

Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar precipitación en Córdoba (Argentina)

Gustavo Ovando¹, Silvina Sayago¹, Yanina Bellini² y Mónica Bocco¹

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

² Estación Experimental Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas" - INTA. Anguil, La Pampa (Argentina).

Resumen. La precipitación posee alta variabilidad espacial y temporal, la cual frecuentemente no es registrada por las redes de estaciones meteorológicas existentes. La teledetección se constituye en una alternativa importante para describir las lluvias en diferentes escalas espaciotemporales. El objetivo de este trabajo fue evaluar las estimaciones de precipitaciones diaria, decádica y mensual de los productos GPM temprano, tardío y final, comparadas con datos registrados por el Servicio Meteorológico Nacional, para siete estaciones en distintas zona agropecuarias de la provincia de Córdoba. Los resultados muestran que la precipitación estimada por los productos IMERG reproduce adecuadamente la información registrada con pluviómetros. Los errores espaciotemporales fueron identificados y los coeficientes de R^2 que se obtuvieron se encontraron para IMERG-F entre 0,28-0,43 en precipitaciones diarias y 0,74-0,91 para las mensuales. Dentro de los productos IMERG el que presenta el mejor desempeño es el final. Los errores de ajuste disminuyen en la región sudeste de Córdoba donde las precipitaciones son mayores.

Palabras clave: productos IMERG, GPM, validación, lluvias, SMN.

1 Introducción

La disponibilidad global de agua se basa principalmente en las precipitaciones y las reservas de los océanos. Los patrones globales de la precipitación han cambiado debido al incremento de la temperatura como un resultado del cambio climático. Por lo tanto la demanda de agua dulce y sus reservas resultan afectadas a escala local, regional y global [1].

La precipitación posee alta variabilidad espacial y temporal, la cual frecuentemente no es registrada por las redes de estaciones meteorológicas existentes. La evaluación y comprensión de los patrones espaciotemporales de la precipitación resultan de gran interés en la mayoría de los estudios de procesos agronómicos e hidrológicos y ambientales en general [2], [3].

Los eventos de precipitación extrema asociados con inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra tienen importantes impactos socioeconómicos. Por otra parte, el manejo de los recursos hídricos, ya sea para riego, agricultura, control de inundaciones, manejo de sequías o administración del agua dulce, requiere de un conocimiento

preciso y oportuno de cuándo, dónde y cuánto llueve o nieva. Si bien la medición de la precipitación en un lugar determinado utilizando instrumentos de superficie es relativamente sencilla, la gran variabilidad espacial y temporal de la intensidad, el tipo y la ocurrencia de la precipitación dificultan las mediciones directas y uniformemente calibradas en grandes regiones. En la superficie, los pluviómetros también presentan problemas de representatividad cuando se estiman precipitaciones en áreas extensas, particularmente en períodos de tiempo cortos [4] o en regiones con redes meteorológicas poco densas, como es común encontrar en terrenos montañosos y/o países en vías de desarrollo [3].

En este contexto, la información proveniente de la teledetección satelital, se constituye en una alternativa importante para describir los eventos de precipitación en diferentes escalas espaciotemporales. En las últimas décadas, el avance en la tecnología permitió el desarrollo de una serie de productos de precipitación global, derivados de satélites [5]. Estos productos se basan en observaciones de infrarrojos calibrados y de microondas más infrarrojos de varias misiones de satélites, utilizando una variedad de técnicas de fusión. Mientras que los sensores infrarrojos en satélites geoestacionarios pueden proporcionar estimaciones de precipitación a altas resoluciones temporales (de hasta 15 minutos en algunas plataformas), los sensores de microondas (de satélites de órbita polar) siguen siendo el instrumento de elección para medir la precipitación ya que las firmas radiativas están más directamente relacionadas con las partículas precipitantes [4].

