

# Corrección de mapas satelitales de precipitación mediante el uso de pluviómetros

**Víctor Preatoni<sup>1</sup>, Fernando Pazos<sup>1</sup>, Alfredo Campos<sup>1, 2</sup>, Sebastián Verrastró<sup>1</sup>**

1 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Electrónica, Av. Medrano 951, (C1179AAQ) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

2 Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Instituto de Clima y Agua, Nicolás Repetto y de los Reseros s/n, (1686) Hurlingham, Pcia. de Buenos Aires, Argentina

*vpreatoni@gmail.com*

*Recibido el 21 de diciembre de 2015, aprobado el 20 de enero de 2016*

---

## Resumen

La medición de precipitaciones es un factor clave para el estudio de los recursos naturales. La misión espacial TRMM<sup>1</sup> provee datos satelitales de precipitación con una aceptable resolución temporal y espacial. No obstante, estos datos son susceptibles de ser mejorados mediante mediciones provenientes de estaciones terrenas. El presente trabajo propone utilizar el algoritmo de interpolación de Barnes para corregir las imágenes satelitales de Argentina. De la validación del mismo se observa que se obtienen mejoras promedio de hasta 7,33%, siendo más relevante la mejora durante la época invernal.

**PALABRAS CLAVE:** TRMM – 3B43 – INTERPOLACIÓN DE BARNES – VALIDACIÓN DE DATOS

## Abstract

Precipitation measurement is a key factor to natural resources studies. Space mission TRMM<sup>1</sup> provides precipitation satellite data with an acceptable spatial and temporal resolution. However, these data are likely to be improved by local rain gauges measurements. This paper studies the Barnes interpolation algorithm to correct satellite imagery of Argentina. From validation, it's observed that average improvements of up to 7.33% are obtained, being higher during winter.

**KEYWORDS:** TRMM – 3B43 – BARNES INTERPOLATION – DATA VALIDATION

---

1 TRMM: *Tropical Rainfall Measuring Mission* (Misión para la medición de precipitaciones tropicales) <http://trmm.gsfc>.

[nasa.gov/](http://nasa.gov/)

## Introducción

La precipitación es un proceso físico fundamental del ciclo global del agua y su distribución espacial y temporal tiene un impacto significativo sobre los flujos hidrológicos y sus estados (Gottschalck *et al.*, 2005; Tian *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2008; Yong *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2010). Su correcta medición aporta información muy importante en los ámbitos de la agricultura, hidrología, pronóstico numérico y demás estudios climáticos, así como también en el ámbito social, para el control y manejo de inundaciones (Hobouchian *et al.*, 2010).

La medición convencional de la precipitación se realiza mediante un recipiente graduado. Aunque existen variantes en cuanto a la forma y superficie del orificio superior por donde ingresa el agua, el método básico consiste en tomar la medida del volumen de agua recogido durante un determinado período y vaciar luego el recipiente, dejándolo listo para una nueva medición (*Japan Meteorological Agency, Chapter 6, Measurement of Precipitation*). Como mejora del proceso de medición, surgen los pluviómetros de doble cubeta basculante, donde un embudo conduce el agua recolectada a una pequeña cubeta triangular doble con una bisagra en su punto medio. Es un sistema cuyo equilibrio varía en función de la cantidad de agua en las cubetas y el movimiento de las mismas se contabiliza mediante un sistema electrónico (Méndez *et al.*, 2013).

El registro histórico de medición de precipitaciones se encuentra limitado a áreas donde los pluviómetros pueden desplegarse, por lo tanto éstos están distribuidos de manera muy dispersa sobre grandes superficies de tierra (Ebert *et al.*, 2007). Por este motivo, sumado a que los pluviómetros proveen mediciones puntuales, se hace muy difícil obtener una correcta medición global de precipitaciones únicamente con observaciones en superficie (Jiang *et al.*, 2010). En Argentina, debido al reducido número de estaciones de observación en superficie, la distribución no homogénea en toda la extensión del territorio —y en muchos casos también el largo tiempo entre relevamientos de datos provenientes de las mismas— ha ganado vital importancia la información proveniente de satélites meteo-

rológicos para el estudio de las precipitaciones (Hobouchian *et al.*, 2010).

Con el advenimiento de los satélites meteorológicos en los años setenta, los científicos desarrollaron técnicas para estimar las precipitaciones a partir de observaciones radiométricas, las cuales brindan cobertura de la mayor parte del globo terrestre. Las primeras técnicas medían la radiación visible e infrarroja para inferir la intensidad de las precipitaciones basándose en la reflectividad (luz visible) y en la temperatura de la capa superior de las nubes (infrarrojo). La correlación entre las propiedades de las nubes y las precipitaciones es débil; es por ello que a partir de los años ochenta se comenzó a trabajar con sensores de microondas pasivos, instalados en satélites de órbita polar. De esta manera se mejoró la precisión en la estimación satelital de precipitaciones.

Existen diversos sistemas globales de medición satelital de precipitaciones, como ser el PERSIANN<sup>2</sup> (Sorooshian *et al.*, 2000), el sistema combinado del *Climate Precipitation Center perteneciente al National Oceanic Atmospheric and Administration* (NOAA) llamado CMORPH<sup>3</sup> (Joyce *et al.*, 2004), el sistema de clasificación de nubes del PERSIANN (Hong *et al.*, 2004), y el análisis de precipitaciones multisatélite provisto por la misión TRMM (Huffman *et al.*, 2007), en el que se basa el presente trabajo (Jiang, 2010). Para el estudio de variables meteorológicas, las principales fortalezas de estos dispositivos son la extensa superficie de sensado y su objetividad. Como contrapartida, al tratarse de un método de medición indirecto, se producen errores que afectan al resultado final de la medición, requiriendo, en muchos casos, de complejos algoritmos para obtener los resultados deseados. A su vez, las mediciones hechas en campo a través de estaciones meteorológicas, ya sean automáticas o no, poseen gran certeza pero los datos recogidos carecen de validez fuera de su área de influencia (Huffman *et al.*, 1997).

Toda estimación de precipitaciones tiene sus ventajas y desventajas (Barrett y Martin, 1981; Arkin y Ardanuy, 1989). Las estimaciones con pluviómetros son las más precisas y, generalmente, se consideran "la verdad" debido a que

<sup>2</sup> *Precipitation Estimation from Remote Sensing Information using Artificial Neural Network* (Estimación de precipitaciones a partir de teledetección usando redes neuronales artificiales).

<sup>3</sup> *Climate prediction center MORPHing technique*.



dan una medición directa de precipitación en superficie. Sin embargo, los pluviómetros pueden subestimar la precipitación debido al viento, evaporación, error de instrumental o error humano (Neff, 1977; Sevruk, 1982; Legates y Willmott, 1990). Las estimaciones satelitales por infrarrojo proveen una excelente cobertura temporal, pero son influenciadas por la temperatura superior de las nubes, y pueden muchas veces confundir una temperatura fría por precipitación (Griffith *et al.*, 1981; Wylie, 1979; Arkin y Meisner, 1987; Arkin y Xie, 1994; Arkin *et al.*, 1994). Kondragunta y Gruber (1997) demostraron que productos combinados –satélite/pluviómetro– fueron más realistas en la representación de los ciclos anuales e interanuales (Gottschalck *et al.*, 2005).

