

**VALIDACIÓN DE LA ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN POR SATÉLITE
APLICANDO LA TÉCNICA HIDROESTIMADOR**

María Paula Hobouchian¹, Yanina García Skabar^{1,4,5}, Daniel Barrera^{2,5,6}, Daniel Vila⁷ y Paola Salio^{2,3,4}

¹Departamento de Investigación y Desarrollo. SMN. Buenos Aires, Argentina.

²Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. FCEyN UBA. Buenos Aires, Argentina.

³Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. CONICET UBA. Buenos Aires, Argentina.

⁴UMI-Instituto Franco Argentino sobre Estudios del Clima y sus Impactos. Buenos Aires, Argentina.

⁵CONICET. Buenos Aires, Argentina.

⁶Facultad de Agronomía. UBA. Buenos Aires, Argentina.

⁷División de Satélites y Sistemas Ambientales. CPTEC. Cachoeira Paulista, Brasil.

(Manuscrito recibido el 10 de agosto de 2015, en su versión final el 22 de abril de 2016)

RESUMEN

La técnica Hidroestimador para estimar precipitación por satélite fue desarrollada originalmente en la National Oceanic and Atmospheric Administration/National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA/NESDIS). En el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) de Argentina, esta técnica volvió a estar operativa a partir de septiembre de 2013, y utiliza imágenes del canal infrarrojo térmico del satélite GOES-13 e información de variables meteorológicas pronosticadas por el modelo ETA. Los píxeles de lluvia y no lluvia, se separan de acuerdo a un valor construido con la media y la desviación estándar de la temperatura de brillo en un área centrada en el píxel de interés. Las nubes en un determinado píxel, producen precipitación si poseen topes más fríos que la media de los píxeles circundantes. La tasa de precipitación, se ajusta teniendo en cuenta la humedad del entorno, a partir de datos de humedad relativa y agua precipitable de los modelos de pronóstico numérico. En la página web del SMN, los mapas de precipitación instantánea están disponibles cada 30 minutos, y los mapas de precipitación acumulada cada 6, 12 y 24 horas, con una resolución espacial de 4 km.

Actualmente, se lleva adelante el seguimiento y la aplicación de diferentes cambios en el algoritmo con el fin de mejorar esta estimación, que incluyen una versión asociada al filtrado de nubes cirrus, como también la comparación con una versión que no discrimina clusters de nubes.

En este trabajo, se realiza una validación cada 24 horas de la versión operativa y las versiones de prueba de la estimación de precipitación, teniendo en cuenta el periodo de un año completo de datos disponibles. Esta evaluación integral, consiste en el análisis de diferentes estadísticos en forma puntual, y en la red completa de estaciones pluviométricas disponible en tiempo real.

En el sur de Sudamérica, que presenta diferentes regímenes de precipitación, se pudo observar en la validación diaria para los meses disponibles, que el Hidroestimador tiende a subestimar la precipitación en los eventos de precipitación débil, tal como mostraron Salio et al. (2015), pero aparece una sobrestimación importante en los

eventos de precipitación más intensa.

Palabras clave: Precipitación, Hidroestimador, Sudamérica.

VALIDATION OF SATELLITE PRECIPITATION ESTIMATE WITH HYDRO-ESTIMATOR TECHNIQUE

ABSTRACT

The Hydro-Estimator technique to estimate precipitation from satellite was originally developed at the National Oceanic and Atmospheric Administration / National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA / NESDIS). In Argentina, a local version of this technique became again operational at the National Meteorological Service from September 2013. It is based on thermal infrared channel images from GOES-13 satellite and forecasted meteorological variables from ETA model outputs. Rain and no rain pixels are separated according to a temperature value built with the mean and standard deviation of the brightness temperature at an area centered on the pixel being analyzed. The clouds in a given pixel produce precipitation if they have colder tops than the average of the surrounding pixels. The precipitation rate is adjusted considering data from relative humidity and precipitable water of numerical forecast models. On the website of SMN, precipitation rain rate maps are produced and uploaded to internet every half hour, and accumulated precipitation maps every 6, 12 and 24 hours, with a spatial resolution of 4 km.

Currently, monitoring and the application of different changes in the algorithm are being performed in order to improve the estimate. The changes included a version associated with filtering cirrus clouds, as well as a comparison with a version that does not discriminate clouds clusters.

A validation is performed every 24 hours for this product and test versions, for a period of one complete year of data available. This integral evaluation is made with different statistical analyses locally and in the complete network of meteorological stations available in real time.

In southern South America, where different precipitation regimes are present, it was observed in daily validation over the available months, that Hydro-Estimator tends to underestimate in weak precipitation events, as shown by Salio et al. (2015), but a significant overestimation appears in more intense precipitation events.

Keywords: Precipitation, Hydro-Estimator, South America.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación tiene un rol fundamental en la regulación del ciclo hidrológico, como en diferentes actividades humanas desde la agricultura al turismo. Su correcta medición representa un gran desafío dada su gran variabilidad espacial y temporal. Las observaciones pluviométricas en Argentina resultan insuficientes para las aplicaciones de

diversos usuarios, no se distribuyen en forma homogénea, y en la mayoría de los casos se mide con una baja resolución temporal, cada 6 horas o más frecuentemente cada 24 horas. Si bien numerosas instituciones realizan observaciones de precipitación acumulada diaria, no todas comparten la información en tiempo real, lo que dificulta la utilización de la misma en tareas operativas y de toma de decisión.

La llegada de los satélites meteorológicos en los años 1970, permitió avanzar en múltiples técnicas de detección de variables meteorológicas en forma remota. Las primeras técnicas, utilizaron datos visibles (VIS) e infrarrojos (IR) de los satélites de órbita geoestacionaria para inferir la precipitación, basadas en la radiación solar visible reflejada por las nubes y la temperatura del tope de nube respectivamente. En tal sentido, el razonamiento supone que la precipitación más intensa que alcanza la superficie está asociada a nubes con mayor desarrollo vertical en la atmósfera y que tienen toques de nube más brillantes (mayor albedo) y más fríos (mayor altura) en las imágenes de satélite. Sin embargo, la emisión y dispersión de los hidrometeoros en el rango de las microondas emitidas por la superficie terrestre están más directamente relacionadas con la estructura interna de las nubes y en consecuencia con la precipitación. Los algoritmos que utilizan datos de microondas pasivas (MP) de los satélites de órbita polar, generalmente proveen estimaciones de precipitación instantánea más adecuadas que los algoritmos a partir de datos VIS o IR, aunque con una menor resolución espacial (píxeles de decenas de km de lado). De este modo, estos productos resultan de mejor calidad pero con limitaciones asociadas al tamaño del píxel y a una disponibilidad de datos cada 12 horas en el caso de los satélites helio-sincrónicos (operativos, como los de la serie NOAA, y de investigación, como el AQUA y el TERRA de la NASA); y de una a dos veces por día en el caso de algunos satélites de investigación de órbita oblicua (como el TRMM y el GPM de NASA/JAXA). En los últimos años, diversos grupos científicos han desarrollado productos casi operacionales de estimaciones de precipitación cada 3 horas con una resolución de 0.25 grados de lado en latitud y longitud, combinando la información proveniente de sensores de MP de varios satélites, el sensor activo del radar de precipitación montado en el satélite TRMM, y la información complementaria de satélites geoestacionarios. En síntesis, la ventaja de los datos IR para generar una estimación de precipitación radica en una mayor resolución espacial (4 km) y temporal (cada 30

minutos). En este sentido, es importante disponer de herramientas en tiempos operacionales, dado que los datos del satélite GOES-13 se descargan operativamente en el SMN a fin de dar respuesta a los diversos usuarios. El advenimiento de la nueva generación de satélites de la serie GOES, como el GOES-R/16, con información multiespectral y frecuencias temporales de 5 minutos, proveerá herramientas vitales para el estudio de la precipitación.

Una técnica operacional de la actualidad y con larga historia, cuyos orígenes se remontan al trabajo de Scofield (1987), es el método Hidroestimador (Vicente et al, 2002; Scofield y Kuligowski, 2003), que surge como una modificación del método Autoestimador (Vicente et al., 1998). Estas técnicas, desarrolladas para estimar precipitación de origen convectivo, generan tasas de precipitación basadas en la temperatura de brillo (Tb) del canal IR de los satélites de órbita geoestacionaria, y factores de corrección provenientes de los modelos de pronóstico numérico.

El método Hidroestimador ha tenido importantes mejoras y diversas adaptaciones en la región de Sudamérica desde su versión original. En Argentina, la técnica fue replicada en 2001 (Barrera et al., 2001) en su versión original, Autoestimador, con algoritmo y código computacional propio, derivados a partir de las publicaciones de sus autores originales. En 2002, fue puesta en operación en el SMN, y al año siguiente, se introdujeron las modificaciones necesarias al algoritmo original y se replicó la versión Hidroestimador. Este desarrollo y colaboración, dieron origen al Convenio CONICET-SMN en 2004, y al registro de propiedad intelectual por el CONICET bajo el nombre PPGOES en el mismo año. Posteriormente, siguieron varias modificaciones y mejoras (Barrera et al., 2003; Barrera, 2007), y validaciones con información pluviométrica (Barrera, 2005a,b; Saldanha et al., 2007). El mapa de precipitación acumulada en 24 horas estuvo disponible en el sitio web del SMN hasta fines de 2013.

