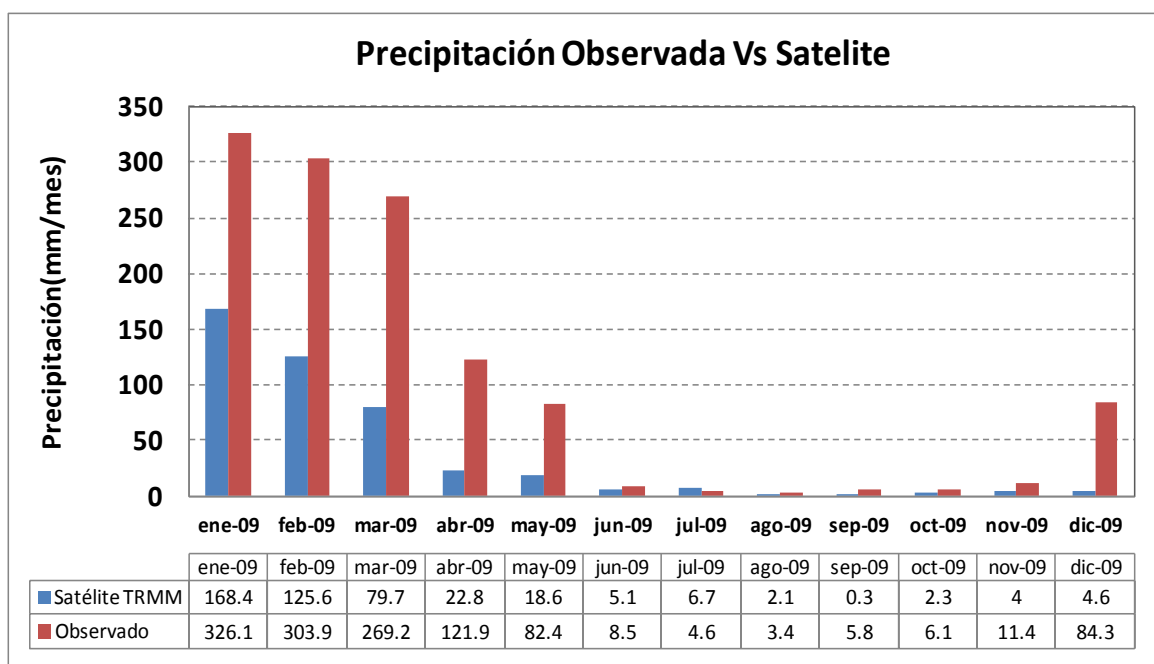


Figura 2. Comparación de la precipitación observada Vs. Satélite para el año 2009

Fuente: Elaboración propia

En las **Figuras 3 y 4**, se muestra la distribución espacial de la precipitación, tanto para los datos obtenidos a través de la red observacional como para los valores del satélite TRMM, para Febrero de 2009, apreciándose una relación inversamente proporcional, lo que nos indica que la información obtenida a través del satélite no es representativa para la cuenca.

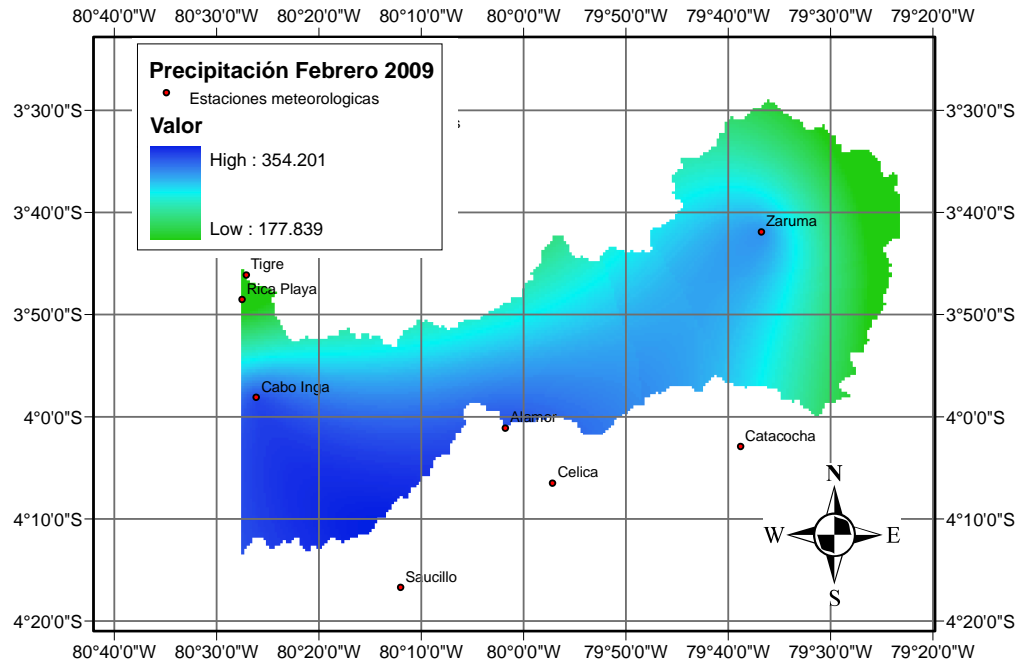


Figura 3. Precipitación acumulada febrero 2009 – estaciones convencionales
 Fuente: Elaboración propia