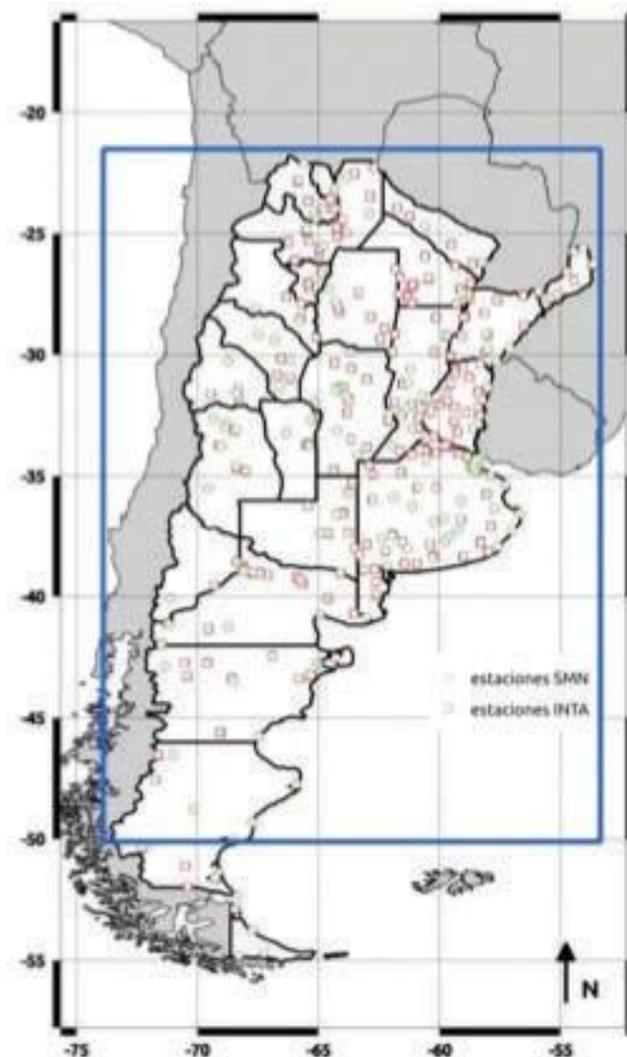
El objetivo de este trabajo es realizar una correc-

ción en las estimaciones de precipitación mensuales realizadas por la misión TRMM. Para dicha tarea se tomarán como referencia datos reportados por los pluviómetros. La corrección se realizará basándose en el algoritmo de interpolación de Barnes, combinando datos matriciales (formato *raster*) con datos puntuales de los pluviómetros (formato vectorial), y se validará la metodología mediante el empleo de validación cruzada.

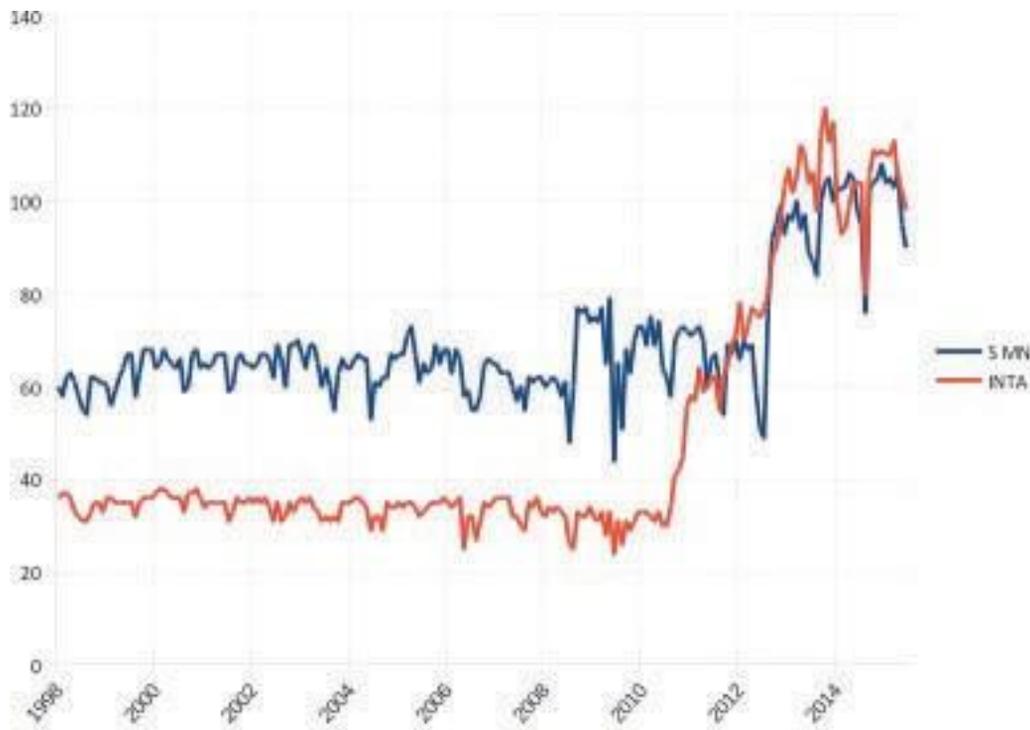
## Materiales y métodos

### Región de estudio

La región de estudio comprende los límites políticos de la república Argentina hasta los 50° de latitud Sur (Figura 1), siendo este límite definido por los productos satelitales de precipitación que se desea corregir. Debido a la extensión en



**Fig. 1. Región de estudio (azul) y estaciones meteorológicas**  
(Fuente: Elaboración propia. Mapa generado en QGIS 2.8)



**Fig. 2. Evolución mensual de la cantidad de pluviómetros. Rojo: red del INTA; azul: red del SMN)** (Fuente: Elaboración propia)

latitud de la Argentina, la región hidrológica de estudio es ampliamente heterogénea y se clasifica de acuerdo con el volumen de precipitación media anual, que varía desde valores inferiores a los 100 mm anuales, llegando a máximos de 2500 mm anuales (Peñalba *et al.*, 2004).

### Datos de precipitación

La misión *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) fue lanzada en 1997 en conjunto por la agencia *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) y la *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). La misma tiene como objetivo el monitoreo de la precipitación del trópico y subtropical y la estimación del calor latente asociado. TRMM incluye varios sensores activos y pasivos, como ser un radar de precipitación, un sensor visible e infrarrojo (VIRS) y un sensor de microondas (TMI) (Kummerow *et al.*, 2000). Para mayor detalle de los sensores se recomienda el artículo de Kummerow *et al.* (1998). Entre los muchos productos que TRMM provee a

través de su *web* se encuentran los productos 3B42<sup>4</sup> y 3B43<sup>5</sup>. Estos productos se encuentran disponibles desde el 01-01-1998 hasta la fecha y cubren todo el globo entre los  $\pm 50^\circ$  de latitud, con una resolución espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ . La resolución temporal del producto 3B42 es de 3 horas, mientras que el producto 3B43 es mensual. En el caso del producto mensual, éste posee una corrección ya que combina las estimaciones generadas por TRMM y otros satélites, con mediciones pluviométricas obtenidas de *Climate Anomaly Monitoring System* (CAMS) del centro de predicción del clima de NOAA y/o mediciones de *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC) (Su *et al.*, 2007; Collischonn *et al.*, 2008; McCabe *et al.*, 2008; Almazroui, 2011). Ambos productos fueron descargados de la página oficial de TRMM (<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>) para las fechas comprendidas entre enero de 1998 y junio de 2015. Las imágenes en formato *Hierarchical Data Format* (HDF) fueron convertidas a GeoTIFF (TIFF georeferenciados) y recortadas de manera que coincidan