A su vez, desde el año 2006, el SMN operó en forma paralela una versión automatizada (Vila et al., 2001), con algunas incorporaciones de la versión PPGOES. Luego de un tiempo fuera de servicio, debido a cambios en la recepción de imágenes, volvió a estar disponible en forma operativa en el SMN a partir de septiembre de 2013.

Actualmente, el Departamento de Investigación y Desarrollo del SMN se ocupa del seguimiento y ensayo de mejoras en torno a esta estimación. El interés de múltiples usuarios en la distribución de la precipitación, y las limitaciones en su medición en forma directa, motivan la utilización y la necesidad de conocer la calidad de este tipo de productos. Hobouchian et al. (2014), realizaron una primera evaluación de estos datos sobre el periodo de un mes. El objetivo de este trabajo, es realizar una evaluación diaria del Hidroestimador durante el período de un año, y analizar los resultados obtenidos al incorporar cambios en la técnica con la finalidad de mejorar su rendimiento.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

2.1. Estimación de precipitación

En este trabajo se utiliza la técnica Hidroestimador para estimar la precipitación por satélite en forma automatizada (Vila et al., 2001), cuya versión original proviene de la NOAA/NESDIS, con algunas incorporaciones de la versión PPGOES (Barrera et al., 2001 y 2003; Barrera, 2007).

El programa automatizado que incorpora las imágenes satelitales y salidas del modelo ETA, y lleva adelante la ejecución del algoritmo, la generación de mapas de tasa de precipitación (RR, por sus siglas en inglés), y su publicación en el sitio WEB del SMN, fue implementado por Vila (Vila et al, 2001). En este proceso, es necesario corregir radiométricamente la señal que llega atenuada al satélite, debido a la absorción de radiación por vapor de agua existente entre la superficie radiante (el tope de nube) y el

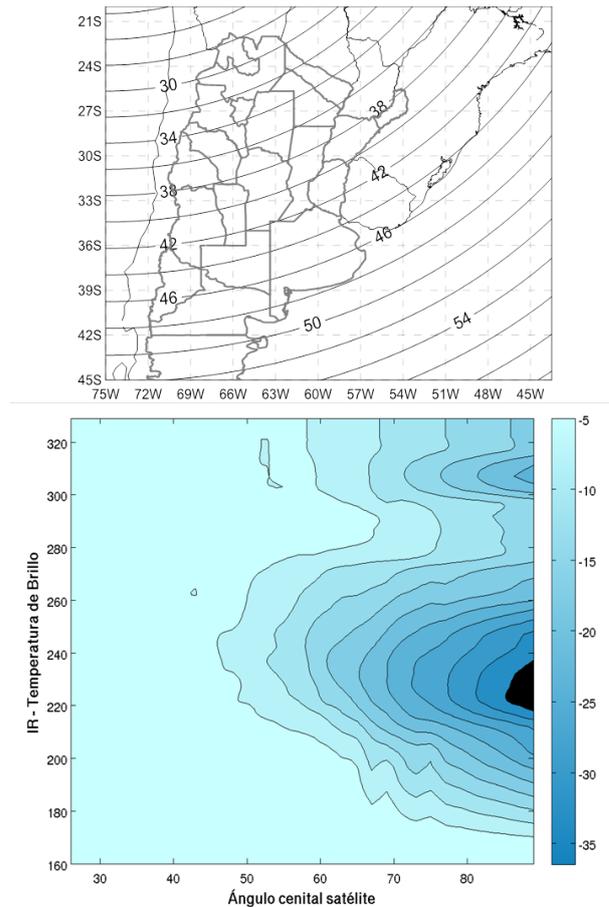


Figura 1: Distribución espacial del ángulo cenital del satélite GOES-Este en grados (panel superior), y atenuación radiométrica en grados kelvin, en función de la temperatura de brillo (K) del canal 4 y el ángulo cenital del satélite (grados), a principios de junio (panel inferior).

satélite. La señal se atenúa más a medida que el ángulo cenital del satélite es mayor, lo que aumenta su recorrido en la atmósfera (camino óptico), efecto conocido como “limb darkening” (Lienesch y Wark, 1967). La Figura 1 (panel superior), muestra la distribución espacial del ángulo cenital para el satélite GOES-Este (75° W). Al implementarse la técnica Hidroestimador automatizada en 2006, se incorporó un algoritmo de corrección radiométrica desarrollado por Joyce et al. (2001), que ya estaba siendo utilizado en la versión semi-automatizada PPGOES (Barrera et al., 2003). Esta corrección, está basada en

las diferencias encontradas en las mediciones del canal 4 ($10.7\mu\text{m}$), realizadas sobre el mismo sitio por los satélites GOES-Este y Meteosat (desde distintos ángulos cenitales), sobre la región escaneada por ambos satélites (Océano Atlántico y este de Sudamérica). Mediante análisis estadístico, se produjeron correcciones isotrópicas en función del ángulo cenital del satélite, y la temperatura radiométrica para ocho fechas distribuidas en el año, a partir de las cuales se interpolan valores para cada día del año (Joyce et al., 2001). La marcha anual de esta corrección, varía principalmente debido a la distribución espacial y temporal de la concentración media del vapor de agua, que atenúa la señal emitida desde el píxel. La magnitud de la atenuación se muestra en la Figura 1 (panel inferior), en la que se aprecia su aumento en valor absoluto al incrementarse el camino óptico hasta el satélite, ya sea por aumento del ángulo cenital, o de la temperatura radiométrica en niveles medios y altos de la atmósfera. En la misma Figura, se aprecia que cuando la emisión de radiación proviene de niveles bajos (superficie o nubes bajas, lo que se evidencia por temperaturas de brillo mayores que 250K), la atenuación es menor. Esto último, indica la inexistencia de nubes medias y altas, y por lo tanto la atmósfera está relativamente seca y el camino óptico es menor. En la Figura 2, se muestra cómo varía la distribución espacial de la corrección en dos fechas diferentes. Las imágenes corregidas se utilizan como datos de entrada al Hidroestimador.

La estimación de precipitación, utiliza imágenes del canal IR térmico del satélite GOES-13 y datos de humedad relativa (RH, por sus siglas en inglés) y agua precipitable (PW, por sus siglas en inglés) en la capa atmosférica desde superficie hasta 500 hPa del modelo de pronóstico numérico ETA, que se corre operativamente en el SMN (Suaya, 2004). El principio que asume esta estimación, se basa en que las celdas convectivas producen precipitación más intensa cuanto más frío son los toques de nube, y cuanto mayor es el contenido de humedad en la columna atmosférica entre superficie y 500 hPa. De esta forma, es posible estimar la tasa

de precipitación asociada a la temperatura de brillo del canal centrado en $10.7\mu\text{m}$ (T10.7) de los satélites de órbita geoestacionaria, y a la información de humedad suministrada por el modelo ETA.

2.1.1. Cálculos para la tasa de precipitación

La intensidad de la precipitación depende del espesor de la nube, que está relacionado con el tiempo de permanencia y crecimiento de las gotas y cristales de hielo, y con el contenido y distribución de agua líquida y sólida dentro de la nube. La T_b del tope nuboso, da información sobre la altura del espesor de la nube, y consecuentemente, el Hidroestimador asume que la intensidad de precipitación es principalmente función de dicha temperatura. A su vez, dicho espesor, depende del nivel de base de la nube, que es función del contenido de humedad en la tropósfera inferior. Para una dada temperatura del tope de nube, el espesor será menor cuanto más seco se encuentre el aire en las capas bajas de la atmósfera.

La técnica Hidroestimador utilizada en este trabajo, se basa en el algoritmo desarrollado por Scofield y Kuligowski (2003), y se describe a continuación:

En primer lugar, dado que la tasa de precipitación y la temperatura de brillo del tope de nube no están directamente relacionadas, y para considerar las diferencias entre la precipitación convectiva y estratiforme, se define mediante relaciones empíricas, la tasa de precipitación en los “centros convectivos” y “no convectivos” en forma separada. Luego, se combinan estas ecuaciones con distinto peso, dependiendo de las características del píxel y su entorno, y se asigna una tasa de precipitación final.