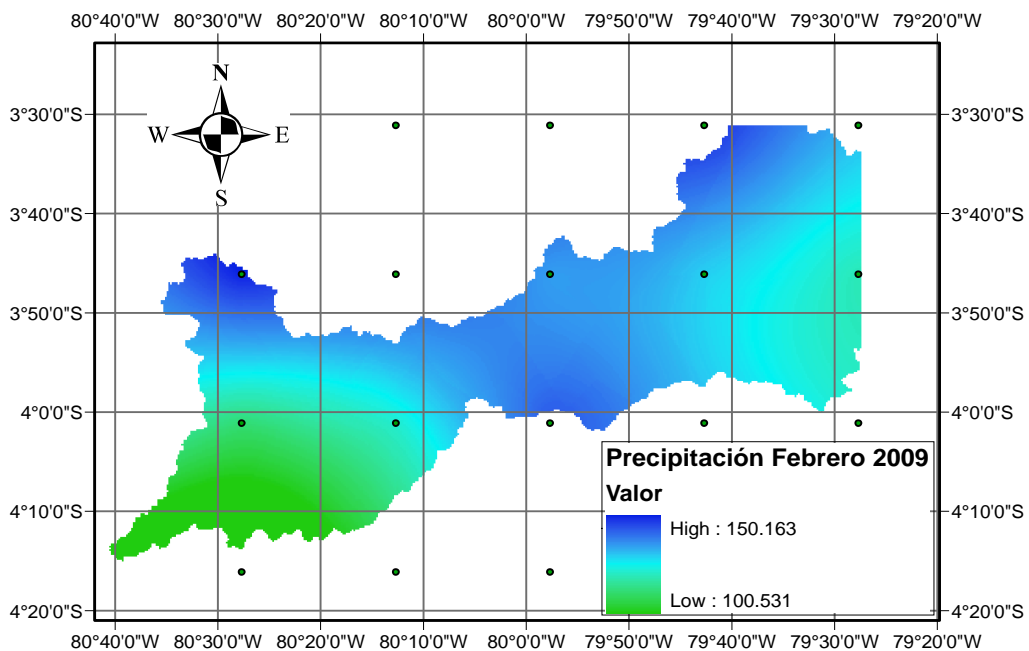


Figura 4. Precipitación acumulada febrero 2009 – satélite TRMM 3B42RT
 Fuente: Elaboración propia

5.5 Corrección de la precipitación del satélite TRMM

La precipitación estimada por el satélite para el periodo Oct 2008 – Dic 2011 nuevamente subestima la precipitación observada en la cuenca Puyango Tumbes (**Figura 2**, **Figura 3** y **Figura 4**). Un comportamiento similar ya se había observado en un estudio anterior, cuando se utilizó información del satélite TRMM 3B42RT V6 para el periodo Ene 2004 – Abr 2007 (**Figura 5**). Es por lo tanto necesario en este estudio, realizar la corrección de la precipitación estimada por el satélite TRMM 3B42RT.