<sup>3</sup> Estimación global de precipitaciones con resolución temporal de 3 horas y resolución espacial de  $0,25^\circ$ . [http://mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM\\_3B42\\_007.shtml](http://mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM_3B42_007.shtml)

<sup>4</sup> Estimación global de precipitaciones con resolución temporal de 1 mes y resolución espacial de  $0,25^\circ$ . [http://mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM\\_3B43\\_007.shtml](http://mirador.gsfc.nasa.gov/collections/TRMM_3B43_007.shtml)

con el área de estudio (Figura 1). En el caso del producto 3B42, el mismo fue llevado a intervalo mensual mediante la acumulación por mes de sus estimaciones.

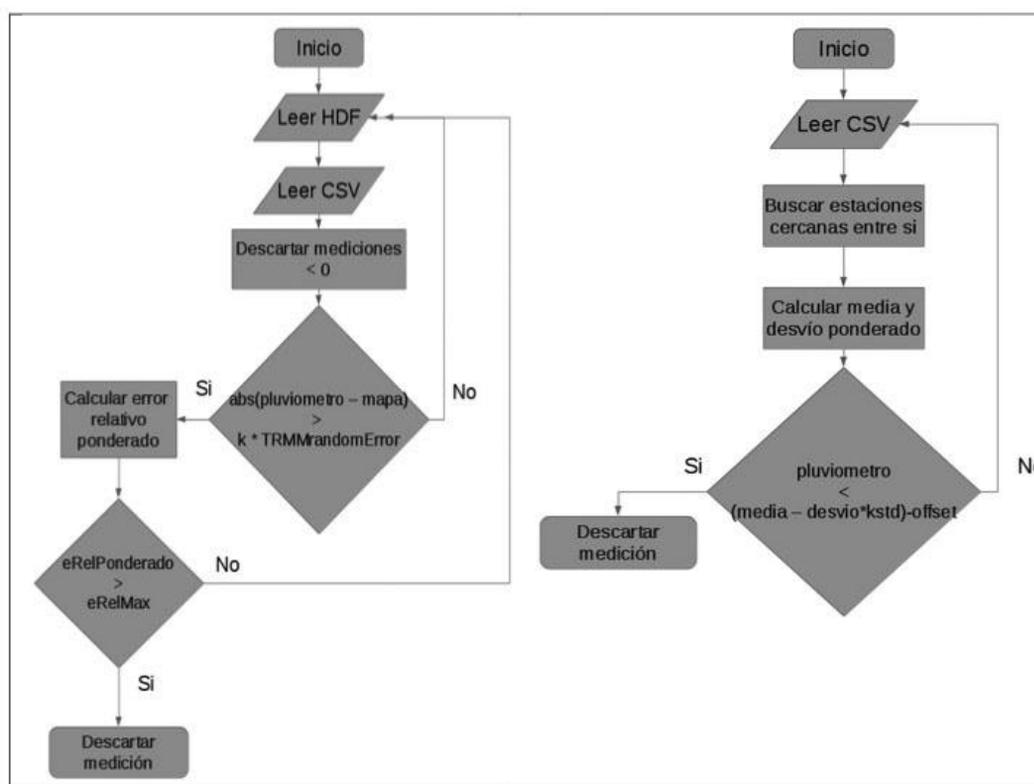
Los datos pluviométricos de estaciones meteorológicas fueron tomados de la red de estaciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), provistas por el Instituto del Clima y Agua y por la red del Servicio Meteorológico Nacional (SNM), (Figura 1). Ambas redes realizan mediciones diarias de diversas variables meteorológicas, de donde solo se extrajo la precipitación, y se la acumuló en intervalos mensuales. Es necesario destacar que el total de estaciones suele variar a lo largo del período considerado ya que hay estaciones que se han dado de baja, otras en reparación e incluso hay estaciones nuevas (Figura 2).

### Validación de datos pluviométricos

Dado que los pluviómetros requieren un estricto cronograma de mantenimiento y limpieza –el cual es difícil de cumplimentar– y son además

instrumentos susceptibles a varias fuentes de error (la mayoría de las cuales provocarán una medición por defecto), es necesario un control de calidad de las mediciones previo a aplicar el algoritmo de corrección (Huffman et al., 1997).

*Primera verificación:* el juego de mapas 3B43 del TRMM es un producto con varios niveles de procesamiento, el cual ya cuenta con una corrección basada en la red de pluviómetros del GPCC. Posee además una especificación del *error absoluto aleatorio* (Huffman et al., 2014) mediante la cual se puede conocer la calidad del dato leído en un determinado pixel. La primera verificación consiste en comparar la diferencia entre el pluviómetro bajo análisis y mapa satelital 3B43 vs. el error absoluto especificado por el producto 3B43. En caso de obtenerse una diferencia pluviómetro-mapa menor a cero (recuérdese que los errores en los pluviómetros suelen darse por defecto), y a su vez el valor absoluto de la diferencia sea mayor al error especificado por el 3B43 multiplicado por un factor de tolerancia k, se procederá a analizar el error relativo de dicha medición dado que se está frente a un valor susceptible



**Fig. 3. Esquema de los algoritmos de descarte de estaciones (izquierda: método del error relativo ponderado; derecha: método de los k-vecinos más cercanos)**

(Fuente: Elaboración propia. Diagrama de flujos generado en LibreOffice)

de ser descartado (Figura 3 izquierda). Para el cálculo del error relativo del pluviómetro, se realiza una ponderación adicional, multiplicando su diferencia relativa por un factor basado en el error relativo del 3B43. De esta manera, el error relativo del pluviómetro tendrá mayor peso donde el error relativo del 3B43 es bajo y viceversa. En caso de que el error relativo ponderado del pluviómetro exceda el umbral  $eRelMax$ , se procede a descartar la medición.

*Segunda verificación:* continuando con el estudio de la calidad de las mediciones, deberán descartarse aquellas cercanas entre sí que arrojen valores muy dispares. Para detectar y descartar dichas mediciones, se empleó el algoritmo de  $k$ - $MW$ , el cual busca los  $k$  pluviómetros más cercanos dentro de un radio acordado por el usuario. Una vez obtenida la lista de pluviómetros vecinos, se procede a calcular el desvío y la media ponderada por la distancia desde el pluviómetro bajo análisis hasta el pluviómetro más cercano, teniendo así mayor peso en la media y desvío aquellos pluviómetros más cercanos al punto bajo análisis. Se define como media ponderada y desvío ponderado a:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}{(n'-1) \sum_{i=1}^n w_i}} \quad (2)$$

donde  $w_i$  representa el peso asignado a cada  $x_i$  y  $n$  es la cantidad de pluviómetros vecinos encontrados,  $\bar{x}$  es la media ponderada y  $n'$  representa la longitud del vector pesos  $w_i$ . En caso de que la medición del pluviómetro se encuentre por debajo de un umbral determinado por la media y el desvío ponderado, se procede a descartar la medición (Figura 3 derecha).

