



## XXIII SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

IBAGUÉ, 15 AL 17 DE AGOSTO DE 2018

### METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALERTAS TEMPRANAS ANTE INUNDACIONES A PARTIR DE INFORMACIÓN SATELITAL

*Mario A. Díaz-Granados Ortiz<sup>(1)</sup> y Diego A. Rodríguez Álvarez<sup>(2)</sup>*

*(1) MSCE, Profesor Titular Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, [mdiazgra@unandes.edu.co](mailto:mdiazgra@unandes.edu.co)*

*(2), Estudiante, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, [da.rodriguez2@unandes.edu.co](mailto:da.rodriguez2@unandes.edu.co)*

**RESUMEN:** Los extremos del ciclo hidrológico pueden causar afectaciones y presión sobre los recursos hídricos y es por ello que los sistemas de alerta temprana fundamentados en la observación, monitoreo y pronóstico de los eventos, permiten tener una preparación ante el impacto que generan, dando herramientas de decisión a las autoridades encargadas de la gestión del riesgo.

Los avances en los productos satelitales de clima como PERSIANN-CCS actualmente proveen datos con alta resolución espacio-temporal y pueden mejorar con la aplicación de diferentes algoritmos para la estimación y diferentes métodos de corrección como la técnica de Mapeo Cuantil, mediante la evaluación de ciertos criterios de desempeño obtenidos con base en información de estaciones en tierra, escasas en gran parte del territorio. Dichas metodologías presentan fortalezas y limitaciones pero con la adecuada caracterización del hidrosistema y un riguroso protocolo de modelación matemática permitirá implementar a futuro, alternativas SATI confiables y de bajo costo.

**ABSTRACT:** The extremes of the hydrological cycle can cause affectations and pressure on the water resources and for this the early warning systems based on the observation, monitoring and forecasting of the events, allow to have a preparation before the impact that they generate, giving tools to the authorities of risk management for take decision.

Advances in climate satellite products such as PERSIANN-CCS currently provide data with high spatio-temporal resolution and can be improved with the application of different algorithms for estimation and different correction methods such as the Quantile Mapping technique, by evaluating certain performance criteria based on information from stations on land, scarce in a large part of the territory. These methodologies present strengths and limitations but with the adequate characterization of the hydrosystem and a rigorous mathematical modeling protocol will allow to implement reliable, low-cost FEWS alternatives in the future.

**PALABRAS CLAVE:** SATI, Información satelital, PERSIANN-CCS

Mayor Información



## INTRODUCCIÓN

En general en el país se cuenta con una significativa oferta hídrica, pero en virtud a la presión que se ejerce sobre el recurso y a las condiciones morfológicas del territorio, es recurrente que ante la manifestación de eventos máximos de precipitación, este se vea afectado por inundaciones súbitas que normalmente son informadas de manera tardía por las autoridades y entidades que tienen jurisdicción en la zona, sin que se tenga una adecuada preparación por parte de los habitantes, requiriendo entonces de sistemas de mitigación como los sistemas de alertas tempranas ante inundaciones – SATI (IDEAM, 2015)

Cabe anotar que la única manera de poder analizar el riesgo al que están sometidas las poblaciones y reducir su vulnerabilidad, es a través de la adecuada caracterización del hidrosistema en respuesta ante los eventos de precipitación que generan las crecientes. Sin embargo, como lo refiere Ossa, (2014), una de las mayores restricciones para establecer una herramienta que permita predecir el comportamiento y controlar las inundaciones, está en los datos de precipitación, debido al costo y requerimiento técnico que necesita una densa red hidrometeorológica.

Un SATI debe basarse en los registros en tiempo real de las variables hidrometeorológicas representativas tales como precipitación y caudal, pero debido a la deficiencia de esta instrumentación, así como de la correcta y adecuada caracterización del territorio, se hace necesario recurrir a información secundaria que cumpla estas condiciones y que se pueda emplear en un modelo en particular, con el fin de obtener resultados confiables de los procesos que ocurren en la cuenca.

En la actualidad, tal y como lo refiere (Sorooshian et al., 2014), los avances en la ciencia, la tecnología y la ingeniería, permiten que la información satelital, generada casi en tiempo real, no solo tenga un rol importante en la observación, monitoreo y pronóstico de diferentes variables y fenómenos terrestres, sino que dichos avances están enfocados en sistemas que pueden trabajar de la mano para alertar a la sociedad ante eventos de desastres de manera tal que permiten tener una preparación ante el impacto como es el caso de los sistemas de alerta temprana.

Desde el inicio de los programas satelitales de clima y en particular de precipitación, se han desarrollado metodologías para calibración de la información capturada por los diferentes satélites con el objeto de encontrar las mejores predicciones de los valores realmente ocurridos en las cuencas hidrográficas. Asimismo se deben evaluar diferentes aspectos de estos registros globales tales como la escala espacial y temporal así como la calibración de los programas, ya que muchas veces los datos no son calibrados sino en países desarrollados y por lo tanto puede que no sean aplicables en otros territorios (Caicedo, 2008).