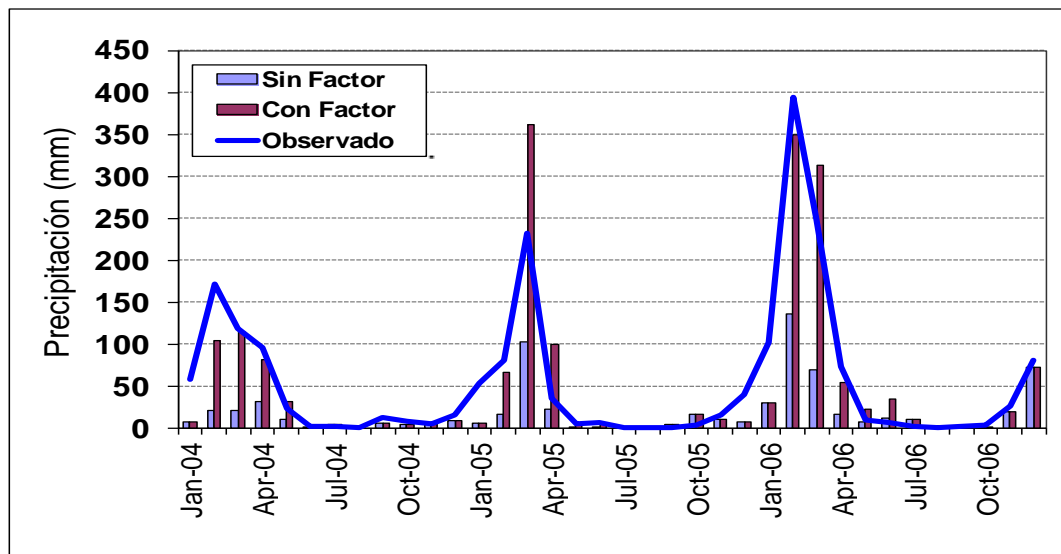


Figura 5. Subestimación del satélite 3B42RT V6 en el período Enero 2004 – Abril 2007

Fuente: Elaboración propia

Antes de encontrar los factores, se debe estimar en base a la precipitación acumulada el/los días en que podría presentarse un caudal pico (máximo).

La precipitación se empieza a acumular solo si el valor de la precipitación es mayor a 0.5 mm y se ha encontrado que para la cuenca Puyango-Tumbes cuando la acumulación alcanza los 10 mm se espera que ocurra un caudal máximo. Sin embargo, en algunos casos se ha podido observar caudales de magnitud moderada cuando la acumulación ha sido menor a 10 mm. El proceso de acumulación termina cuando se presenta una precipitación menor a 0.5 mm.

Los factores de corrección (**Tabla 2**) son aplicados a la serie diaria de tiempo de precipitación areal del satélite TRMM 3B42RT, pero solo a aquellos días que fueron considerados en el proceso de acumulación (**Figura 6**).

Antes de exceder el valor umbral de 10 mm, pueden pasar varios días, por lo tanto se han considerado rangos para la precipitación acumulada los cuales

pueden variar de un mes a otro, tal como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla. 2 Factores de corrección por mes y rango de lluvia acumulada

Precipitación Acumulada	Meses				
	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
> 0.0 y < 0.5	2	6	6	3	3
>=0.5 y < 0.2	4	5	4	3	3
>=2.0 y < 4.0	5	6	6	3	3
>=4.0 y < 6.0	6	7	4	3	3
>=6.0 y < 8.0	7	5	4	3	3
>=8.0 y < 10	9	5	4	3	3
> 10	2	2	1	3	3

Fuente: Elaboración propia

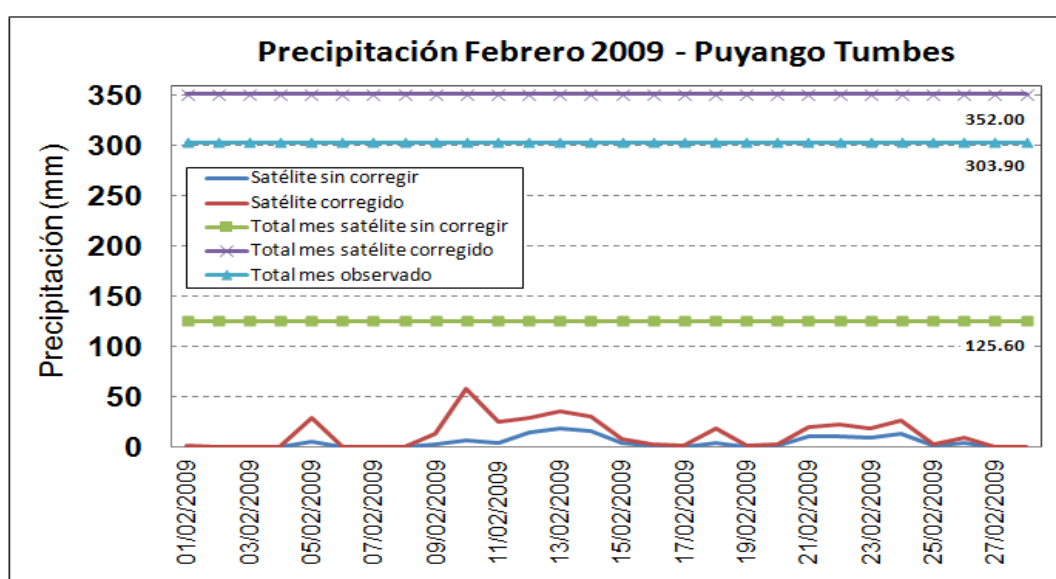


Figura 6. Precipitación diaria del satélite 3B42RT corregida para Febrero 2009

Fuente: Elaboración propia

5.6 Modelamiento hidrológico

Se ha utilizado el modelo hidrológico Sacramento para simular el proceso lluvia – escorrentía en la cuenca Puyango-Tumbes. El modelo Sacramento es un modelo conceptual que toma en consideración la humedad del suelo, este modelo continuo representa los diferentes almacenamientos de agua en el suelo, los cuales son representados por medio de parámetros.