Para evitar falsos descartes tuvo que agregarse un parámetro de *offset*. Para seleccionar un radio de búsqueda adecuado, se empleó el análisis de correlación mensual entre pluviómetros realizado por Raddatz (1987), el cual estudia el coeficiente de correlación diario y mensual entre pluviómetros en función de la distancia.

## Algoritmo de interpolación de Barnes

En este trabajo se tomó como punto de partida el algoritmo de interpolación de Barnes (Rozante *et al.*, 2010), el cual en sus primeras versiones requería múltiples iteraciones para converger en un resultado aceptable (Barnes, 1964), mejorándose luego en Barnes (1973) mediante la incorporación de un nuevo parámetro llamado *gamma*, el cual permite la convergencia en solo una iteración adicional (Koch *et al.*, 1983). Una de las ventajas del algoritmo de interpolación de Barnes es que permite definir como parámetro a un radio  $R$  que determina la forma del filtro. Dado que la función peso (3) es de característica gaussiana,  $R$  puede interpretarse como el "radio de influencia" de la interpolación. Es decir que, mediante la manipulación del valor de  $R$ , se podrá seleccionar el nivel de detalle en el mapa (Koch *et al.*, 1983). Para la primera pasada del algoritmo, se define la función peso de la siguiente manera:

$$w_n = e^{\left(\frac{-d_n^2}{R^2}\right)} \quad (3)$$

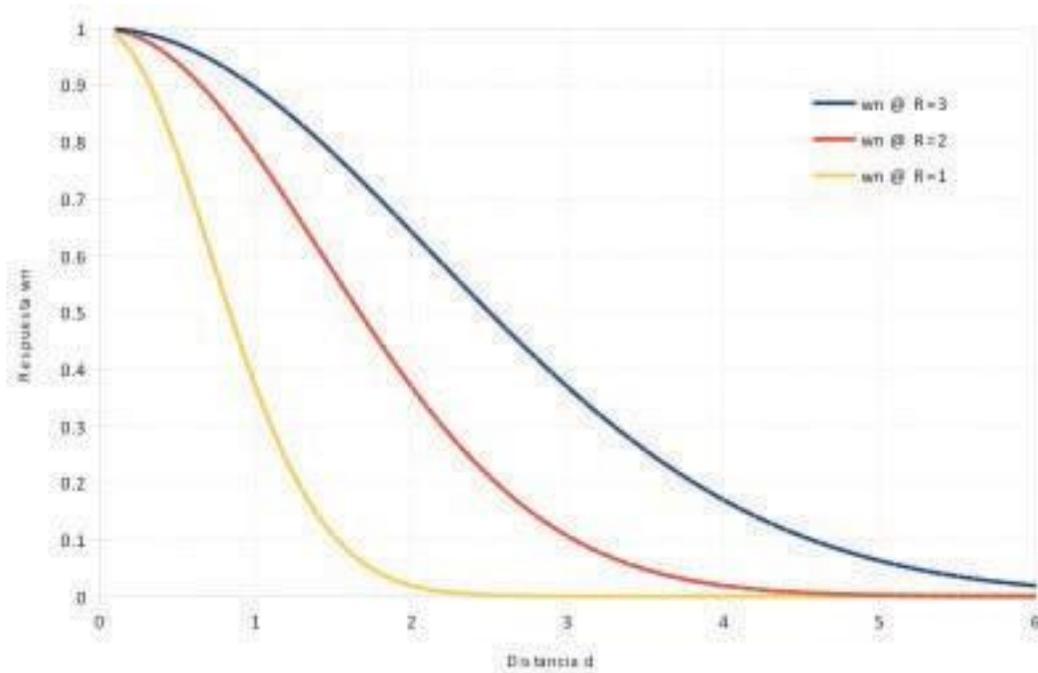
donde  $d$  es la distancia entre el punto bajo análisis y un punto  $n$  de la grilla y  $R$  es el radio de influencia. Esta relación implica que al aumentar  $R$  se disminuye el ancho de banda del filtro, perdiendo así detalle en la interpolación, mientras que al disminuir  $R$  aumenta el detalle pero se pierde influencia entre un punto interpolado y su adyacente (Figura 4).

La primera pasada del algoritmo de Barnes está dada por:

$$g_0(i, j) = \frac{\sum_{n=1}^N w_n \cdot f(x_n, y_n)}{\sum_{n=1}^N w_n} \quad (4)$$

donde  $w_n$  es la función peso definida anteriormente y  $f_{(x, y)}$  es el campo matricial a ser interpolado. Se define luego la función peso pero agregando un factor de convergencia llamado *gamma* ( $\gamma$ ) el cual permite converger a un resultado aceptable con tan solo una pasada adicional (Koch *et al.*, 1983):

$$w'_n = e^{\left(\frac{-d_n^2}{\gamma R^2}\right)} \quad (5)$$



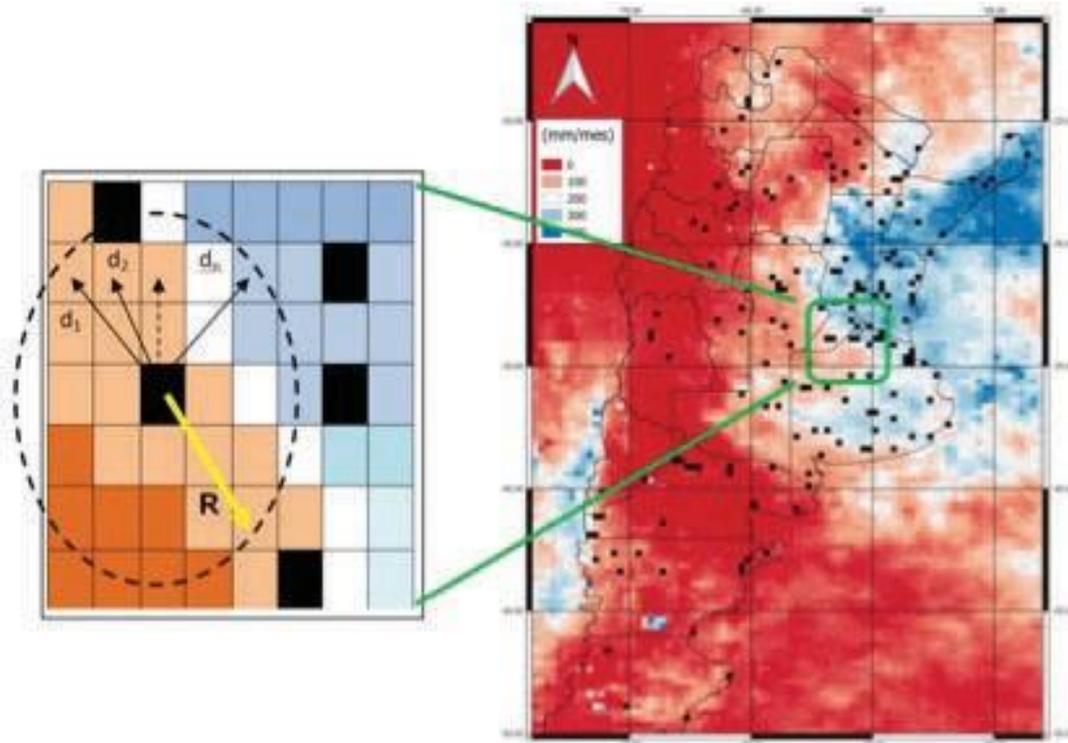
**Fig. 4. Forma del filtro en función de R**  
(Fuente: Elaboración propia)

donde  $d$  es la distancia entre el punto bajo análisis y un punto  $n$  de la grilla,  $R$  es el radio de influencia, y  $\gamma$  es el parámetro de convergencia ( $0 < \gamma < 1$ ).