La precipitación convectiva está relacionada con T10.7 mediante una versión modificada de la ley empírica original de Vicente et al. (1998) que se muestra en la ecuación(1). Para ello, se analiza cada píxel cuya temperatura

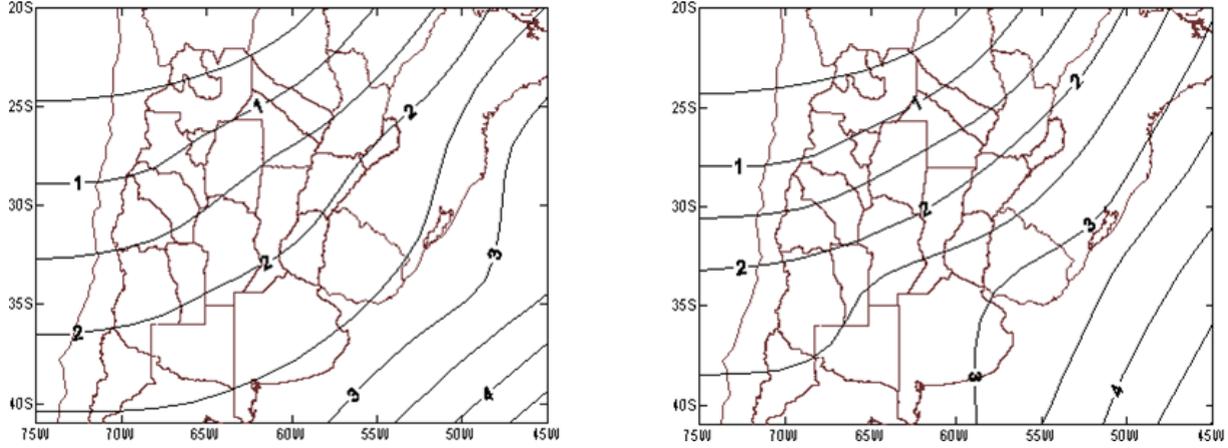


Figura 2: Corrección radiométrica por defecto en grados Kelvin para imágenes GOES del canal 4, cuando la temperatura de brillo obtenida es 230K del 21/9 (panel izquierdo), y 21/12 (panel derecho).

radiométrica es inferior a 250 K (los píxeles más cálidos se consideran sin precipitación), y se utiliza el valor de PW entre superficie y 500 hPa como parámetro para obtener una familia de curvas de intensidad de precipitación convectiva $RR_c = f(T_b, PW)$, con RR_c en mm/h y T_b en grados Kelvin.

$$RR_c = k_0 \exp(-\alpha T_b^{1,2}) \quad (1)$$

Los valores de α y k_0 se encuentran resolviendo un sistema de dos ecuaciones en (1). Por un lado, $RR_c = 0,5$ mm/h para $T_b = 240$ K; y por otro lado, una tasa de precipitación para $T_b = 210$ K que está relacionada con PW del modelo ETA mediante una función empírica de ajuste, de modo que RR_c sea función de la disponibilidad de humedad en la atmósfera. A su vez, se define un valor de tasa de precipitación máxima, igual al contenido de PW (expresado en pulgadas) multiplicado por 40 mm/h.

La precipitación estratiforme (RR_s), se define a partir de una ley lineal con $T_{10,7}$ que se muestra en la ecuación (2). Para ello, se considera la tasa de precipitación máxima (RR_{max}) como una función empírica diferente, que se calcula como la RR_c que corresponde a la T_b del píxel analizado y el contenido de PW máximo en el núcleo convectivo más cercano.

$$RR_s = (250 - T_{10,7}) \frac{RR_{max}}{5} \quad (2)$$

A su vez, RR_s no puede exceder el 20% de la RR_c correspondiente a la T_b y PW del píxel analizado, o los 12 mmh⁻¹ (el valor que sea más bajo).

Por otro lado, la presencia o ausencia de precipitación y su intensidad son función de la pertenencia al núcleo de un sistema precipitante y de las condiciones del entorno en el píxel de interés. Para ello, se encuentra la T_b mínima en un área de 101x101 píxeles y dependiendo de cuan bajo sea este valor, se determina la región de interés, entre un área mayor de 101x101 píxeles para toques de nube por debajo de 200 K, y un área menor de 61x61 píxeles para valores superiores a 220 K.

Luego, las nubes en un determinado píxel producen precipitación si poseen toques más fríos que la media de los píxeles circundantes, y la técnica separa los píxeles de lluvia y no lluvia de acuerdo a un valor de temperatura estandarizado en la ecuación (3), construido con la media (T_m) y la desviación estándar (σ) de la temperatura de brillo en el área definida previamente centrada en el píxel de interés.

$$Z = \frac{T_m - T_{10,7}}{\sigma} \quad (3)$$

En el caso de que Z sea mayor o igual a 1.5 la precipitación es enteramente convectiva,

mientras que si Z es igual a cero la precipitación es enteramente estratiforme, y si Z es negativo la tasa de precipitación se ajusta a cero (píxel más cálido que la media del entorno). La tasa de precipitación para valores de Z entre 0 y 1.5, se calcula combinando una fracción convectiva y otra estratiforme, como un promedio ponderado, de la siguiente manera:

$$RR = \frac{RR_c Z^2 + RR_s (1,5 - Z)^2}{Z^2 + (1,5 - Z)^2} \quad (4)$$

A su vez, en un sistema convectivo típico, existen múltiples mínimos de temperatura de brillo, y una única región circundante es inapropiada para diferenciar los mínimos locales de los globales. Para aumentar la habilidad en representar los núcleos secundarios de precipitación, y poder determinar mejor la intensidad de la precipitación, se consideran dos áreas diferentes respecto al píxel de interés. La idea es evitar que si el área considerada es muy pequeña, quede afuera el tope de nube más frío del sistema (el mínimo absoluto de temperatura de brillo) y solo se tenga en cuenta un mínimo local de T_b . Mientras que si solo se considerara un área muy grande, se le restaría importancia a los mínimos locales de temperatura de brillo del sistema. En la actualidad, se trabaja con un área interna de 31-31 píxeles, y la estimación final se calcula como la raíz cuadrada del resultado de multiplicar la tasa de precipitación de esta área interna y la externa definida previamente.

La corrección por humedad, se realiza aplicando ajustes en forma separada con los valores medios de PW y RH entre superficie y el nivel de 500 hPa. El contenido de PW se utiliza como un factor de disponibilidad de humedad como se describió previamente, y los valores de T_b se incrementan (disminuye la RR) en entornos secos, y se reducen (aumenta la RR) en entornos húmedos. A su vez, la RH media se utiliza como un factor que remueve una fracción de la precipitación que es evaporada por debajo de la base de nube, antes de alcanzar la superficie; cuanto más seco es el entorno, mayor es la fracción removida.

Además, se han incorporado a la técnica

Hidroestimador ajustes al nivel de equilibrio convectivo (Scofield, 2001) para eventos de tope cálido que pueden desarrollar precipitación intensa; correcciones por error de paralaje en la ubicación de los topes de nubes y por ascenso o descenso mecánico del aire debido a obstáculos orográficos, que se describen con detalle en el trabajo de Vicente et al. (2002); y el ajuste por incrementos en el ángulo cenital del satélite detallado en la sección anterior (Joyce et al., 2001).

2.1.2. Estimación de la precipitación acumulada

La precipitación acumulada en 24 horas, se obtiene como la suma de la precipitación instantánea en cada hora disponible. En general, para una hora determinada, se cuenta con más de un dato estimado de precipitación instantánea debido a la alta resolución temporal de las imágenes de satélite. Actualmente, para calcular los valores de precipitación estimada diaria, se considera el valor medio entre los datos disponibles en el periodo horario como representativo de una hora determinada del día (mm/h), y luego se suman los valores obtenidos en las 24 horas del día (mm/día).

2.1.3. Limitaciones y ventajas de la técnica Hidroestimador

Una de las limitaciones principales de la técnica Hidroestimador, está relacionada con la precipitación proveniente de nubes con topes más bajos, como los nimbostratus, que es ignorada si no hay convección presente en el entorno cercano. En eventos de precipitación intensa, la contribución de estas nubes al registro total de precipitación es pequeña en proporción, pero en otros casos no es despreciable. Además, hay casos de precipitación proveniente de nubes stratus en ausencia de convección, que ocurren principalmente en el semestre frío en latitudes extratropicales, en los que la técnica tampoco asigna precipitación.

Otra limitación importante que presenta la

técnica, está asociada a la dificultad en la detección y filtrado de nubes no precipitantes. Los cirrus son nubes de hielo que no producen precipitación, y tienen temperaturas de brillo similares a los toques de nubes convectivas bien desarrolladas. Los cirrus finos, generalmente dejan pasar radiación infrarroja que proviene de nubes más bajas o de superficie, en distinta medida según su espesor, por lo que las radiancias medidas en los respectivos píxeles están contaminadas en diferentes grados por radiación de niveles inferiores. Esto hace que un área de cirrus finos se “vea” rugosa en el campo de temperatura de brillo, lo que dificulta su filtrado por medio de técnicas de análisis espacial textural basadas en la temperatura de brillo. En los Estados Unidos, la detección de áreas nubosas se realiza con una red de radares meteorológicos que cubren el territorio nacional (Scofield, 2001), y los cirrus y cúmulos en etapa de disipación, que no producen precipitación o bien es débil, son filtrados de esta manera. Sin la ayuda de los radares, la técnica Hidroestimador confunde estos toques de nube fríos en áreas de cirrus y restos de cúmulos, con sistemas precipitantes, lo cual fue reportado por Rozumalski (2000).