La capa de suelo es dividida en zonas de almacenaje superior e inferior. El almacenaje de la zona superior cuenta para la humedad retenida en la interceptación y la capa de suelo superior. La zona baja cuenta para el volumen de humedad del suelo y almacenaje de agua subterránea. Cada zona, superior e inferior, tiene dos subalmacenajes: (1) *agua en tensión* y (2) *agua libre*. El agua en tensión está ligado a las partículas del suelo, y el agua libre no está ligado a

las partículas del suelo, estando libre de moverse hacia arriba o abajo o lateralmente. Para cualquier zona, las cantidades máximas de agua en tensión y agua libre que pueden contener son especificadas como parámetros del modelo.

El modelo Sacramento usado en este estudio es del tipo agregado es decir los parámetros representan condiciones promedio para toda la cuenca. A continuación se muestran los 14 parámetros que posee el modelo.

Tabla 3. Parámetros del modelo

UZTWM	CAPACIDAD DE LA TENSION DE AGUA DE LA ZONA SUPERIOR [mm]
UZFWM	CAPACIDAD DEL AGUA LIBRE DE LA ZONA SUPERIOR [mm]
LZTWM	APACIDAD DE LA TENSION DE AGUA DE LA ZONA INFERIOR [mm]
LZFPM	CAPACIDAD DEL AGUA LIBRE PRIMARIO DE LA ZONA INFERIOR [mm]
LZFSM	CAPACIDAD DEL AGUA LIBRE SUPLEMENTARIO DE ZONA INFERIOR [mm]
UZK	TASA DE EXTRACCION DE LA ZONA SUPERIOR [mm/día]
LZPK	TASA DE EXTRACCION DIARIA DE LZFP [mm/día]
LZSK	TASA DE EXTRACCION DIARIA DE LZFS [mm/día]
ZPERC	COEFICIENTE DE LA RELACION DE PERCOLACION
REXP	EXPONENTE DE LA RELACION DE PERCOLACION
PFREE	FRACCION DE LA PERCOLACION QUE VA A LZFW
SIDE	FRACCION DEL FLUJO BASE QUE VA A LA RECARGA PROFUNDA
PCTIM	FRACCION DEL AREA QUE ACTUA COMO IMPERMEABLE
ADIMP	AREA IMPERMEABLE ADICIONAL (FRACCION)