Mayor Información



Los retos y objetivos de la información satelital se asocian a la órbita de cada programa y por ende de cada tipo de plataforma. Por ejemplo, los satélites de órbita terrestre geostacionaria (GEO), que indican que mantienen la misma velocidad angular de la tierra, permitiendo mantenerlo en su trayectoria, proveen imágenes con resoluciones temporales cada 15-30 min de diferentes bandas multiespectrales centradas en el rango visible y en el infrarrojo, generando imágenes efectivas para la identificación de nubes altas y frías propias de sistemas convectivos, razón por la cual es importante combinar dicho producto con imágenes de microondas pasivas de satélites de órbita terrestre baja o estimaciones de radar (Sorooshian et al., 2014).

El primer programa satelital encargado del monitoreo de precipitación en regiones tropicales (Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM), fue lanzado en 1997, y luego de 17 años de registro de datos fue reemplazado por el programa Global Precipitation Mission – GPM, el cual, continua con la generación de los productos del programa predecesor y es capaz de monitorear el 90% de la superficie global en menos de 3 horas (Hou et al., 2008) citado en (Sorooshian et al., 2014), sin embargo, para mejorar la resolución de los productos generados por los programas satelitales, se requiere de algoritmos que combinan información de satélite con información de la banda del infrarrojo.

Las investigaciones realizadas recientemente han empleado datos con una resolución espacial de  $0,25^\circ$ , aun cuando los servidores de los programas satelitales en la actualidad consolidan datos con una resolución de  $0,04^\circ$ , lo que permitirá conocer mejor la distribución espacial del campo de precipitación en cuencas de tamaño similar a la cuenca de estudio.

Por ejemplo, estudios de referencia emplean los datos del programa TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis - TMPA, los cuales podrían completarse con otras fuentes de datos aplicando técnicas de “downscaling” con el fin de poder comparar cuáles tienen mayor aplicabilidad en el territorio nacional (Ossa, 2014).

Sobre la generación de información satelital de precipitación, por ejemplo, el algoritmo para la producción de datos del sistema TMPA es: i) Calibrar y combinar las estimaciones de precipitación de microondas. ii) Crear las estimaciones de precipitación en la banda del infrarrojo. iii) Combinar las estimaciones de microondas y del infrarrojo. iv) Incorporar los datos de campo. Sin embargo esta es tan solo una de las varias fuentes de datos satelitales de precipitación que pueden ser implementadas en un SATI y por ello surge la necesidad de evaluarlas con el objeto de establecer la aplicabilidad en el territorio colombiano.

Adicionalmente, al considerar la distribución espacial que presentan tanto los datos de satélite como los datos de las estaciones hidrometeorológicas interpolados a partir de métodos geoestadísticos, tendrán mayor aplicabilidad modelos matemáticos de tipo semidistribuido o distribuido cuya selección puede basarse en los métodos propuestos por

Mayor Información



(McMillan et al., 2011 citado en Ossa, 2014) pero que no se constituye en el único método de selección de modelos.

En cuanto a las alertas para inundaciones, frecuentemente los datos de satélite se convierten en la única opción debido a que muchas regiones apartadas no cuentan con estaciones hidrometeorológicas, sino que la cobertura de posibles fuentes de radar igualmente se ve afectada máxime cuando la topografía del terreno es montañosa como ocurre en gran parte del territorio nacional sumado al hecho que el mantenimiento y la operación de estos sistemas demandan grandes recursos (Sorooshian et al., 2014).

Entre los sistemas desarrollados de alerta temprana ante inundaciones se cuenta entre otros con el All-Hazard Warning, Analysis, and Risk Evaluation System (PDC - Disaster AWARE), The Global Flash Flood Guidance System (HRC - GFFGS), Flood Early Warning System (Delft-FEWS), The Integrated Flood Analysis System (ICHARM - IFAS), a los cuales se pueden acoplar los datos de diferentes productos satelitales.

Tal y como lo señala Carrizosa, (2014) “es probable que la cuenca alta del Bogotá sea la más importante del país ya que suministra casi la mitad del agua que se usa en Bogotá y en varios municipios de la altiplanicie”. Por consiguiente, dada la importancia, las características y las amenazas a las que está sometida esta cuenca hidrográfica, así como otros factores tales como las condiciones de regulación, debidas a la presencia de los embalses de Sisga, Tominé, Neusa y San Rafael, sumado al constante monitoreo que se ha implementado y que sirve de calibración de modelos matemáticos, ésta se convierte en el escenario ideal para la implementación de la metodología propuesta ya que permite considerar una variedad de factores propios de las cuencas del país.