En Argentina, se desarrolla una subrutina para la detección y filtrado de nubes cirrus, de efectividad limitada debido a la poca información disponible. La misma, resulta más eficaz cuanto más espeso es el cirrus, y sirve también para detectar píxeles con cúmulos en etapa de disipación. Por otra parte, en vigilancia meteorológica por sensores remotos, se observó que la versión operativa del Hidroestimador sobrestimaba el área de precipitación máxima en numerosos eventos de precipitación intensa. El filtrado de nubes cirrus y esta última problemática, condujeron a la realización de algunas pruebas con cambios en la versión operativa que se discuten en la próxima sección, con la finalidad de encontrar mejoras en la estimación de precipitación.

Además, la ausencia de imágenes disponibles por más de media hora puede introducir errores significativos en la estimación de la precipitación acumulada, dada la alta variabilidad temporal

de la precipitación de origen convectivo.

A pesar de las limitaciones expuestas previamente, es importante remarcar que la ventaja principal del Hidroestimador frente a otras estimaciones de precipitación por satélite que utilizan datos de MP, datos de superficie y otro tipo de información en forma óptima, radica en su disponibilidad en tiempo real para tareas operativas. Estos datos estimados, tienen un desfase de pocos minutos y a lo sumo media hora, mientras que los algoritmos más avanzados actualmente, logran un desfase de 4 horas en el mejor de los casos. Además, Salio et al. (2015), mostraron que si bien esta estimación tiene un sesgo negativo casi constante a lo largo del año, su PDF se corresponde bastante bien con la distribución observada. Es decir, el grado de subestimación puede analizarse en dicho estudio, como un error sistemático que a futuro podría ser removido para mejorar la técnica.

2.1.4. La técnica Hidroestimador implementada en el SMN

La versión del Hidroestimador que actualmente se encuentra operativa en el SMN (en adelante, HIDRO ACTUAL), produce los mapas de precipitación instantánea disponibles cada 30 minutos, y genera los mapas de precipitación acumulada cada 6, 12 y 24 horas, con una resolución espacial de 4 km. En la Figura 3, se presenta un ejemplo de los respectivos mapas de precipitación que se publican en la página web del SMN, correspondientes al día 13 de enero de 2015.

A fin de minimizar la asignación de lluvia a cirrus y cúmulos en etapa de disipación, se ensaya la incorporación en el algoritmo operativo de una subrutina asociada al filtrado de estas nubes (en adelante, HIDRO CIRRUS OUT), que está basada en un análisis textural que identifica los píxeles asociados a las nubes mencionadas como aquellos que pertenecen a un determinado rango de temperatura de brillo en una secuencia de al menos 4 píxeles consecutivos, e incorpora los píxeles contiguos si pertenecen al mismo intervalo

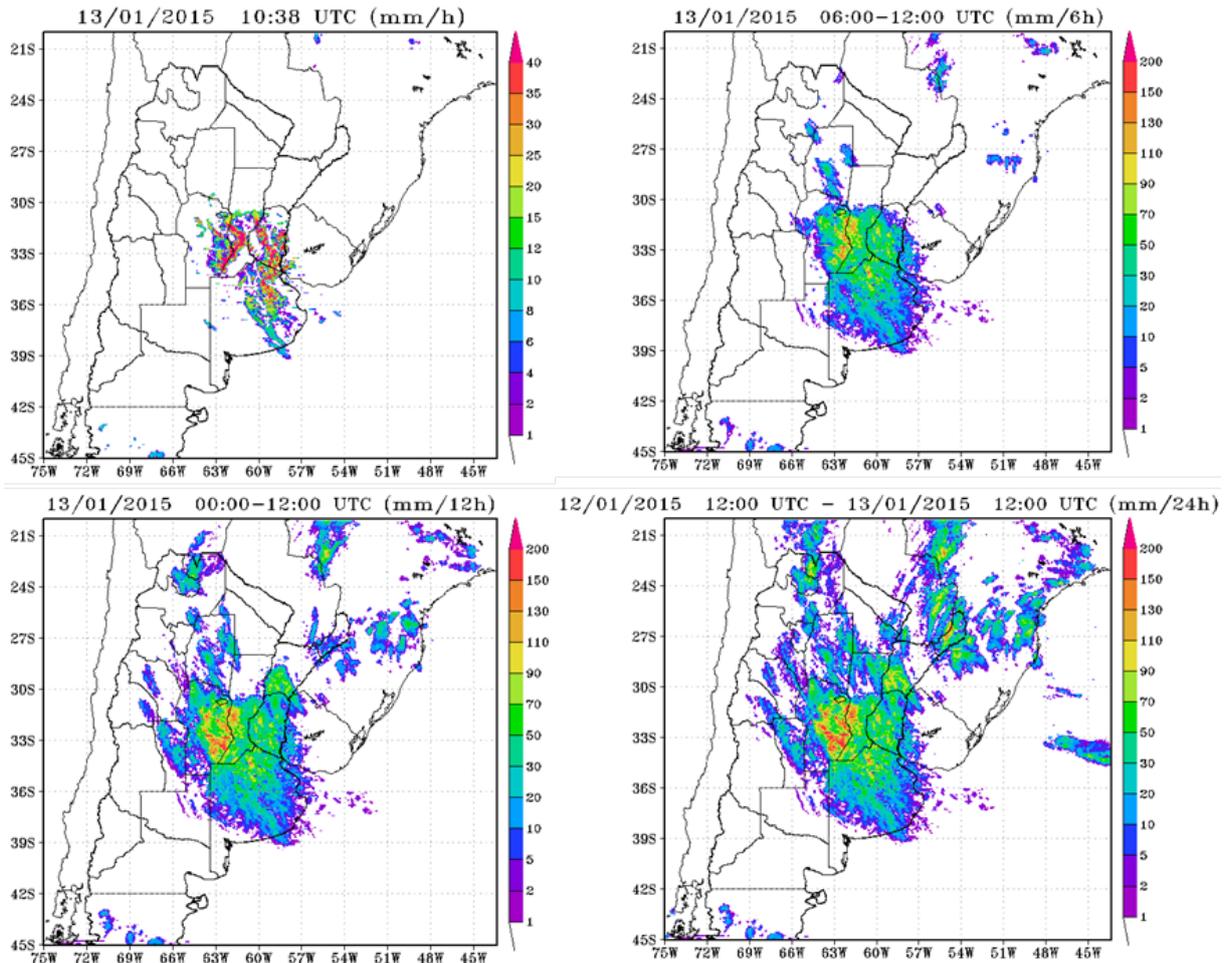


Figura 3: Mapa de precipitación instantánea del Hidroestimador correspondiente a las 10:38 UTC del día 13 de enero de 2015 (panel superior izquierdo), y mapas de precipitación acumulada cada 6 horas (panel superior derecho), 12 horas (panel inferior izquierdo) y 24 horas (panel inferior derecho) correspondientes a las 12:00 UTC del mismo día. Notar que la escala de precipitación va de 0 a 40 mm en el mapa de precipitación instantánea y de 0 a 200 mm en los mapas de precipitación acumulada.

de temperatura. La secuencia mencionada, se busca en sentido oeste-este, y luego, en sentido sur-norte. Actualmente, se analizan intervalos de 2 grados de temperatura de brillo desde 243 K hasta 203 K. Los valores utilizados son empíricos y deberían ser ajustados en un futuro utilizando la base de datos de observaciones y estimaciones. Una vez identificados los pixeles que cumplen estas condiciones, se inhibe la precipitación en los mismos; y a modo de control, se generan mapas de temperatura de brillo para analizar en qué valores de temperatura se agrupan en mayor medida los pixeles filtrados. Asimismo, se

considera la posibilidad de utilizar el valor de agua precipitable en la columna entre superficie y 500hPa pronosticado por el modelo ETA, para ayudar a detectar una región seca, y de este modo identificar mejor los cirrus. La contribución que pueden hacer estos campos pronosticados es incierta, dado que: a) la retícula del modelo ETA es mucho mayor que el tamaño de un píxel; b) los campos están suavizados respecto de la atmósfera real; y c) se tiene un valor cada tres horas, mientras que las imágenes GOES se obtienen cada media hora aproximadamente.

Finalmente, se corre una versión del Hidroestimador que descarta una subrutina para discriminar los clusters de nubes (en adelante, HIDRO SC). El propósito es estudiar si mejora la estimación de precipitación al no incorporarla en el algoritmo operativo, y se reducen las áreas de máxima precipitación sobrestimadas en algunos casos detectados en vigilancia operativa. La subrutina que no se utiliza en esta versión, selecciona los píxeles convectivos mediante umbrales de temperatura de brillo (valores por debajo de 241 K), y los píxeles convectivos contiguos los asigna al mismo cluster o sistema convectivo. De este modo, la subrutina devuelve tres datos: una matriz con el número de sistema al que pertenece cada píxel convectivo (asigna cero para píxeles no convectivos), un valor que indica la cantidad total de píxeles convectivos y otro valor que indica la cantidad total de sistemas convectivos encontrados en la imagen de satélite. Luego, esta información la utiliza para tener en cuenta la extensión de un sistema convectivo, y solo va tener en cuenta los píxeles convectivos que pertenezcan al mismo cluster en el cálculo de la intensidad de la precipitación. Es decir, al descartar esta subrutina en la versión HIDRO SC, se consideran todos los píxeles (convectivos o no) en el área alrededor del píxel de interés para el cálculo de la precipitación, sin exigir que a su vez pertenezcan a un mismo cluster. Esta diferencia con HIDRO ACTUAL, implica un aumento de la desviación estándar en el entorno del píxel de interés (porque las variaciones de temperatura son mayores al considerar todos los píxeles), lo que disminuye el valor de temperatura estandarizada siguiendo la ecuación (3) para un píxel de lluvia. Con lo anterior, es esperable que esta versión asigne una menor tasa de precipitación con respecto a HIDRO ACTUAL, y se reduzca la sobrestimación del área de máxima precipitación.