Fuente: Elaboración propia

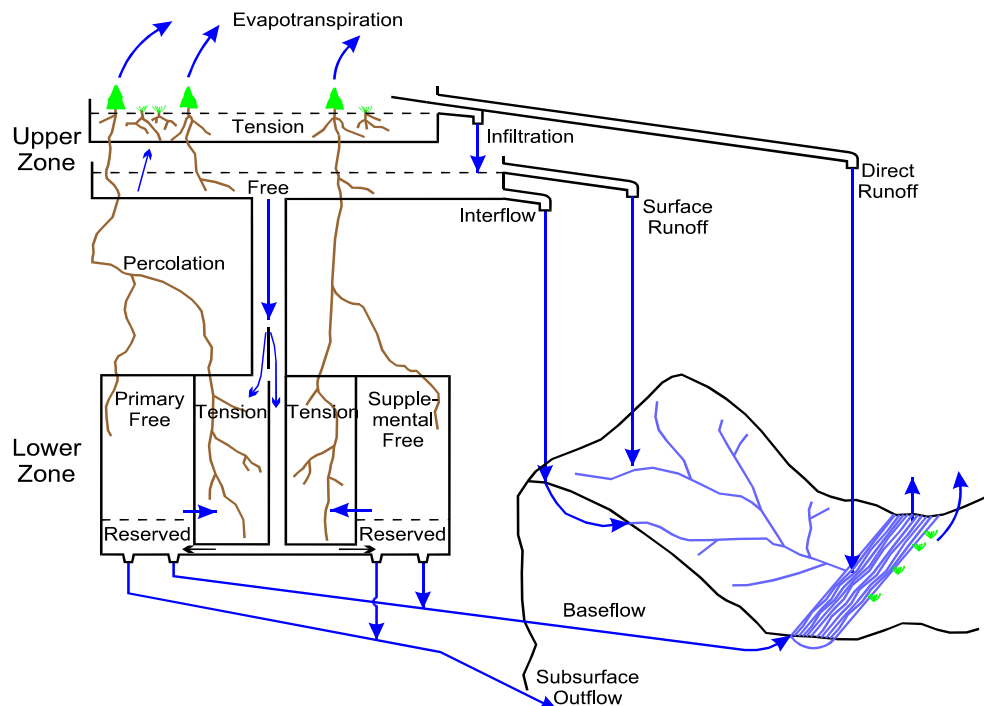


Figura 7. Representación de la transferencia de flujos por el modelo Sacramento

Fuente: Elaboración propia

VI. RESULTADOS

Los datos de precipitación del satélite TRMM han sido descargados en forma diaria para el período 1 Octubre 2008 al 31 Diciembre 2012 en formato de grilla (latitud/longitud) y procesados posteriormente con el software Hydraccess.

Para estimar la precipitación areal se ha utilizado dos métodos: (1) Inverso de la distancia al cuadrado y (2) Kriging, tanto para la estimación de datos observados como para los datos del satélite.

La precipitación del satélite corregida con la metodología usada en este estudio se muestra en las **Figuras 8 y 9**.

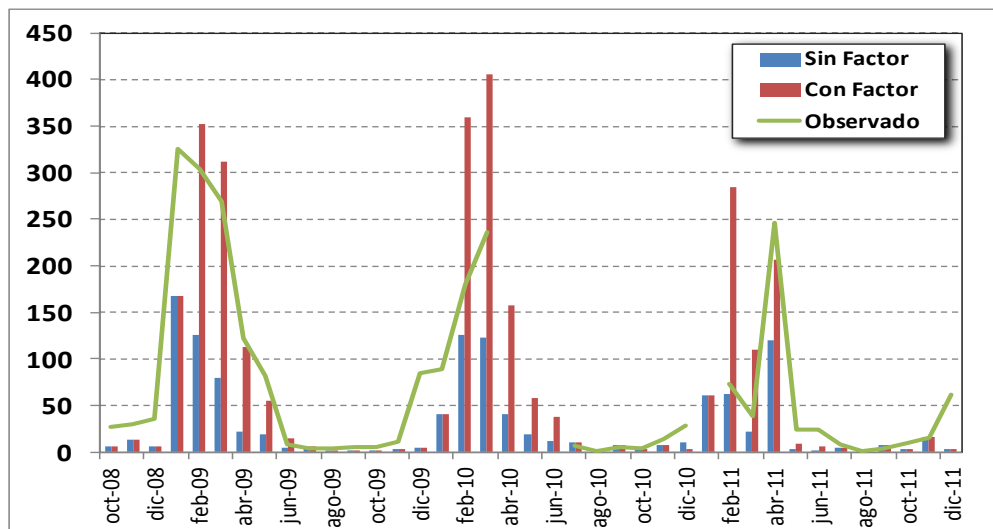


Figura 8. Corrección de la precipitación TRMM (precipitación areal estimada con Kriging)

Fuente: Elaboración propia

Para validar nuevamente la precipitación corregida del satélite, se ha utilizado esta vez el modelo hidrológico Sacramento al cual se ingresó la precipitación del satélite sin corregir (sin factor) y la corregida (con factor) usando los métodos Kriging e inverso de la distancia.

Con el modelo hidrológico Sacramento se han simulado los caudales registrados en la estación hidrológica El Tigre, usando las series de precipitación del satélite TRMM sin corregir (sin factor) y la corregida (con factor). A estos caudales simulados se les ha calculado los siguientes medidores estadísticos: Nash, Error cuadrático medio (RMSE) y Coeficiente de Correlación (R²).

Cabe mencionar que los estimadores estadísticos se han calculado considerando dos situaciones en particular:

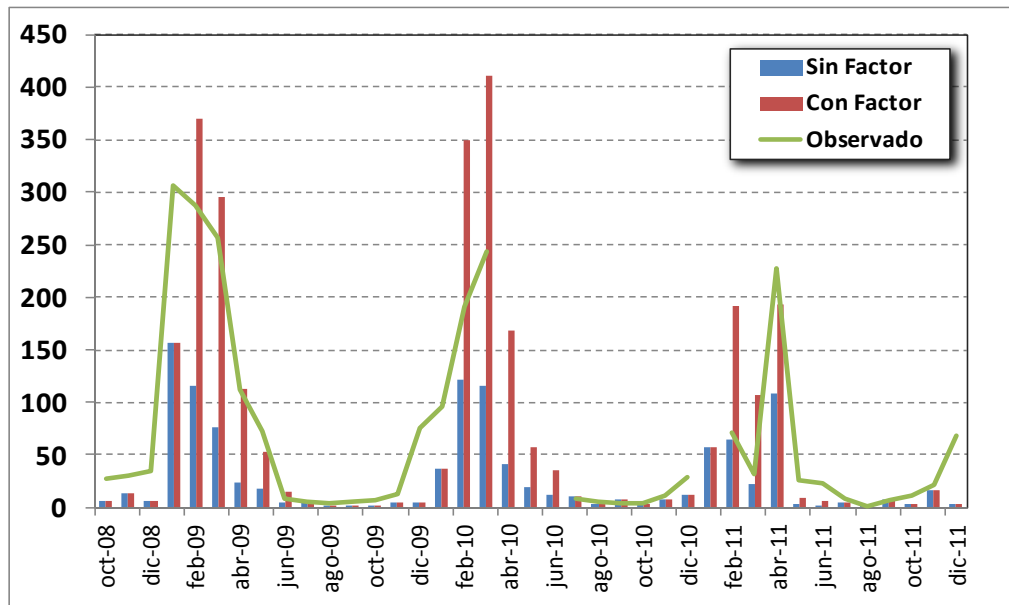


Figura 9. Corrección de la precipitación TRMM (precipitación areal estimada con inverso distancia)

Fuente: Elaboración propia

- Para toda la serie de datos de precipitación diaria (1/10/2008 - 31/12/2011)
- Solo para los meses en que se aplicaron los factores de corrección (1/02/2009 al 30/06/2009, 1/02/2010 al 30/06/2010 y 1/02/2011 al 30/06/2011, esto para saber realmente en cuanto se mejora la calidad del dato del satélite TRMM corregido. (**Tablas 3 y 4**))

Tabla. 3 Resultados estadísticos para toda la serie

Metodos	NASH	RMSE	R2
TRMM Kriging sin corregir	0.8521	1.3569	0.7897
TRMM Distancia sin corregir	0.8441	1.3640	0.7940
TRMM Kriging corregido	0.9304	1.9206	0.6504
TRMM Distancia corregido	0.9432	1.7557	0.6801

Fuente: Elaboración propia

Tabla. 4 Resultados estadísticos para el periodo febrero-junio

Metodos	NASH	RMSE	R2
TRMM Kriging sin corregir	0.6785	2.0984	0.7114
TRMM distancia sin corregir	0.6623	2.1119	0.7140
TRMM Kriging corregido	0.8547	3.0445	0.5256
TRMM Distancia corregido	0.8851	2.7709	0.5622

Fuente: Elaboración propia

Se ha podido apreciar en este estudio, que el factor que corrige la precipitación sobreestima el valor observado en el período Febrero y Marzo (**Figuras 8 y 9**); sin embargo, corrige muy bien en el intervalo de tiempo de Abril y Mayo; esto se pudo apreciar también en los caudales simulados por el modelo hidrológico, en donde el caudal generado en Febrero del año 2010 y 2011 por ejemplo es muy alto (**Figuras 10 y 13**).