Segunda pasada del algoritmo:

$$g_1(i, j) = g_0(i, j) + \frac{\sum_{n=1}^N w'_n \cdot [f(x_n, y_n) - g_0(x_n, y_n)]}{\sum_{n=1}^N w'_n} \quad (6)$$

donde  $g_0(i, j)$  es la primera pasada de la interpolación,  $w'_n$  es la función peso modificada, y  $f_{(x,y)} - g_{0(x,y)}$  es el error de interpolación de la primera pasada. Si bien el algoritmo de interpolación de Barnes requiere tan solo de dos parámetros ( $R$  y  $\gamma$ ), se debe emplear cierto criterio al momento de elegir un valor. Según literatura (Barnes, 1973; Koch *et al.*, 1983), valores óptimos de  $\gamma$  son 0,2 ó 0,3. Para la selección de  $R$ , se emplea el estudio realizado por Koch *et al.* (1983), el cual determina el radio de influencia de la interpolación en función de la distribución de los pluviómetros y su uniformidad.



**Fig. 5. Ejemplo de aplicación del algoritmo de Barnes sobre un mapa. Los puntos negros representan los pluviómetros**  
(Fuente: Elaboración propia. Mapa generado en QGIS 2.8)

### Aplicación del algoritmo

Previo a la aplicación del filtro, se reemplazan los píxeles del mapa satelital original con los píxeles correspondientes a los valores de los pluviómetros validados. Se procede luego a la aplicación del algoritmo (Figura 5).

### Selección de un método de validación

La validación de datos históricos presenta un inconveniente: no es posible regresar en el tiempo para verificar en campo si la corrección efectuada fue positiva (mejora) o negativa (empeora). Es por ello que se empleará el método de validación cruzada *leave-one-out* (Dong y Wang, 2010; Wong, 2015). Consiste en aplicar el algoritmo de corrección sobre el mapa original pero dejando fuera un punto del mapa de pluviómetros, y determinar luego si en ese punto hubo una mejora (valor del píxel se acercó al valor del pluviómetro) o un empeoramiento (valor del píxel se alejó del valor del pluviómetro). Para cada punto del juego de datos de pluviómetros se determina entonces el error entre este punto y el

mapa original, y el error entre el punto y el mapa *leave-one-out* corregido. Se acumulan los errores mes a mes para un dado *set* de mapas, y se determina luego la raíz del error cuadrático medio ( $RMSE^6$ ) (Ec. 7 y 8):

$$RMSE_{Original} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - orig_i)^2}{n}} \quad (7)$$

$$RMSE_{L1o} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - l1o_i)^2}{n}} \quad (8)$$

donde  $n$  representa la cantidad de puntos sobre los cuales se aplica *leave-one-out*,  $p_i$  representa el punto bajo análisis,  $orig_i$  representa el punto en el mapa original, y  $l1o_i$  representa el punto en el mapa corregido dejando al punto  $p_i$  fuera.

En caso de existir una mejora en los mapas, es de esperar que el  $RMSE$  entre el punto y el mapa original sea mayor que el  $RMSE$  entre el punto y el mapa *leave-one-out* corregido. Para facilitar la interpretación de los puntos donde hubo -o no- mejoras, cada punto es

<sup>6</sup> *Root Mean Square Error* (Error cuadrático medio).

representado por un pixel generado por la siguiente ecuación, la cual compara ambos valores de *RMSE* y expresa el resultado como un porcentaje de mejora.

*matrizMejora* =

$$\left( \frac{RMSE_{Original}}{RMSE_{10}} - 1 \right) \cdot 100 \quad (9)$$

### Selección de los puntos a validar

La elección de los puntos sobre los cuales se realizará el proceso de validación tiene un papel fundamental en la obtención de un resultado consistente. Como primera restricción, se deben seleccionar puntos que se repitan durante todo el período bajo análisis. Y como segunda restricción, los puntos seleccionados deben tener cierta cercanía entre sí, de forma tal que exista una influencia entre ellos. Para este último, se utilizará la gráfica de la función respuesta del peso  $w_n$  (Figura 4).

## Resultados y discusión

### Validación de datos pluviométricos

Como resultado de la primera verificación, la cual contrasta las mediciones entre estaciones y sensores remotos, se obtuvo la Tabla 1.

eRelMax	k = 1,0	k = 1,5	k = 2,0	k = 2,5	k = 3,0
10%	3.195	1.222	463	200	78
20%	2.977	1.220	463	200	78
<b>30%</b>	1.687	1.133	<b>451</b>	197	78
40%	754	754	415	188	78

**Tabla 1. Cantidad de mediciones descartadas (de un total de 26.694) según el *k* y *eRelMax* empleados.** (Fuente: Elaboración propia)

Offset	kstd = 0,5	kstd = 1,0	kstd = 1,5	kstd = 2,0
0	6.377	1.134	100	20
5	2.338	358	34	6
<b>10</b>	1.282	<b>183</b>	17	4
15	802	110	8	3