En la Figura 4, se presenta a modo de ejemplo, la comparación entre las distintas versiones del Hidroestimador para el mismo caso de la Figura 3. En el mapa de HIDRO CIRRUS OUT, se observan claramente los píxeles filtrados

en los que se inhibe la precipitación; y en el mapa de HIDRO SC, se reduce el área de máxima precipitación respecto al mapa de HIDRO ACTUAL en la Figura 3, en acuerdo con la discusión previa.

2.2. Datos de la red de estaciones

Este trabajo cuenta con las observaciones de precipitación acumulada en 24 horas de la red de estaciones pluviométricas disponibles en tiempo operativo. Esta red está compuesta por las observaciones del SMN, y la información proveniente de los países vecinos a través del Sistema de Telecomunicación Global. Actualmente, se dispone de aproximadamente 210 estaciones diarias sobre el sur de Sudamérica, que se pueden observar en la Figura 5. La validación cada 24 horas se llevó a cabo sobre el periodo de 1 año, entre el 1 de febrero de 2014 y el 31 de enero de 2015, y solo se consideraron los pares de datos disponibles de estimación-observación para los cálculos estadísticos. La elección del periodo de estudio, está determinada por el mes de comienzo de las versiones de prueba en febrero de 2014. Los datos observados en superficie, se comparan con el punto más cercano correspondiente a la retícula del Hidroestimador.

2.3. Metodología para la validación

Para realizar la evaluación y comparación de las versiones del Hidroestimador, se calcularon diferentes estadísticos en forma puntual y considerando la red completa de estaciones descripta previamente, utilizando los datos cada 24 horas.

Los estadísticos clásicos que se utilizaron son: la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), que proporciona una medida del valor medio de los errores de la estimación, el sesgo (BIAS), que representa el error sistemático de la misma y el coeficiente de correlación (CORR), que representa el grado de asociación lineal entre la estimación y las observaciones. Las fórmulas que corresponden a estos estadísticos son las

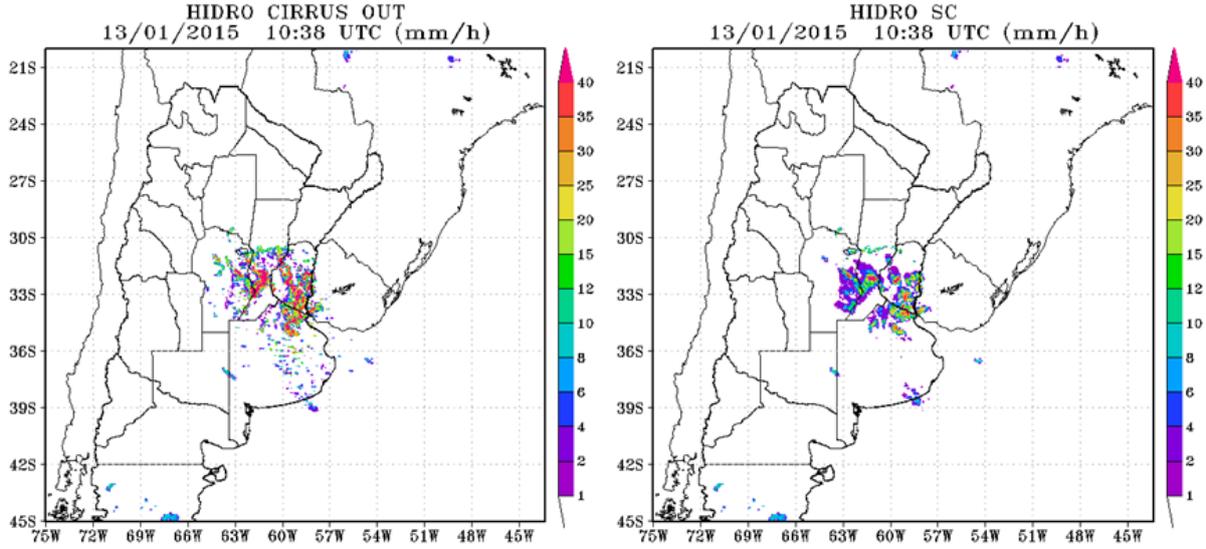


Figura 4: Mapa de precipitación instantánea de HIDRO CIRRUS OUT (panel izquierdo), e HIDRO SC (panel derecho), correspondiente a las 10:38 UTC del día 13 de enero de 2015, para ser comparados con el mapa de precipitación instantánea de HIDRO ACTUAL en la Figura 3.

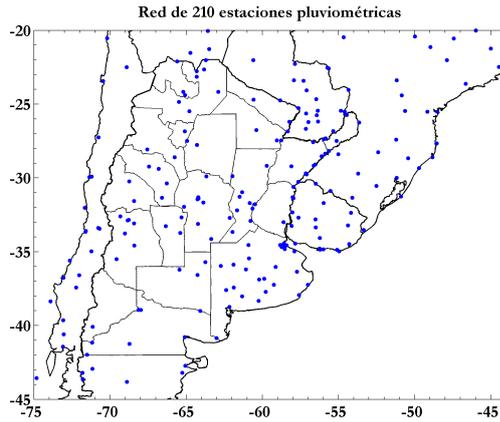


Figura 5: Red de estaciones pluviométricas sobre el sur de Sudamérica, disponibles en tiempo operativo en el SMN.

siguientes:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)^2}{N}} \quad (5)$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - P_o)}{N} \quad (6)$$

$$CORR = \frac{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e) (P_o - \bar{P}_o)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (P_e - \bar{P}_e)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_o - \bar{P}_o)^2}} \quad (7)$$

Donde, P_e y P_o son la precipitación estimada y observada respectivamente, el guion representa el valor medio, y N es la suma de los puntos de retícula considerados en el periodo de análisis.

Por otro lado, se calcularon estadísticos categóricos que miden la correspondencia entre la ocurrencia de eventos de precipitación estimada y observada. Se consideraron eventos de lluvia por debajo o sobre los siguientes umbrales: 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 20, 30 y 50 mm, seleccionados siguiendo distintos trabajos de referencia (Vila et al., 2009; Ruiz et al., 2009; Salio et al., 2015); y se clasificó cada estación dentro de una de las siguientes categorías: acierto (A) que corresponde a la precipitación observada y estimada por encima del umbral; sorpresa (S) que corresponde a la precipitación observada por encima del umbral y estimada por debajo; y falsa alarma (F) que corresponde a la precipitación

estimada por encima del umbral y observada por debajo.

Los índices que se incluyeron y que combinan esta información para una correcta validación son: El Bias Score (BIASS), que es la relación entre la cantidad de eventos de precipitación estimada y la cantidad de eventos de precipitación observada, con un rango de valores desde 0 a infinito y un valor óptimo igual a 1. El Equitable Threat Score (ETS), que es la fracción de precipitación correctamente estimada considerando el número de aciertos aleatorios, con un rango de valores desde -1/3 a 1 y un valor igual a 1 corresponde a una estimación perfecta. La probabilidad de detección (POD), que es la relación entre el número de aciertos y la cantidad de eventos de precipitación observada, con un rango de valores de 0 a 1 y un valor óptimo igual a 1. Las falsas alarmas (FAR), que como su nombre lo indica, es la relación entre el número de falsas alarmas y la cantidad de eventos de precipitación estimada, con un rango de valores de 0 a 1 y un valor óptimo igual a 0. Estos estadísticos se definen con las siguientes fórmulas:

$$BIASS = \frac{A + F}{A + S} \quad (8)$$

$$ETS = \frac{A - \frac{(A + S)(A + F)}{N}}{A + S + F - \frac{(A + S)(A + F)}{N}} \quad (9)$$

$$POD = \frac{A}{A + S} \quad (10)$$

$$FAR = \frac{F}{A + F} \quad (11)$$

Para analizar los resultados, se graficó la distribución espacial del BIAS, los diagramas de dispersión, los diagramas de los estadísticos categóricos en función de los umbrales de precipitación, las distribuciones de probabilidad del volumen de precipitación, conocidas como PDFs volumétricas (Amitai et al., 2011), y se dispuso de los valores totales obtenidos para los diferentes estadísticos.