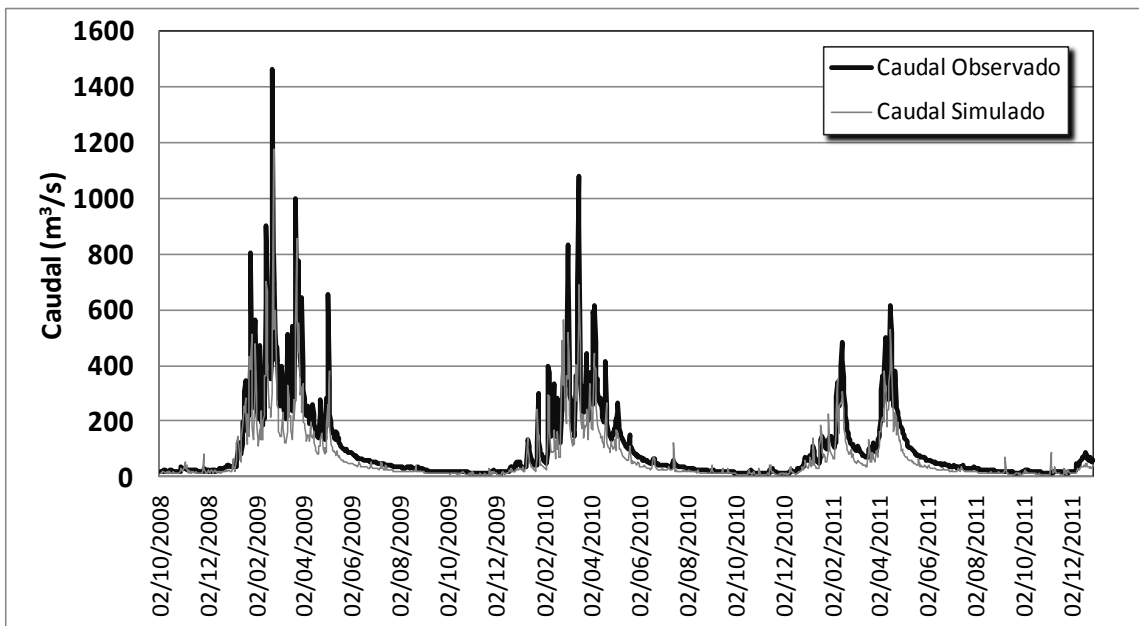


Figura 10. Simulación de caudales con precipitación de satélite sin corregir (método distancia)

Fuente: Elaboración propia

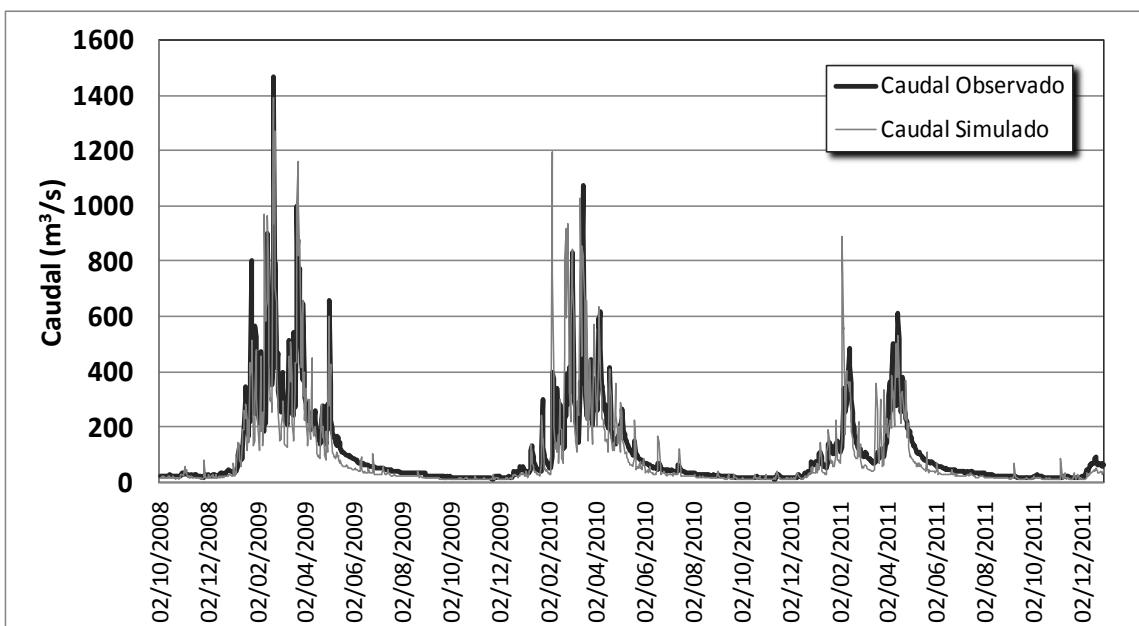


Figura 11. Simulación de caudales con precipitación de satélite corregida (método distancia)