Asimismo, la metodología de un sistema de alerta temprana que se pretende formular busca definir diferentes grados de afectación con base en los conceptos de la gestión de riesgo, definida como la manera en que se controlan o transforman las condiciones ambientales de amenaza, permitiendo a las comunidades conocer los eventos peligrosos, organizarse y prepararse para una respuesta efectiva (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010).

Finalmente, el presente trabajo de investigación busca evaluar las fortalezas y limitaciones que puede tener un sistema de alertas tempranas ante inundaciones a partir de información satelital, con base en la variabilidad de la precipitación que se convierte en un reto para la hidrociencia que observa este fenómeno a partir de sensores remotos.

Estos productos de información satelital, luego de la aplicabilidad de múltiples algoritmos, generan información con una alta resolución espacio-temporal de cobertura global, considerando que dentro de los productos de satélites de órbita baja empleados para mejorar la estimación de la precipitación, se encuentra la limitación de resolución temporal respecto de los satélites geoestacionarios, esperando que a futuro los programas satelitales evidencien

Mayor Información

mejora continua en cuanto al muestreo y la captura de información directa para que así mismo se mejore la estimación de la precipitación entendiendo que así como cualquier sistema de captura de información, el valor de la variable puede presentar incertidumbre debida en este caso, a la época del año, el tipo de tormenta, la elevación y el clima de la región (Sorooshian et al., 2014).

## METODOLOGÍA SATI-FEWS

La metodología de SATI propuesta en esta investigación, denominada Flood Early Warning Satellital System – FEWSS (por sus siglas en inglés), consiste en la definición de los requerimientos para el análisis de una cuenca de estudio desde la obtención de los datos de satélite, hasta la evaluación de los resultados para un evento inundación súbito generado principalmente por la intensidad y la duración de la lluvia, la topografía, las condiciones del suelo y la cobertura vegetal, fenómenos que ocurren comúnmente en nuestro territorio, con pocas señales de advertencia.

La metodología propuesta sigue los lineamientos del Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas comunitarios de alerta temprana ante inundaciones elaborado por la Organización de los Estados Americanos OEA (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010), el cual describe dos componentes principales, cuatro módulos y cinco elementos que se indican a continuación (Figura 1). La propuesta de la metodología del SATI se centró en detalle para el primer componente.

- Componente I: Consideraciones hidrológicas
  - Módulo I: Observación y monitoreo hidrometeorológico; y
  - Módulo II: Pronóstico de crecidas.
- Componente II: Consideraciones organizativas
  - Módulo III: Identificación y Comunicación de la alerta; y
  - Módulo IV: Comunicación de la alerta.