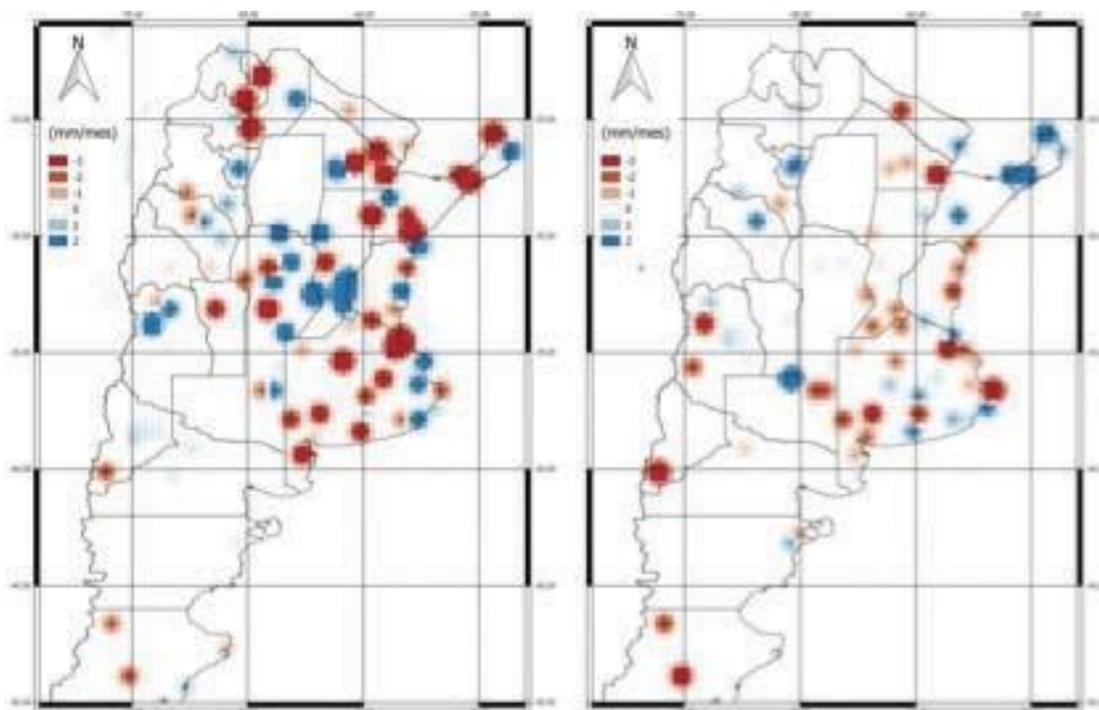
**Tabla 2. Cantidad de mediciones descartadas (de un total de 24.967) según el *kstd* y *offset* empleados. (Radio de búsqueda = 125 km. Pluviómetros previamente filtrados con *k* = 2 y *eRelMax* = 30%).** (Fuente: Elaboración propia)

En la misma se observó que valores de  $k > 2$  tienen poco efecto al variar *eRelMax*, y valores de  $k < 2$  disparan el descarte a valores muy altos, dejando fuera mediciones extremas. Por otro lado, se observó que valores de *eRelMax* < 30% no generaron variación en la cantidad de descartes. Por ello se adoptó como valores óptimos a  $k = 2$  y *eRelMax* = 30%.

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la segunda verificación, la cual detecta discrepancias entre estaciones cercanas. De los resultados se desprende que valores de *kstd* > 1 producen poco descarte, y valores de *kstd* < 1 disparan el descarte a valores muy altos, dejando fuera mediciones extremas. Por otro lado, se observó que valores de *offset* < 5 también disparan el descarte. Por ello se adoptó como valores óptimos a *kstd* = 1,0 y *offset* = 10 como solución arbitraria. Téngase en cuenta que la mayoría de las estaciones dudosas fueron filtradas por la validación anterior, por ello es de esperar que el descarte en esta segunda verificación sea menor.

### Aplicación del algoritmo de Barnes

Dado que visualmente no es posible observar las correcciones en los puntos donde se encuentran los pluviómetros, se muestra a continuación un mapa que representa la diferencia



**Fig. 6. Diferencia entre mapa original y mapa corregido para Enero 2010 (izquierda) y Junio 2010 (derecha). Obsérvese la correspondencia entre las correcciones y los puntos de los pluviómetros en la Fig. 5**  
(Fuente: Elaboración propia)

Todas las imágenes corregidas se encuentran disponibles para descargar de la página oficial del INTA: [http://sepa.inta.gob.ar/trmm\\_corregidas/](http://sepa.inta.gob.ar/trmm_corregidas/)

Radio validación	2	3	4	5	6	7	Infinito
Mediciones en común	4	8	10	16	19	20	22
Representatividad	3%	6%	7%	12%	14%	15%	16%

**Tabla 3. Cantidad de mediciones en común en función del radio de validación (de una media de 135 estaciones para el período 2009-2015)** (Fuente: Elaboración propia)

entre el mapa original y el mapa corregido (Figura 6). De la corrección se pudo apreciar que no existe un patrón definido para Ene/2010, situación que se repitió en el resto de la serie de imágenes. Sí se observa una mayor corrección absoluta durante los meses de verano, debido a que las precipitaciones son más intensas.

#### Ajuste del método de validación

Se seleccionó como radio de validación aquel en el cual la función respuesta  $w_n$  cae un 93%.

Dado que se adoptó un  $R=3$  como parámetro para la interpolación de Barnes (ver Tabla 4 más adelante), dicho valor se obtuvo a una distancia  $d=5$ . Esto quiere decir que un punto alejado de otro una distancia  $d=5$ , tiene una influencia del 7% sobre el primero (ver Figura 4).

De la Figura 4 se concluyó que radios de validación de 6 o mayores producen una influencia sobre sus puntos vecinos menores al 2%, por lo cual dichos radios son descartados. A su vez, de la Tabla 3 pudo evaluarse que radios

<b>R</b>	<b><math>\gamma = 0,2</math></b>	<b><math>\gamma = 0,3</math></b>
2	6,23%	7,16%
<b>3</b>	<b>7,33%</b>	<b>7,51%</b>
4	7,09%	6,46%

**Tabla 4. Porcentaje promedio de mejora según  $\gamma$  y  $R$**  (Fuente: Elaboración propia)

<b>Período</b>	<b><math>\gamma = 0,2</math></b>	<b><math>\gamma = 0,3</math></b>
1998-2003	<b>1,47%</b>	1,27%
2004-2008	<b>3,97%</b>	3,23%
2009-2015	7,33%	<b>7,51%</b>

**Tabla 5. Porcentaje promedio de mejora según  $\gamma$  ( $R=3$ ) para los diferentes períodos de estudio** (Fuente: Elaboración propia)

menores a 5 producen un elevado descarte en cuanto a los puntos en común a utilizarse. Con un radio = 5 se obtuvo una representatividad del 12% sobre la media de puntos en todo el período.

### **Optimización de los parámetros de interpolación**

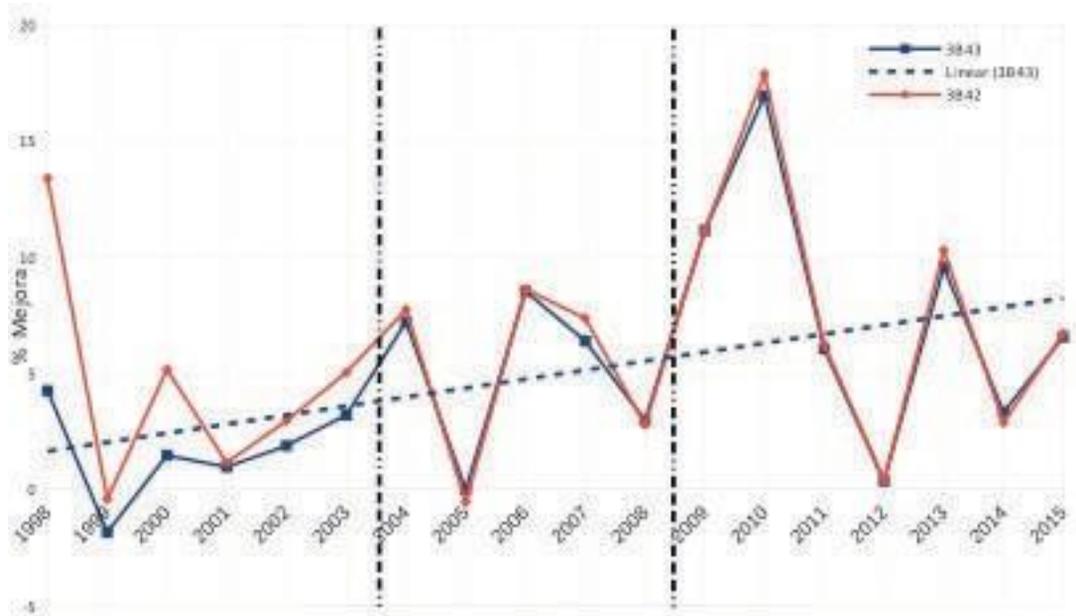
Se procedió a la optimización de los parámetros de interpolación  $R$  y  $\gamma$  de Barnes para el período 2009-2015. El porcentaje promedio de mejora se calculó como la media de los porcentajes de mejora de cada punto analizado por la ecuación (10):

$$\overline{mejora} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n} \quad (10)$$