Las PDFs volumétricas son distribuciones de probabilidad que subdividen la tasa de precipitación en intervalos en escala dBR,

y consideran la contribución relativa de los mismos al volumen total de precipitación. Se definen como la suma de las tasas de precipitación para un dado intervalo en escala dBR ($dBR = 10 \log(R/1 \text{ mmdía}^{-1})$; $[R] = [\text{mmdía}^{-1}]$) dividido por la suma total de las tasas de precipitación:

$$PDF(R_i) = \frac{\int_{R_i-0,5}^{R_i+0,5} RP(R) dR}{\int_0^{\infty} RP(R) dR} \quad (12)$$

En esta fórmula, R representa la tasa de precipitación en mmdía⁻¹ y P es la probabilidad de precipitación en el intervalo i. La ventaja que tienen respecto a las PDFs de ocurrencia, es que son menos sensibles a las limitaciones en la detección de precipitación débil (asociada a una pequeña fracción de la precipitación total), y más recomendables para una comparación entre las observaciones de superficie y las estimaciones derivadas de distintos algoritmos e instrumentos, con un límite de detección diferente (Amitai et al., 2011).

3. RESULTADOS

El resultado de la validación diaria de HIDRO ACTUAL para el periodo de un año, se muestra en la Figura 6. En los paneles superiores, se encuentra la tasa diaria de precipitación y el BIAS teniendo en cuenta el periodo entre el 01/02/2014 y 31/01/2015 en las estaciones disponibles. Asimismo, se incluye el diagrama de dispersión y la PDF volumétrica en los paneles inferiores correspondientes también al periodo completo, con el objetivo de reunir la información necesaria para una correcta evaluación de esta estimación. Los resultados de los estadísticos para todo el año en el panel inferior central, cuantifican los errores diarios de esta herramienta de trabajo y se analizan en más detalle en la Tabla I y la Figura 10 junto con las otras versiones del Hidroestimador. Un valor agregado en el panel inferior central de la Figura 6, es el valor promedio total de precipitación y los valores

N=73104	RMSE	BIAS	CORR
HIDRO ACTUAL	12.11	0.47	0.53
HIDRO CIRRUS OUT	10.84	-1.08	0.48
HIDRO SC	10.45	-0.70	0.52

Tabla I: Estadísticos totales para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

máximos de precipitación para las observaciones y la estimación. En ambos casos, estos valores muestran a HIDRO ACTUAL por encima de los valores observados. Además, se incluye el total de puntos disponibles en el área durante el año completo de validación. De este modo, esta figura puede ponerse a futuro a disposición de diferentes usuarios interesados en el funcionamiento del Hidroestimador.

El BIAS de la Figura 6, presenta una mayor cantidad de puntos con valores cercanos a cero en los que el Hidroestimador se acerca más a la precipitación diaria, pero en las áreas del noroeste y centro este de Argentina, los valores altos positivos de BIAS remarcen una sobrestimación de este producto. En esta última región, se encuentran las principales diferencias con la distribución del BIAS de las versiones de prueba (Figura 7). La versión HIDRO SC logra reducir los valores positivos que presenta HIDRO ACTUAL, mientras que la versión HIDRO CIRRUS OUT obtiene una mayoría de puntos con valores negativos de BIAS al filtrar las nubes cirrus. En este último algoritmo, surge la necesidad de sumar nuevos cálculos que eviten ignorar algunos eventos de precipitación más intensa por debajo de la nubosidad cirriforme.

En el diagrama de dispersión de la Figura 6, si bien se marca una gran cantidad de puntos en los cuales la observación diaria es subestimada, se observa la presencia de varios valores extremos del Hidroestimador que sobrestiman considerablemente las observaciones en superficie. Este análisis, concuerda con la gran

dispersión de los puntos a lo largo del año, y un valor del coeficiente de correlación lineal igual a 0.53.

En la PDF de la Figura 6, se muestra la relación entre la precipitación total estimada y observada sobre la región, que al ser mayor a uno (1.14) ratifica que domina una sobrestimación de la precipitación en el periodo de análisis. Por otro lado, la curva del Hidroestimador indica el porcentaje de la precipitación estimada total que es explicado por cada intervalo de lluvia (volumen relativo de precipitación) en escala dBR, y del mismo modo en forma de barras en el caso de la precipitación observada. Si bien cada intervalo del eje X es de 1 dBR, en acuerdo con la ecuación (12), en las PDFs se indica el equivalente en mm/día de -10, 0, 10, 20 y 30 dBR (0.1, 1, 10, 100 y 1000 mm/día respectivamente), para relacionar mejor los porcentajes con el tipo de evento de precipitación. El resultado indica una mayor contribución por parte de umbrales en torno a los 50 mm de precipitación diaria, como se observa en el máximo de ambas distribuciones. A su vez, se observa una correspondencia entre ambas distribuciones con un leve corrimiento del Hidroestimador hacia los umbrales más altos. Es decir, que la estimación presenta una mayor contribución a la precipitación total en umbrales más altos, al compararlo con la distribución observada.

La Tabla I, resume los estadísticos totales para cada versión del Hidroestimador teniendo en cuenta el total de puntos disponibles en el año para la validación (N). La versión actual, presenta mejores resultados en el BIAS y el CORR en comparación con el resto. Las versiones de prueba, se diferencian en el grado de subestimación de la precipitación observada, que es más importante en el caso de HIDRO CIRRUS OUT con un valor del BIAS de -1.08. Sin embargo, obtienen mejores resultados en cuanto al RMSE que tiene el valor más bajo de 10.45 en el caso de HIDRO SC.

La Figura 8, presenta las series mensuales de precipitación, BIAS, RMSE y CORR

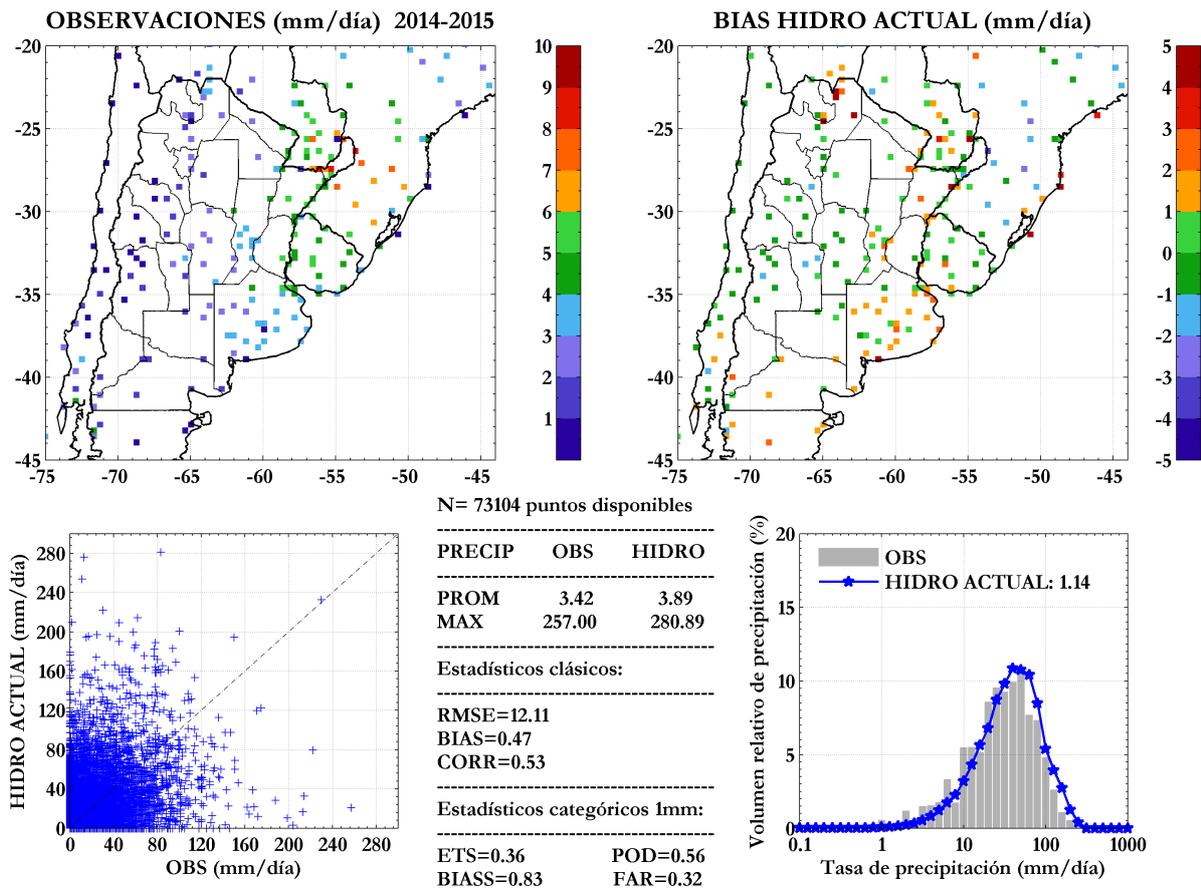


Figura 6: Validación diaria de HIDRO ACTUAL para el periodo anual 01/02/2014-31/01/2015: Tasa media de precipitación acumulada en 24 horas (panel superior izquierdo), distribución del BIAS (panel superior derecho), diagrama de dispersión (panel inferior izquierdo), PDF volumétrica (panel inferior derecho) y estadísticos totales (panel inferior central).

para comparar las distintas versiones del Hidroestimador sobre la región durante el periodo anual entre febrero de 2014 y enero de 2015. En el caso de la serie de precipitación, se calculó para cada mes, la suma total de precipitación acumulada diaria en los puntos disponibles del sur de Sudamérica, para los datos observados y las distintas versiones del Hidroestimador.