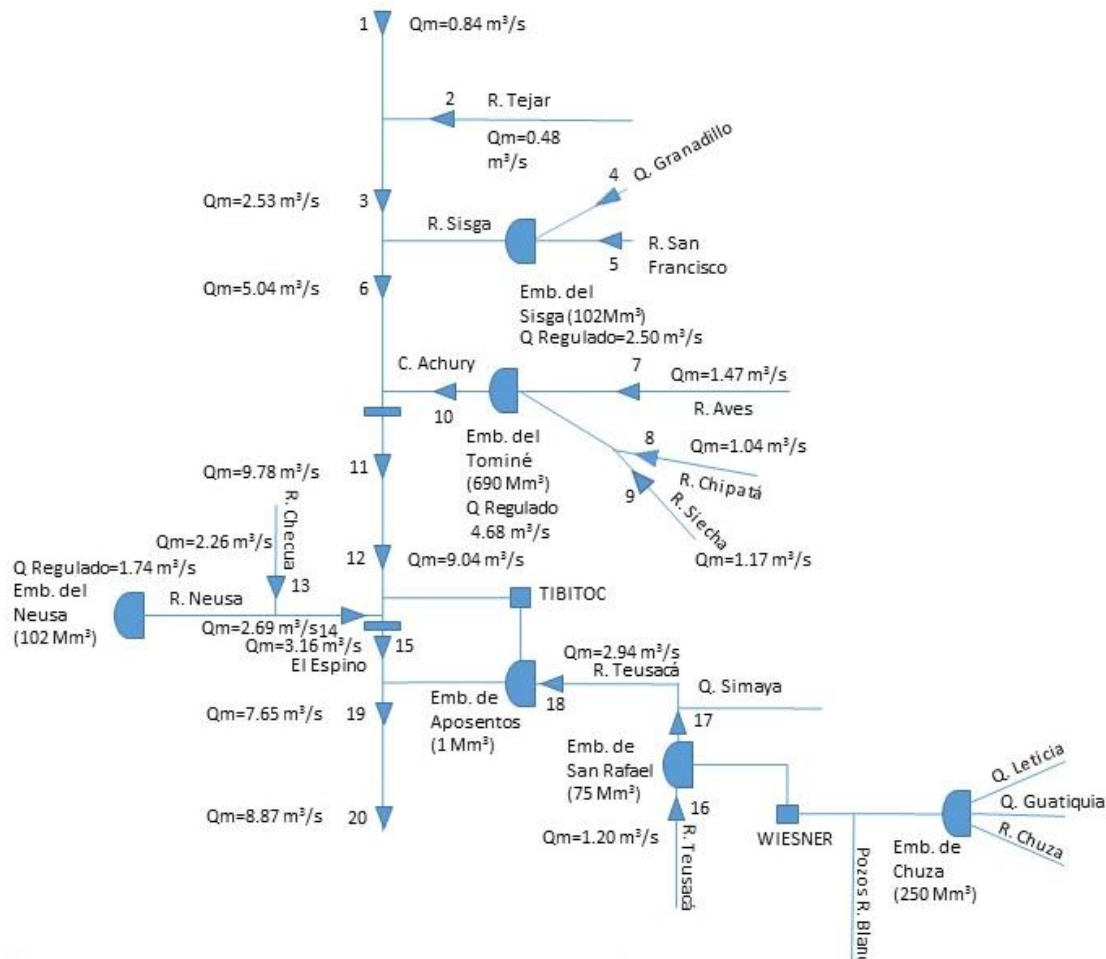


**Figura 1.-** Elementos de un SATI

Nombre de la fuente: Adaptado de (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010).

Mayor Información

A partir de la identificación y caracterización del hidrosistema (Figura 2) y de la información a emplear, generalmente para la construcción de los modelos matemáticos, se requiere de la recopilación de información del territorio fundamentada en registros topográficos, restitución de cartografía, modelos de elevación digital del terreno. Al respecto, la información geográfica del territorio es administrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el cual cuenta con bases de datos temáticas en formato digital. Igualmente se encuentra disponible el modelo de elevación del terreno del producto ASTER GLOBAL DEM que presenta con una resolución espacial de 30 m., el cual puede ser obtenido libremente del portal <https://earthexplorer.usgs.gov/>.



**Figura 2.- Elementos de un SATI**  
Nombre de la fuente: Adaptado de (Groot, 2012).

Conforme al modelo hidrológico empleado, se hace uso de la herramienta de integración HEC-GeoHMS para la caracterización del hidrosistema, para ello se sigue el procedimiento descrito a continuación, y que se encuentra indicado en (Rodríguez et al., 2007).



1. Con el modelo de elevación digital del terreno, se procede a realizar la corrección del mismo mediante el llenado de vacíos o depresiones de manera tal que se garantice un escurrimiento entre las celdas contiguas a determinado pixel.
2. Conforme a lo anterior se procede a caracterizar la dirección de flujo, la cual crea una grilla con una codificación de direcciones según el vecino de menor elevación de cada pixel.
3. Posteriormente se define la grilla de acumulación de flujo, la cual cuantifica el número de pixeles o celdas que drena.
4. Seguidamente se define la red de drenaje en formato ráster y se caracterizan los tramos de los ríos separados entre nodos y arcos.
5. Se procede a realizar la delimitación de subcuencas y la generación de los polígonos de las mismas.
6. Se genera un nuevo proyecto de HEC-HMS con el objeto de crear una base de datos geográfica que convierte los elementos creados anteriormente conforme al directorio de datos y las tablas de características que requiere y considera el modelo matemático.
7. Finalmente se exportan el modelo generado a fin de modificar las demás condiciones de la cuenca de análisis a partir de la topología creada, modificaciones que consisten principalmente en la adición de los embalses y las características de los mismos así como las particularidades del hidrosistema.

### **Pronóstico de la Crecida**

A partir de la definición que un pronóstico puede ser de diferentes tipos, a corto, mediano y largo plazo basado en las condiciones particulares previas al evento, en la información probabilística de ocurrencia del evento y en la determinación de un evento máximo probable respectivamente, en este módulo se parte de la información recopilada previamente para establecer los criterios que permitan realizar dichos pronósticos.

Conforme al modelo de elevación digital es importante realizar la identificación de zonas naturalmente inundables, inundaciones que pueden clasificarse conforme a las causas que las originan: i. Encharcamiento por lluvias intensas; ii. Encharcamiento por deficiencias de drenaje superficial, iii. Desbordamiento de corrientes naturales y iv. Desbordamiento de otros cuerpos de agua (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010b).

Otra manera de clasificación de las inundaciones, y que a su vez ha sido más empleada en el análisis de hidrosistemas, consiste en el origen de las mismas en: i. Pluviales ocasionadas por exceso de lluvia y ii. Fluviales por desbordamiento de ríos. (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010b).