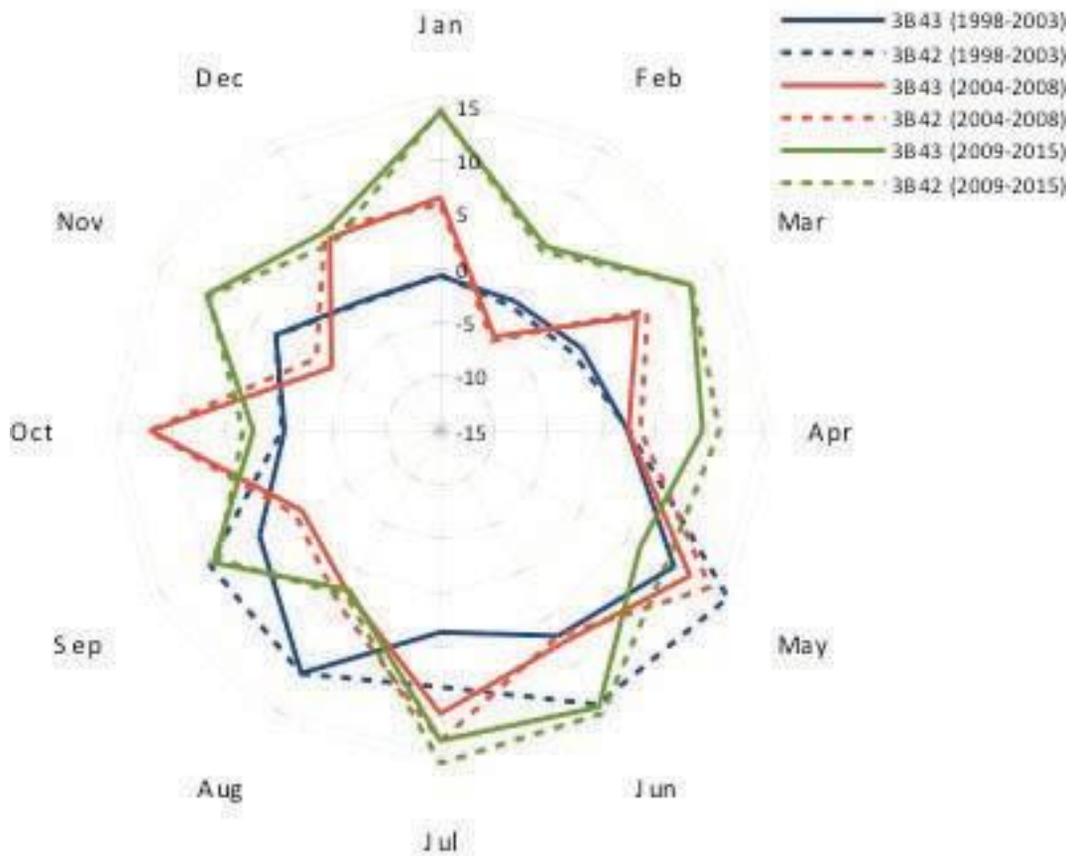
donde  $n$  es la cantidad de puntos analizados y  $m_i$  es el porcentaje de mejora en dicho punto.

De la Tabla 4 se observó que los mejores valores se obtuvieron para un  $R=3$ , no quedando definido el valor de  $\gamma$  óptimo. Para obtener dicho parámetro se procedió a analizar todo el período completo, desde 1998 hasta 2015, particionado en tres según la cantidad de estaciones disponibles.

Finalmente se determinó que los parámetros óptimos para la interpolación de Barnes son:  $R = 3$  y  $\gamma = 0,2$ . Se continuó luego con el análisis de mejora anual –año a año– y estacional –mes a mes– del juego mapas completo del producto 3B42 y 3B43 para los tres períodos enunciados en la Tabla 5.



**Fig. 7. Análisis de mejora promedio anual 1998-2015 (azul: 3B43; punteada: tendencia 3B43; rojo: 3B42; línea vertical: períodos de análisis) (Fuente: Elaboración propia)**



**Fig. 8. Análisis de mejora promedio mensual (línea llena: 3B43; línea punteada: 3B42; azul: 1998-2003; rojo: 2004-2008; verde: 2009-2015) (Fuente: Elaboración propia)**

## Intercomparación de productos

### Análisis anual

Durante el análisis anual, se observó una tendencia hacia el incremento en la mejora a partir de 2004 (Figura 7). Se observa también una menor discrepancia entre las correcciones efectuadas en el producto 3B43 vs. 3B42 a partir de 2004.

### Análisis mensual

De acuerdo al análisis mensual (Figura 8), se pudo comprobar que existe una tendencia a obtener una mejora de los mapas durante los meses más fríos del año debido a la sobreestimación que realizan las observaciones por satélite (Ebert *et al.*, 2007). También se verifica tanto en la Figura 8 como en la Figura 7, que el promedio de mejora es mayor en el producto 3B42 debido a que este no cuenta con la corrección que sí se realiza en el producto 3B43 mediante los pluviómetros de la red del GPCC.

### Conclusiones

Pudimos verificar que el producto 3B43 es susceptible de ser corregido, principalmente debido a que utilizamos un juego de datos adicional a la corrección que otorga la red de pluviómetros del GPCC. La mejora obtenida se validó por el método de validación cruzada *leave-one-out*.

Se verificó también la correcta aplicación del algoritmo de interpolación de Barnes y su particular utilidad al momento de trabajar con datos distribuidos de manera irregular. Dicho algoritmo puede tener aplicación en otras ramas de la electrónica como ser la telemetría mediante sensores remotos distribuidos aleatoriamente, el monitoreo de variables ambientales, etc.

El presente trabajo queda abierto a futuros investigadores que deseen continuar con el proyecto de investigación evaluando la representatividad espacial de los pluviómetros de la red del INTA y el SMN (Raddatz, 1987), mejorar el método de análisis de la calidad de los pluviómetros (Rudolf, 1993), y analizar cómo disminuye la capa de 'error absoluto' de los mapas corregidos con el algoritmo aquí propuesto.

### Agradecimientos

Queremos agradecer al Departamento de Ingeniería Electrónica de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional y al Instituto de Clima y Agua del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por haber puesto a nuestra disposición sus instalaciones y por sobre todo a sus profesionales, con quienes hemos consultado y evacuado gran cantidad de dudas.