A partir de estas series, se busca estudiar el desempeño de cada versión del Hidroestimador, y analizar si algún producto se aparta favorablemente del funcionamiento de la versión actual. Además, se observan los meses que conducen a valores más altos de error en estas estimaciones, como son enero, abril y

diciembre con valores máximos de RMSE para HIDRO ACTUAL, y los meses que obtienen mejores resultados en los estadísticos asociados al invierno, principalmente el mes de agosto. Si bien, los meses de febrero y marzo presentan una subestimación por parte de todas las estimaciones, en general, el BIAS resulta positivo en la mayoría de los meses para la versión operativa y negativo para las versiones de prueba, sin evidencia de una mejora sustancial por parte de las mismas.

La Figura 9, muestra la comparación de las PDFs volumétricas. En este caso, sumado al análisis de la Figura 6 para HIDRO ACTUAL, se ratifica la subestimación por parte de las versiones de prueba. Este resultado se obtiene, no

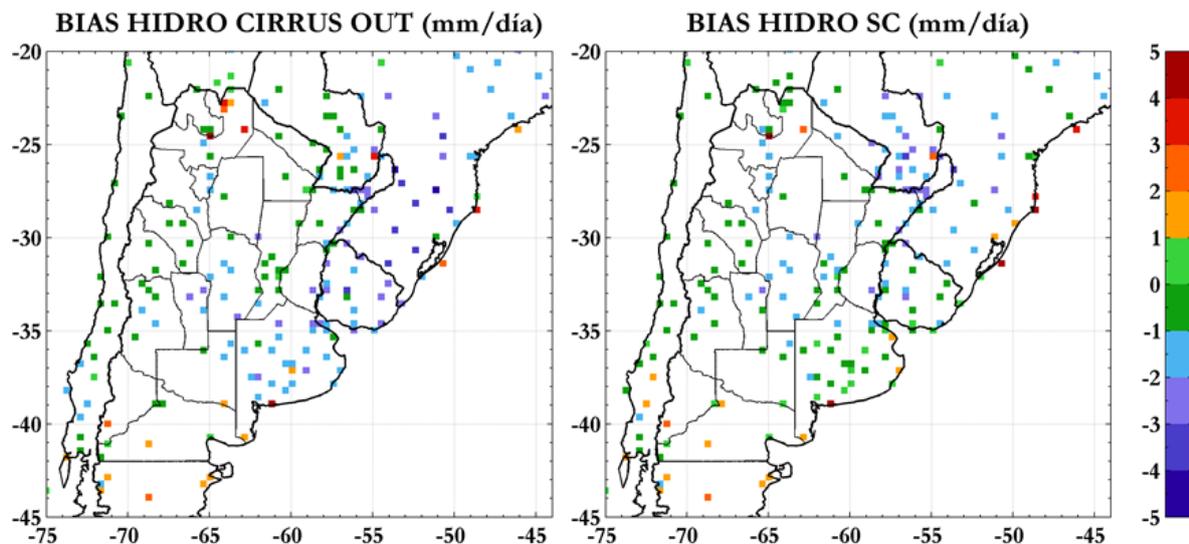


Figura 7: Distribución del BIAS para las versiones HIDRO CIRRUS OUT (panel izquierdo), e HIDRO SC (panel derecho), sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

solo de la relación de precipitación total en el área entre las estimaciones y las observaciones que es menor a uno, sino a partir del corrimiento de las distribuciones de prueba hacia los umbrales más bajos. De esta manera, y con mayor claridad en el caso de HIDRO CIRRUS OUT, que tiene una relación total de 0.68, se observa que los umbrales medios y bajos de precipitación contribuyen en mayor medida al volumen total de precipitación comparado con la distribución de precipitación observada.

En la Figura 10, se evalúa la calidad de las distintas estimaciones a partir de los índices BIASS, ETS, POD y FAR en función de los umbrales seleccionados y para todo el periodo anual de los datos disponibles. En el BIASS, se muestra como HIDRO ACTUAL tiene un comportamiento diferenciado según el tipo de evento de precipitación diaria. En acuerdo con el análisis previo, se confirma una limitación en los eventos extremos con valores superiores a uno que sería óptimo para este estadístico y marca una sobrestimación del algoritmo en los umbrales más altos. Si bien, se corrige en el caso de las versiones de prueba, permanece un grado de subestimación constante en todos los umbrales de precipitación en forma similar a los resultados obtenidos

por Salio et al. (2015). El ETS y el POD, permiten observar claramente que la versión operativa continúa siendo más efectiva en cuanto a la detección de los eventos de precipitación y que la versión HIDRO SC presenta un comportamiento intermedio en los estadísticos categóricos. Sin embargo, las versiones de prueba reducen las falsas alarmas en los eventos extremos de precipitación. En conjunto con los resultados del resto de los estadísticos, sobresale la importancia de analizar distintos índices, que proporcionen información combinada para una correcta validación y determinación de las limitaciones de estos productos.

Salio et al. (2015), realizaron una validación diaria de estimaciones de precipitación por satélite disponibles sobre el sur de Sudamérica, utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial y un periodo de 2 años de datos. En dicho trabajo, se incluyó la evaluación de una versión similar del Hidroestimador proveniente del Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Si bien los resultados coinciden, en cuanto a una subestimación de la precipitación por parte de este producto al sur de 20° S en los umbrales medios y bajos, la PDF volumétrica no mostró un corrimiento hacia los

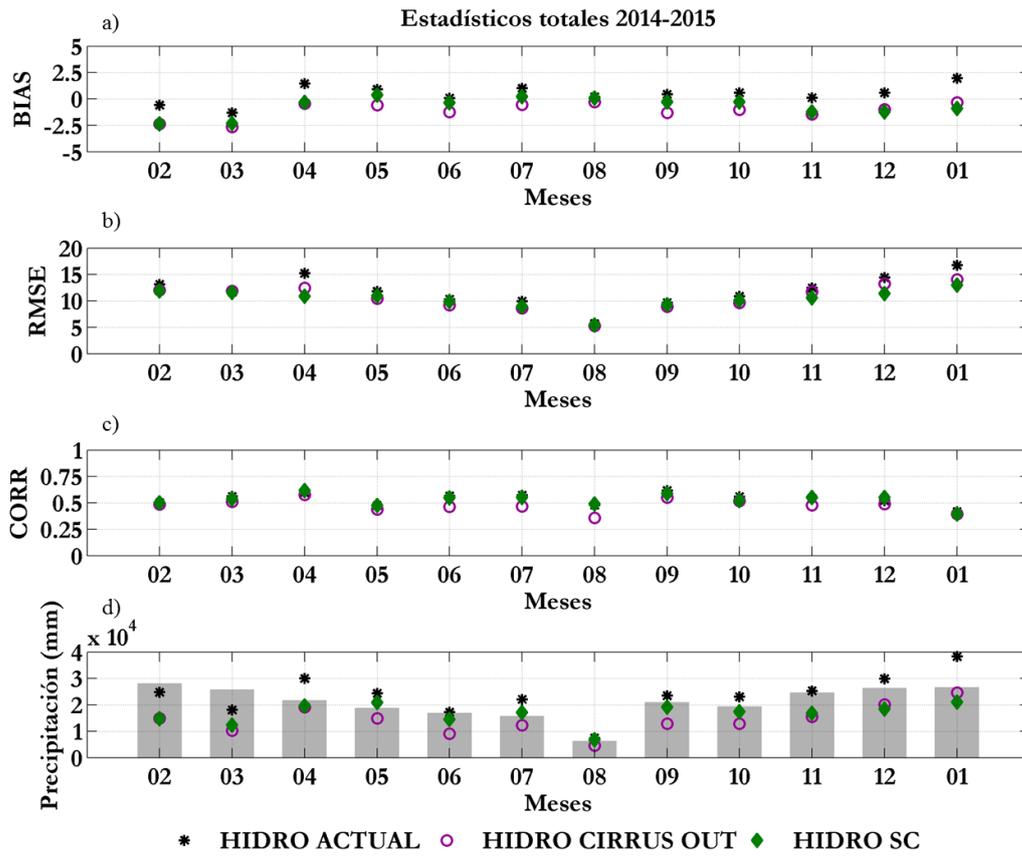


Figura 8: Series mensuales de BIAS (a), RMSE (b), CORR (c) y Precipitación (d) para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual. Los meses corresponden del 02 de 2014 al 01 de 2015. Las barras grises en (d), indican la suma total de precipitación diaria observada en los puntos disponibles.

umbrales más altos como muestra en este trabajo la versión operativa del Hidroestimador en el SMN.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se expone la técnica Hidroestimador para estimar la precipitación por satélite, sus ventajas y limitaciones. A su vez, se describe el estado actual de este producto en el SMN, y las actividades en torno a la evaluación y a obtener mejoras en su desempeño. La validación diaria para un año completo de datos, muestra que el Hidroestimador tiende a sobrestimar la precipitación en las áreas, meses y umbrales asociados a un desarrollo

de la precipitación más intensa. Por otro lado, se observa que el método tiende a subestimar la precipitación en los eventos más débiles, coincidiendo en este punto con lo que mostraron Salio et al. (2015).