Se deben recolectar los mapas de inundaciones disponibles elaborados como consecuencia de los eventos generados en periodos húmedos a partir de un análisis de imágenes aéreas. Sin embargo, es importante resaltar que en la práctica estos mapas de inundaciones pueden

Mayor Información

ser generados con los modelos hidráulicos de los cauces principales integrados a los sistemas de información geográfica y a un modelo de elevación digital, así como se requiere contar con la información de caudales del evento para la modelación. Una guía de elaboración de dichos mapas se presenta en (Rodríguez, González, Medina, Pardo, & Santos, 2007).

### **Umbrales de Precipitación**

Sobre los diferentes umbrales a definir para un sistema de alertas tempranas, entendiendo el umbral como la magnitud físicamente peligrosa a partir de la cual se justifica una determinada acción de protección, estos se convierten en un nivel de alerta que puede ser de dos tipos: i. Umbrales de lluvia y ii. Umbrales de niveles del Río (Organización de los Estados Americanos (OEA), 2010b). Para la presente investigación cobran importancia los umbrales de precipitación los cuales por su definición son aplicables a inundaciones de origen pluvial, adicional al hecho que proveen un mayor tiempo de la acción de respuesta. Los pasos recomendados en el manual se basan en el análisis de frecuencias de los datos de precipitación máxima en 24 horas.

- i. Se define la cuenca de análisis o estudio y se seleccionan las estaciones de lluvia.
- ii. Se obtienen los registros de lluvia máxima diaria para cada estación seleccionada. Un dato por año.
- iii. Si existen datos de lluvia en 24 horas, estos deben ser utilizados.
- iv. Se procede con el análisis estadístico de la serie de datos máximos (un análisis por estación). Ven Te Chow propone una relación para definir un valor probable para un periodo de retorno  $Tr$ .

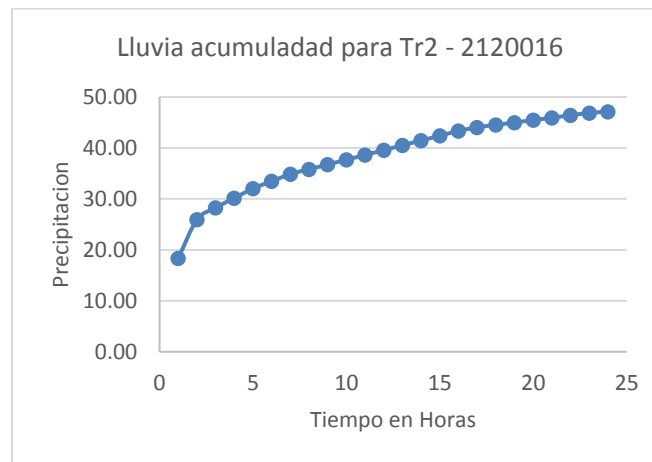
$$X(Tr) = X + K * S \quad [1]$$

Donde:  $X(Tr)$  es el evento a estimar,  $X$  es el promedio de la serie anual de precipitaciones máximas,  $K$  es un factor de frecuencia del método estadístico y  $S$  es la desviación estándar de la serie.

- v. Se define el período de retorno mínimo de recurrencia de inundaciones. Generalmente se establece de 2 años;
- vi. Se calcula el tiempo de concentración de la cuenca de estudio. Normalmente se calcula este tiempo hasta la comunidad vulnerable o bien hasta el punto de análisis hidrológico.
- vii. Se obtiene la lluvia media de la cuenca; aunque en el manual se indica un promedio aritmético, en el análisis se aconseja la ponderación por áreas de influencia determinadas con la intersección de los polígonos de Thiessen ya que este valor es más representativo.
- viii. Se define una distribución horaria (hipotética) de la lluvia; usando el valor de la lluvia de diseño (calculada a partir de la lluvia media) para el período de retorno de 2 años;



- ix. Se define la gráfica de lluvia acumulada para niveles de alerta y se calculan los umbrales (niveles de alerta). El umbral que podría causar un desbordamiento del río es el definido por el tiempo de concentración.



**Figura 2.-** Lluvia acumulada – Umbrales de alerta.  
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

En este sentido, los valores de precipitación diaria tanto observados como los extraídos del producto PERSIANN – CCS se comparan con dicho umbral con el fin de establecer los eventos que pueden generar afectaciones por inundación.

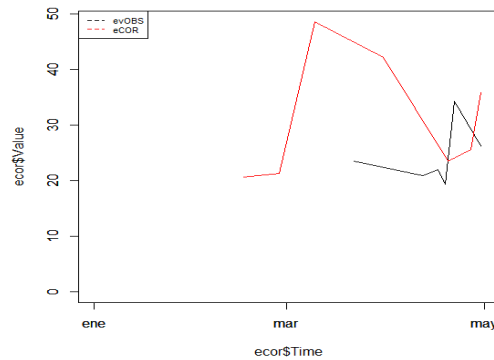
Para efectos de realizar la comparación, se analizaron el número y la magnitud de los eventos discretos que sobrepasan dicho umbral para los datos corregidos del producto satelital, de manera tal que pueda establecerse si los mismos son compatibles respecto del mismo análisis para los datos observados.