Fuente: Elaboración propia

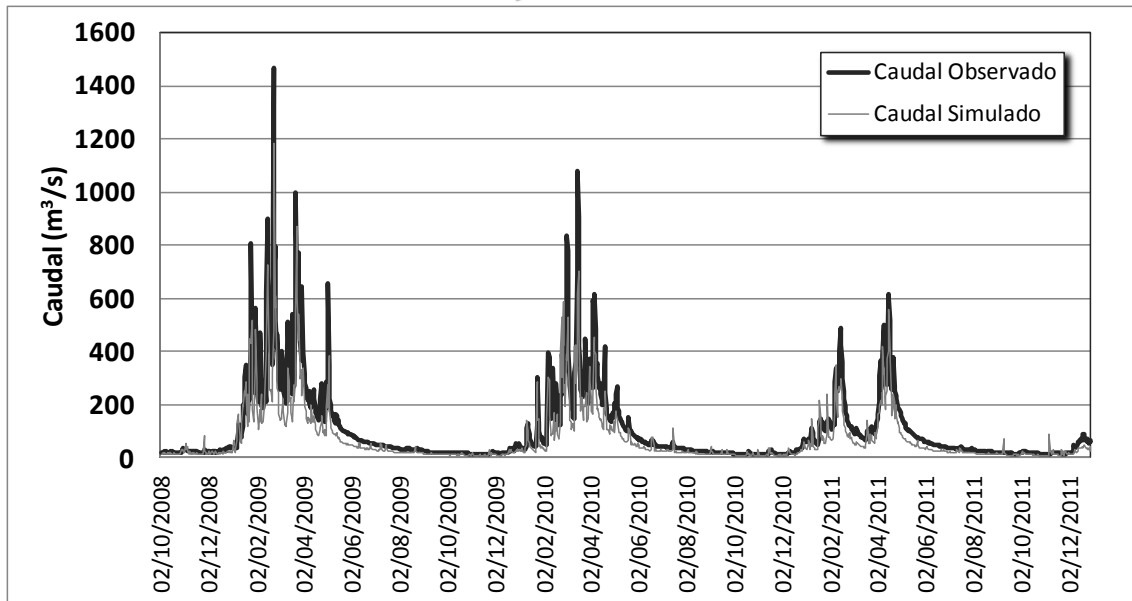


Figura 12. Simulación de caudales con precipitación de satélite sin corregir (método Kriging)

Fuente: Elaboración propia

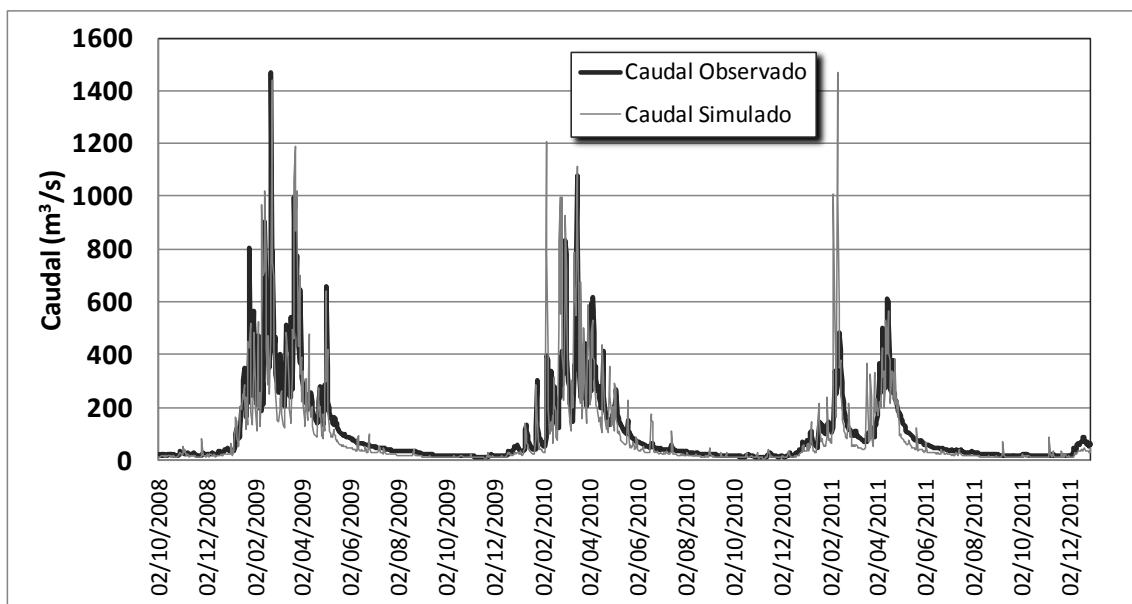


Figura 13. Simulación de caudales con precipitación de satélite corregida (método Kriging)

Fuente: Elaboración propia

De las estadísticas se puede ver que el número de Nash es mejorado tanto para la serie completa como para la serie de Febrero a Junio. También, la mejora es más notoria en el periodo Febrero-Junio. El error cuadrático medio se incrementa y el coeficiente de correlación R^2 disminuye.

Finalmente, entre los dos métodos de interpolación de la precipitación usados en este estudio, se ha observado que con el método de *inverso de la distancia*, el NASH y R^2 son mayores y el error cuadrático medio es menor.

VII. CONCLUSIONES

- La precipitación se mejoró en algunos meses con el factor de corrección pero se sobreestimó en otros.
- La información del satélite TRMM 3B42RT no ha resultado tan mala para el periodo evaluado, ya que se obtuvo un Nash de 0.85 sin aplicar ninguna corrección, lo cual es bastante bueno. Sin embargo, se ha demostrado que el factor de corrección permite incrementar aún más el valor del NASH.
- En los meses que se aplicó el factor de corrección (febrero a junio) el incremento del número de NASH fue contundente. Esto quiere decir que el modelo hidrológico responde con mayor precisión cuando la información de precipitación es mejorada.
- Se debe ajustar el factor de corrección para el período Febrero - Marzo, ya que debido a la sobreestimación de la precipitación en estos meses, se incrementó el error cuadrático medio.