Las versiones de prueba, si bien disminuyen el valor medio del error, las falsas alarmas, y algunos casos extremos de estimación de precipitación por parte de HIDRO ACTUAL, en general, obtienen un marcado nivel de subestimación y valores desfavorables en los índices. Es necesario evaluar la estabilidad de esta condición, a fin de determinar si este desvío es sistemático.

De este modo, se confirman las limitaciones de

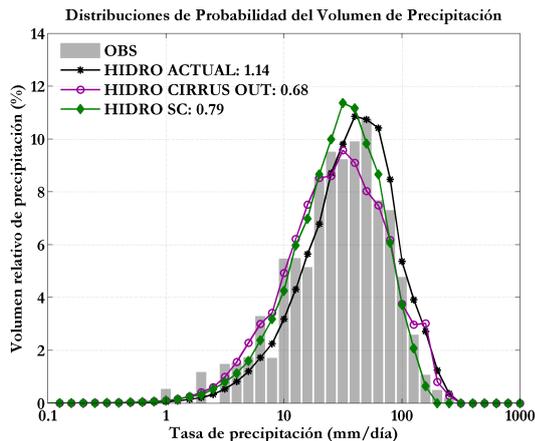


Figura 9: PDFs volumétricas para las distintas versiones del Hidroestimador y las observaciones, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

este producto en cuanto a estimar la precipitación en presencia de nubes cirrus y nimbostratus como se explicó anteriormente. Las nubes cirrus pueden ser detectadas y filtradas con una metodología efectiva, pero no se sabe ni tiene en cuenta si se está desarrollando precipitación por debajo de las mismas. A su vez, la precipitación asociada a nubes más cálidas, es un desafío vigente aún para las estimaciones de precipitación de múltiples sensores.

Además, el sur de Sudamérica presenta diferentes regímenes de precipitación y es importante destacar la necesidad de realizar una evaluación regional, dado que existen diferencias en el desempeño de la estimación según la región, pero actualmente, no se cuenta con redes de observación de mayor densidad en superficie en tiempos operativos, que permitan llevar a cabo esta tarea.

A futuro, y con la finalidad de mejorar esta estimación de precipitación, se espera generar diferentes versiones de prueba enmarcadas en los siguientes temas:

- Aplicación de una técnica multispectral que aproveche óptimamente la información del resto de los canales del satélite.

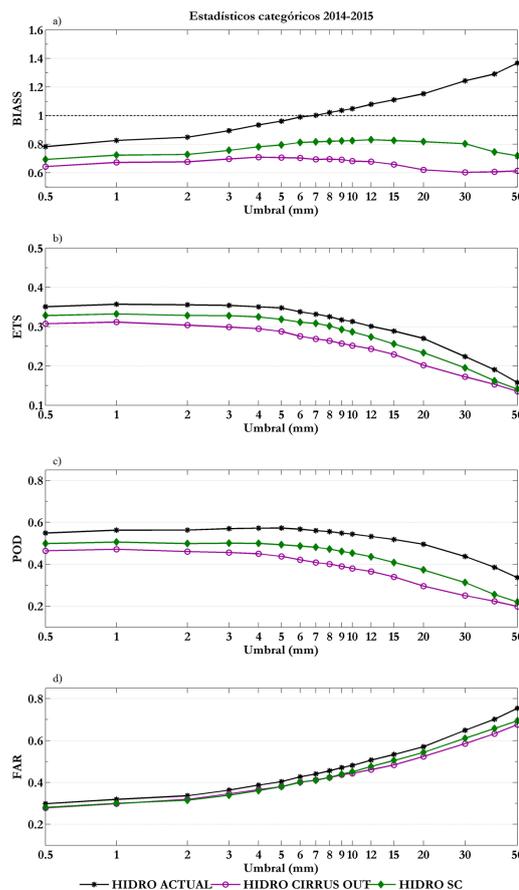


Figura 10: BIAS (a), ETS (b), POD (c) y FAR (d), para las distintas versiones del Hidroestimador, sobre el sur de Sudamérica, correspondientes al periodo anual 01/02/2014-31/01/2015.

- Estudiar la sensibilidad del Hidroestimador a la incorporación de datos del modelo WRF en alta resolución.
- Probar un ajuste en el valor de la precipitación estimada a partir de curvas de calibración obtenidas luego de un tiempo razonable de evaluación del Hidroestimador, o bien evaluar la posibilidad de aplicar un esquema combinado con datos de superficie para mejorar este producto.

Agradecimientos: La realización del presente trabajo fue parcialmente financiada por los proyectos PIDDEF47-2010, PIDDEF16/2014, PICT 2008-215, PICT 2013-1299 y UBACyT

20020130100618BA.

REFERENCIAS

- Amitai, E., Petersen, W., Llorca, X., and Vasiloff, S., 2011. Multi-Platform Comparisons of Rain Intensity for Extreme Precipitation Events. *IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing*, 50, págs. 675–686.
- Barrera, D.F., Marcuzzi, E., y Naumann, G., 2001. Desarrollo del software de un Sistema Operativo de estimación de precipitación a partir de imágenes GOES. IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, D.F., Zucarelli, G., y Ceirano, E., 2003. Una técnica satelital de estimación de lluvia como herramienta de pronóstico hidrológico. Aplicación a la tormenta del 22 al 25 de abril de 2003 sobre Santa Fe y Entre Ríos. Preprints, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba, Brasil.
- Barrera, D.F., 2005a. Precipitation estimation with the hydro-estimator technique: its validation against rain gauge observations. VII Scientific Assembly of the International Association of Hydrological Sciences. Foz do Iguazú, Brasil.
- Barrera, D.F., 2005b. Análisis comparativo de los mapas de precipitación obtenidos a partir de datos pluviométricos y de estimaciones satelitales. IX Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires, Argentina.
- Barrera, D.F., 2007. The generation of synthetic brightness temperature images to improve rainfall estimation from GOES satellite. Predictions in Ungauged Basins: PUB Kick-off. IAHS Publication 309, 13, 113-120. Daniel Schertzer, Pierre Hubert, Sergio Koide & Kuni Takeuchi Editores.
- Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., Barrera, D., Vila D., y Salio, P., 2014. Estimación de precipitación por satélite aplicando la técnica Hidroestimador en su versión para Sudamérica. 2do Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos. Buenos Aires, Argentina.
- Joyce, R., Janowiak, J., and Huffman, G., 2001. Latitudinally and Seasonally Dependent Zenith-Angle Corrections for Geostationary Satellite IR Brightness Temperatures. *J. Appl. Meteorol.*, 40, 4, págs. 689–703.
- Lienesch, J.H., and Wark, D.Q., 1967. Infrared Limb Darkening of the Earth From Statistical Analysis of TIROS Data. *J. Appl. Meteorol.*, 6, 4, págs. 674-682.
- Rozumalski, R.A., 2000. A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimator. *Wea. and Forecast.*, 15, págs. 397-415.
- Ruiz, J.J., 2009. Evaluation of different methodologies to calibrate CMORPH over Sudamerica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24, 4, págs. 473–488.
- Saldanha, C.B., Rolim da Paz, A., Allasia, D., Collischonn, W., y Barrera, D.F., 2007. Avaliação da chuva do Hidroestimador para modelagem hidrológica na região da bacia do Rio Grande. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - 8º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. San Pablo, Brasil.
- Salio, P., Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., y Vila, D., 2015. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over Southern South America using a dense rain gauge network. 6thWIPWG Special Issue Atmospheric Research., Vol. 163, págs. 146–161.
- Scofield, R.A., 1987. The NESDIS operational convective precipitation estimation technique. *Mon. Wea. Rev.*, 115, págs. 1773-1792.
- Scofield, R.A., 2001. Comments on “A quantitative assessment of the NESDIS Auto-Estimator”. *Wea. and Forecast.*, 16, págs 277-278.
- Scofield, R.A., and Kuligowski, R.J., 2003. Status and outlook of operational satellite precipitation algorithms for extreme-precipitation events. *Mon. Wea. Rev.*, 18, págs. 1037-1051.
- Suaya, M., 2004. Primera evaluación objetiva de los pronósticos operativos de los modelos ETA-SMN y GFS-NCEP durante el año 2003. Tesis de Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, UBA.

- Vicente, G., Scofield, R.A., and Menzel, W.P., 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Amer. Meteor. Soc.*, 79, págs. 1883–1898.
- Vicente, G., Davenport J. C., and Scofield, R. A., 2002. The role of orographic and paralax corrections on real time high resolution satellite rainfall rate distribution. *Int. J. of Remote Sensing*, 23, 2, págs. 221-230.
- Vila, D.A., De Goncalves, L., Toll, D.L. y Rozante, J.R., 2009. Statistical evaluation of combined daily gauge observations and rainfall satellite estimates over continental South America. *Journal of Hydrometeorology*, 10, págs. 533–543.
- Vila, D.A., Scofield, R.A., and Davenport, J., 2001. Satellite rainfall estimation over South America: Evaluation of two major events. *AMS 16th Conference on Hydrology*, págs. 33-36.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.