El análisis se realizó para los datos de mejor ajuste, que se presentan para la cuenca del Río Bogotá a la Altura de la estación Sta Rosita, que tiene un tiempo de concentración de 2.93 horas y por ende un umbral de 26.82 mm para el nivel de alerta “rojo” y 17 mm para el nivel de alerta “amarillo”.

Para el umbral de alerta “rojo”, y los datos observados se encontró un evento ocurrido el 22 de abril de 2011 con un valor de precipitación promedio de 48.52 y un día de duración, mientras que para los datos de información satelital, se encontraron tres eventos ocurridos el 9 y 30 de marzo y el 29 de abril, con igual duración y en promedio una lámina de agua de 48.52 mm 42.21 mm y 35.79 mm respectivamente.

Para la evaluación del nivel de alerta amarillo y los datos observados, se encontraron 6 y 7 eventos para los datos observados y los datos satelitales respectivamente. La comparación de los valores diarios promedio así como la fecha de ocurrencia se presenta en la Figura 3,

figura en la cual se puede evidenciar una sobreestimación de los datos del producto PERSIAN –CCS corregidos.



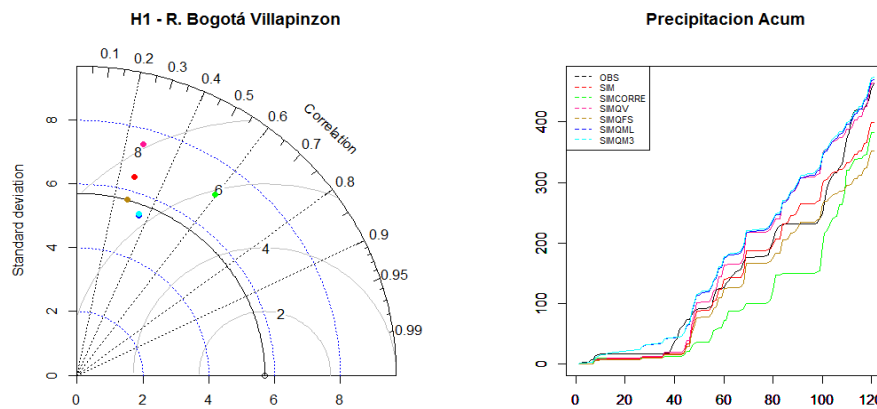
**Figura 3.-** Eventos discretos para los umbrales de alerta, cuenca Sta Rosita.  
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados y discusión del presente capítulo se centran en los métodos de corrección satelital y en la modelación del proceso lluvia escorrentía llevada a cabo para el caso de estudio.

### Corrección de información satelital

Teniendo en cuenta las diferentes metodologías para la corrección del sesgo revisadas, los resultados de las series corregidas se ejemplifican en la Figura 4 en la cual se presentan los diagramas de Taylor para la subcuenca de Villapinzón en relación a la comparación de las series de precipitación del año 2011 observadas (negro), crudas (rojo) y corregidas por los métodos de factor de Bias Multiplicativo (verde), El Factor Bias denominado volumétrico (rosa), el Factor de Bias obtenido de la serie total histórica para el periodo 2003 – 2015 (dorado) y finalmente mediante el método de mapeo cuantil (azul y cian).



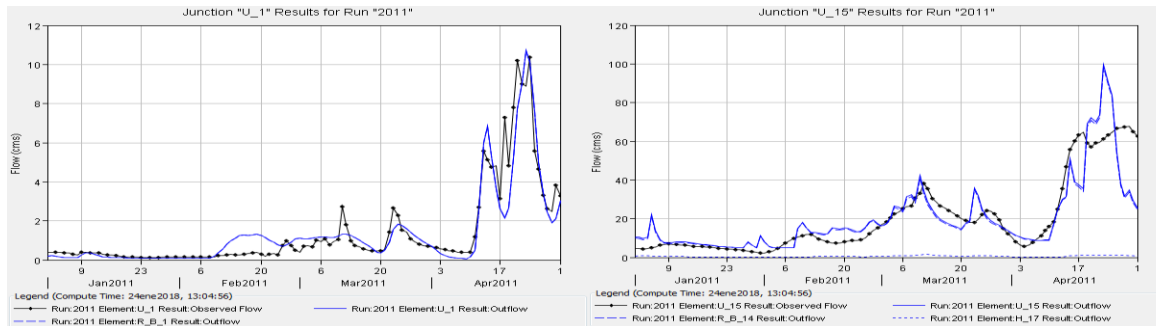
**Figura 4.-** Diagramas de Taylor para series corregidas de precipitación satelital.  
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Mayor Información