## Referencias

- ALMAZROUI, M. (2011). Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009. *Atmos. Res.* 99, 400–414.
- ARKIN, P. A.; ARDANUY, P. E. (1989). Estimating Climatic-Scale Precipitation from Space: A Review. *J. Climate*, 2, 1229–1238.
- ARKIN, P. A.; MEISNER, B. N. (1987). The relationship between large-scale convective rainfall and cold cloud over the Western Hemisphere during 1982-84. *Mon.Wea.Rev.*, 115: 51-74.
- ARKIN, P. A.; XIE, P. P. (1994). The Global Precipitation Climatology Project: First Algorithm Inter-comparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 401–419.
- ARKIN, P. A.; JOYCE, R.; JANOWIAK, J. E. (1994). IR techniques: GOES precipitation index. *Remote Sens. Rev.*, 11, 107–124.
- BARNES, S. L. (1964). A technique for maximizing details in a numerical weather map analysis. *Journal of Applied Meteorology*, 3, 396-409.
- BARNES, S. L. (1973). Mesoscale objective map analysis using weighted time series observations. NOAA Technical Memorandum NSSL-62.
- BARRETT, E.C.; MARTIN, D. W. (1981). The Use of Satellite Data in Rainfall Monitoring. Academic Press, pp.340.
- CAMPOS, A. N.; FIGUEROA SCHIBBER, E.; GARCÍA, A. G. (2010). Evaluación de la información satelital para el estudio de la dinámica hidrológica de la Llanura Pampeana. Instituto de Clima y Agua, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- COLLISCHONN, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. (2008). Daily hydrological modeling in the Amazon basin using TRMM rainfall estimates. *J. Hydrol.* 360(1–4), 207–216.
- DONG, M ; WANG, N. (2010). Adaptive network-based fuzzy inference system with leave-one-out cross-validation approach for prediction of surface roughness. *Applied Mathematical Modelling* 35 (2011) 1024–1035.
- EBERT, E. E.; JANOWIAK, J. E.; KIDD, C. (2007). Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. *American Meteorological Society*. p. 47-64.
- GOTTSCHALCK, J.; MENG, J.; RODELL, M.; HOUSER, P. (2005). Analysis of multiple precipitation products and preliminary assessment of their impact on global land data assimilation system land surface states. *J Hydrometeorol* 6(5):573–598.
- GRIFFITH, C. G.; AUGUSTINE, J. A.; WOODLEY, B. L. (1981). Satellite rain estimation in the US high plains. *J. Appl. Meteorol.* 20, 53-66.
- HOBOUCHIAN, M. P.; SALIO, P.; VILA, D.; GARCÍA SKABAR, Y. (2010). Validación de estimaciones de precipitación por satélite sobre Sudamérica utilizando una red de observaciones de alta resolución espacial.
- HONG, Y.; HSU, K. L.; SOROOSHIAN, S.; GAO, X. G. (2004). Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. *Journal of Applied Meteorology* 43: 1834–1852.
- HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; ARKIN, P.; CHANG, A.; FERRARO, R.; GRUBER, A.; JANOWIAK, J.; MCNAB, A.; RUDOLF, B.; SCHNEIDER, U. (1997). The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Combined Precipitation Dataset, *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 78, no. 1, 5-20.
- HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T. (2014). TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation. Mesoscale Atmospheric Processes Laboratory, NASA Goddard Space Flight Center.
- JIANG, H.; ZIPSER, E. J. (2010). Contribution of tropical cyclones to the global precipitation from eight seasons of TRMM data: Regional, seasonal, and interannual variations. *J. Climate*, 23, 1526–1543.
- JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. (2004). CMORPH: a method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. *J Hydrometeorol* 5:487–503.
- KOCH, S. E.; DESJARDINS, M.; KOCIN, P. (1983). An interactive Barnes Objective map analysis scheme for use with satellite and conventional data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 22, no. 9, 1487-1503.

KONDRAGUNTA, C.; GRUBER, A. (1997). Intercomparison of spatial and temporal variability of various precipitation estimates. *Adv. Space Sci.*, 19, 457–460.

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. (1998). The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. *Journal of atmospheric and oceanic technology*. vol. 15. p. 809-817.

KUMMEROW, C. et al. (2000). The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after two years in orbit. *American Meteorological Society*. vol. 39. p. 1965-1982.

LEGATES, D. R.; WILLMOTT, C. J. (1990). Mean seasonal and spatial variability in gauge-corrected, global precipitation. *International Journal of Climatology*, 10, 111-127.

MCCABE, G. J.; CLARK, M. P.; HAY, L. E. (2008). Rain-on-snow events in the western United States. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 88, 319–328.

MÉNDEZ, A. J. L., GONZÁLEZ, A. H., GARRIDO MONAGAS, M., ANDALIA GILBERT, A. I. (2013). Captación de lluvia con pluviógrafos de cubeta y su postprocesamiento. *Ingeniería hidráulica y ambiental*, vol. XXXIV, no. 2, may-ago 2013, p. 73-87.

NEFF, E. L. (1977). How much rain does a rain gage gage? *J. Hydrology*, 35, 213-220.

PEÑALBA, O. C.; VARGAS, W. M. (2004). Interdecadal and interannual variations of annual and extreme precipitation over central-northeastern Argentina. In: *International Journal of Climatology*, 24(12), p. 1565-1580.

RADDATZ, R. L. (1987). Mesoscale representativeness of rainfall measurements for Winnipeg. *Atmosphere-Ocean*, 25, 267-278.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; DE GONCALVES, L. G.; VILA, D. A. (2010). Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Weather and Forecasting*, 25, 885-894.

RUDOLF, B. (1993). Management and analysis of precipitation data on a routine basis. *Proc. Int. WMO/IAHS/ETH Symp. on Precipitation and Evaporation*, Bratislava, Slovakia, Slovak Hydromet. Inst., 69–76.

SEVRUK, B. (1982). Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use. *World Meteorol. Org., Operational Hydrol. Rep. 21*, WMO-NO. 589-591.

SOROOSHIAN, S.; HSU, K. L.; GAO, X.; GUPTA, H. V.; IMAM, B.; BRAITHWAITE, D. (2000). Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *B Am Meteorol Soc* 81:2035–2046.

SU, F.; HONG, Y.; LETTENMAIER, D. P. (2007). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *American Meteorological Society*. Vol. 9. p. 622-640.

TIAN, Y. D.; PETERS-LIDARD, C.D.; CHOUDHURY, B. J.; GARCIA, M. (2007). Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications. *J. Hydrometeorol* 8(6):1165–1183.

WONG, TZU-TSUNG (2015). Performance evaluation of classification algorithms by k-fold and leave-one-out cross validation. *Pattern Recognition* 48 (2015) 2839–2846.

WYLIE, D. P. (1979). An application of a geostationary satellite rain estimation technique to an extra-tropical area. *J.Appl.Meteorol.* 18: 1640-1648.

YONG, B.; REN, L.L.; HONG, Y.; WANG, J. H.; GOURLEY, J. J.; JIANG, S. H.; CHEN, X.; WANG, W. (2010). Hydrologic evaluation of multisatellite precipitation analysis standard precipitation products in basins beyond its inclined latitude band: A case study in Laohahe basin, China. *Water Resour Res* 46.