Del análisis anterior se evidencia la habilidad de la técnica de mapeo cuantil mediante la aproximación no paramétrica, para corregir las estimaciones de precipitación satelital, siguiendo los propósitos del presente estudio, los cuales son reducir los errores y mantener los volúmenes de precipitación ocurrida en la cuenca para un periodo de año húmedo en el cual son útiles dichos volúmenes de precipitación total de los eventos a fin de inicialmente comparar con los umbrales de precipitación definidos, y seguidamente, realizar las modelaciones para la estimación de los hidrogramas que puedan generar las crecientes indicativas de inundaciones en las áreas de estudio

### Modelación Hidrológica

A partir de los resultados de las subcuencas en donde se evidencia que los mejores ajustes corresponden a las cuencas de menor tamaño que no presentan efectos por las condiciones de regulación. Como resultado de la simulación inicial para el periodo húmedo, (año 2011), se compararon los hidrogramas obtenidos con los observados en cada una de las subcuencas de estudio.



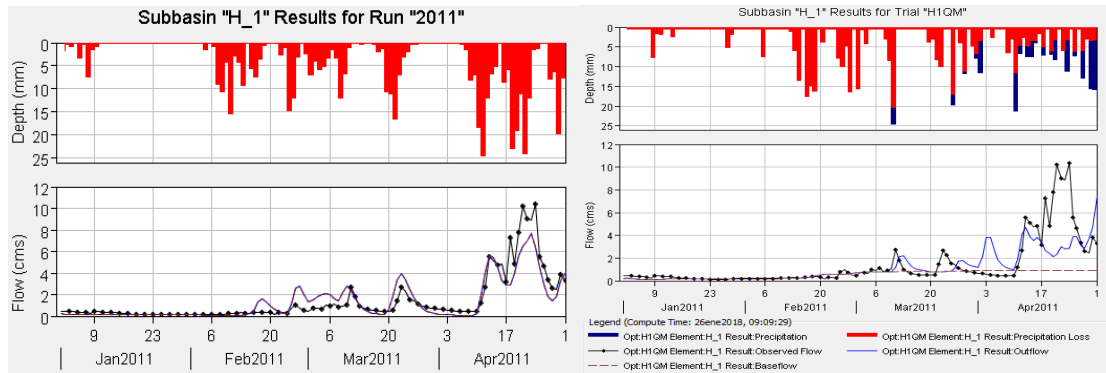
**Figura 4.-:** Simulaciones periodo húmedo año 2011 Villapinzon (izq) y La Balsa (der.).

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Si bien se observa una similitud entre los hidrogramas obtenidos en cuencas no intervenidas, se evidencian también las discrepancias como efecto de la regulación que existe en la cuenca sumada a los trasvases realizados para el suministro de agua para consumo requerido por la Ciudad de Bogotá, lo cual no deslegitima los resultados del riguroso proceso de calibración llevado a cabo ya que para la representación de las condiciones de la cuenca alta reflejadas en la estación La Balsa, se encuentran coeficientes de Nash aceptables del orden de 0.7.

Vale la pena resaltar que en la mayoría de subcuencas analizadas, exceptuando la subcuenca del Embalse Neusa, la pérdida de precipitación fue extremadamente alta aun cuando las condiciones de saturación del suelo para el año 2011 debieran ser altas.

Una vez se encuentra calibrado el modelo, se proceden a simular las diferentes series de precipitación satelital, tanto crudas como corregidas por Factor Bias Multiplicativo, Factor Bias volumétrico y Mapeo Cuantil, así como para la calibración a partir de la información satelital la cual presenta un coeficiente de Nash de 0.41.



**Figura 4.-:** Simulaciones periodo húmedo año 2011 y diferentes series de precipitación.  
Precipitación Red Hidrometeorológica (izq) y PERSIANN QM Calibrada (der.).

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Finalmente, luego de simular los procesos lluvia escorrentía a lo largo de toda la cuenca alta para las precipitaciones.

En la comparación de hidrogramas para el caso de la información de la red hidrometeorológica, se tiene una precipitación de 463 mm, un caudal pico de 7,7 m<sup>3</sup>/s ocurrido el 23 de abril y un volumen de escorrentía de 133 mm. Para la precipitación corregida mediante bias multiplicativo se tienen 398 mm de precipitación un caudal pico de 6,6 m<sup>3</sup>/s ocurrido el 12 de marzo y un volumen de 102 mm del hidrograma, resultados similares para el caso de la precipitación corregida con Factor de Bias Multiplicativo. En cuanto a la corrección por mapeo cuantil se tiene una precipitación total de 469 mm, un caudal pico de 5,0 m<sup>3</sup>/s que ocurre el 19 de febrero y un volumen de escorrentía de 149 mm. En consecuencia, si bien los métodos robustos de corrección de datos satelitales pueden representar los volúmenes de precipitación ocurridos, los pulsos de precipitación no son comparables, condición que se mantiene a pesar de los diferentes técnicas de corrección desarrolladas en la literatura.

## CONCLUSIONES

Los avances en la producción y procesamiento de la información satelital de precipitación actualmente van de la mano con los objetivos de los sistemas de alerta temprana ante inundaciones, los cuales son proveer información con alta resolución espacial y temporal los cuales pueden mejorar no solo al avance de las tecnologías de los programas satelitales, sino a los diferentes algoritmos aplicados para la estimación.

Si bien los algoritmos desarrollados para la estimación de precipitación satelital, emplean fuentes de información en tierra provenientes de estaciones o de radares, las mismas pueden ser mejoradas considerando una mayor cantidad de dichas fuentes para el territorio colombiano ya que las correcciones globales emplean redes hidrometeorológicas generales como por ejemplo el monitoreo que realiza el Centro de predicción del Clima de la NOAA,

Mayor Información



así como el Centro de Datos de escorrentía Global de la Organización meteorológica mundial (WMO).

En general las estimaciones de precipitación satelital pueden mejorar no solo con la corrección de sesgo como tradicionalmente se ha realizado sino que incluso se indican mejoras a partir de incorporar información de los diferentes canales del satélite geoestacionario.

La habilidad de emplear hoy en día un método robusto de corrección de información satelital como el método de mapeo cuantil no solo dará mejores resultados en cuanto a los volúmenes de precipitación acumulada y la reducción de los errores respecto de las series observadas, sino que el mismo no requerirá de dichas series para su corrección lo que favorece su capacidad de predicción.

A partir de las fortalezas y limitaciones presentadas, las mismas se convierten en oportunidades de desarrollo y mejora para que las estimaciones de precipitación puedan ser aplicadas de en el territorio colombiano en un futuro cercano, principalmente bajo la implementación o mejora de un algoritmo que emplee la información de la red hidrometeorológica nacional y de los diferentes radares implementados en diferentes zonas del país con fin de recrear los pulsos de precipitación que originan los eventos de inundación en el territorio colombiano.

El desarrollo y mejora deberá estar enfocado en el estudio de la corrección de errores de precipitación y sesgo de las estimaciones, así como del análisis de las fuentes de incertidumbre propia de la captura de información y del muestreo del territorio, y que considere tendencias regionales, validación de resultados en incluso efectos de fenómenos macroclimáticos y de cambio climático.

Finalmente el adecuado y riguroso proceso de caracterización del hidrosistema, determinando principalmente la causa, tipo y origen de las inundaciones, sumada a la importancia de un adecuado protocolo de modelación que incluya un riguroso proceso de calibración, permitirá que en efecto con metodologías similares a la propuesta en esta investigación, en los próximos años se pueda contar con herramientas sencillas de pronostico con un bajo costo que sean aplicables en el territorio colombiano y que apoyen la toma de decisiones asociadas a la gestión del riesgo al que frecuentemente se ven enfrentadas diferentes poblaciones.

## REFERENCIAS

- Caicedo, F. (2008). *Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia)*. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10554/3807>

Mayor Información



- Groot, A. (2012). Enfrentando el desafío histórico del abastecimiento de agua en Bogotá.
- IDEAM. (2015). Comunicado especial No. 014. Retrieved from [http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset\\_publisher/96oXgZAHRhJ/content/comunicado-especial-n-014-alerta-roja-por-crecientes-subitas-e-inundaciones-en-la-cuenca-alta-del-rio-bogota](http://www.ideam.gov.co/web/sala-de-prensa/noticias/-/asset_publisher/96oXgZAHRhJ/content/comunicado-especial-n-014-alerta-roja-por-crecientes-subitas-e-inundaciones-en-la-cuenca-alta-del-rio-bogota)
- Organización de los Estados Americanos (OEA). (2010). *Manual para el diseño, instalación, operación y mantenimiento de sistemas comunitarios de alerta temprana ante inundaciones*. Honduras.
- Ossa, J. (2014). *Using the Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) to force a flood model in a small mountainous catchment: case study Bogota river*. Imperial College London, Londres, Inglaterra.
- Rodríguez, E., González, R., Medina, M., Pardo, Y., & Santos, A. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de estudio en la parte baja del Río Las Ceibas ( Neiva- Huila ). *Avances En Recursos Hidráulicos*, (16), 65–78.
- Sorooshian, S., Nguyen, P., Sellars, S., Braithwaite, D., Agha, A., & Hsu, K.-L. (2014). Satellite-based remote sensing estimation of precipitation for early warning systems. In A. Ismail-Zadeh, J. Fucugauchi, A. Kijko, K. Takeuchi, & I. Zaliapin (Eds.), *Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications* (Vol. 9781107033, pp. 99–112). Cambridge: Cambridge University Press. <http://doi.org/10.1017/CBO9781139523905.011>

Mayor Información