Un ejemplo de la combinación de observaciones del infrarrojo con microondas pasivas es el producto de Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). TRMM fue la primera misión satelital dedicada a observar las precipitaciones tropicales y subtropicales que dejó de operar en 2015. Una de las principales limitaciones de TRMM es que no estimaba adecuadamente la precipitación sólida ni la lluvia de baja intensidad (menor a 0,5 mm/h), y su frecuencia de muestreo que era de 15h a 4 días, lo cual introducía errores en las estimaciones. Otra restricción de TRMM fue la falta de cobertura de latitudes altas (37 ° N/S). La misión Global Precipitation Measurement (GPM) fue desarrollada para superar estos problemas, pudiendo así estimar la precipitación sobre los trópicos y altitudes altas (65° N/S), incluyendo precipitación sólida y poco intensa con una resolución temporal de 3 hs. [2].

Los productos generados por Integrated Multi-satellite Retrievals para GPM (IMERG) están disponibles en tiempo casi real: IMERG-E (IMERG Early) e IMERG-L (IMERG Late), y con mayor retraso, IMERG-F (IMERG Final), porque se compara con la información mensual de pluviómetros [6]. Las imágenes IMERG-E se producen para usuarios que necesitan una respuesta rápida relacionada con advertencias para potenciales de inundaciones o deslizamientos, en cambio IMERG-L está dirigido a usuarios que trabajan en el pronóstico agrícola o el monitoreo de las sequías. Como se expresa en [7] las estimaciones IMERG-F son las más precisas y confiables y se emplean para investigación.

En Argentina, la provincia de Córdoba es una de las principales productoras agropecuarias. En los últimos años esta región se vio afectada en importantes zonas por eventos de inundaciones y sequías. Por ello es importante para productores y decisio-

res de políticas agropecuarias contar con una herramienta que permita realizar estimaciones precisas y en tiempo real de las precipitaciones ocurridas en toda la zona.

El objetivo de este trabajo fue evaluar las estimaciones de precipitación diaria, decadal y mensual de los productos GPM temprano, tardío y final, comparadas con datos registrados por el Servicio Meteorológico Nacional, para estaciones insertas en distintas zona agropecuarias de la provincia de Córdoba.

2 Materiales y Métodos

2.1 Región de estudio e información meteorológica

La región central de Córdoba se caracteriza por presentar un clima semiárido y un régimen de precipitación monzónico, dado que las lluvias se concentran en el semestre cálido (de octubre a marzo), y su porcentaje respecto del total anual varía desde el 70% en el este hasta un 85% en el oeste del territorio provincial [8].

Se utilizaron en este trabajo datos de precipitación diaria proveniente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Para la realización de este trabajo fueron seleccionadas 7 estaciones (Tabla 1 y Figura 1), éstas son representativas de las condiciones agroclimáticas para distintos sistemas agropecuarios de la provincia, y poseen datos completos de precipitación desde marzo de 2014 a julio de 2017.

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas: ubicación geográfica y precipitación promedio anual.

Id	Localidad	Altura (msnm)	Ubicación	Precipitación promedio anual (mm)
1	Córdoba (Aero)	474	31°19'S 64°10'O	941,6
2	Laboulaye	137	34°08'S 63°20'O	1223,6
3	Marcos Juárez	114	32°42'S 62°10'O	1070,1
4	Pilar	338	31°40'S 63°53'O	785,9
5	Río Cuarto	420	33°07'S 64°10'O	829,3
6	Villa Dolores	569	31°57'S 65°10'O	756,1
7	Villa de María de Río Seco	341	29°54'S 63°40'O	754,9

En la Figura 1 se puede observar que las estaciones consideradas cubren, con su ubicación, distintas zonas agropecuarias de Córdoba, y en la Tabla 1 que las mismas se encuentran en diferentes alturas y presentan variados valores de precipitaciones anuales. Es importante notar que se incluye la estación meteorológica correspondiente a Villa Dolores, zona que se encuentra separada por un cordón de sierras y donde una importante superficie está ocupada con bosques naturales y la producción de cereales y oleaginosas no es significativa, aportando sólo el 4% a la producción provincial [9].

Para el análisis, además de las precipitaciones diarias del producto GPM y las registradas por el SMN, también se acumularon en valores decádicos y mensuales.

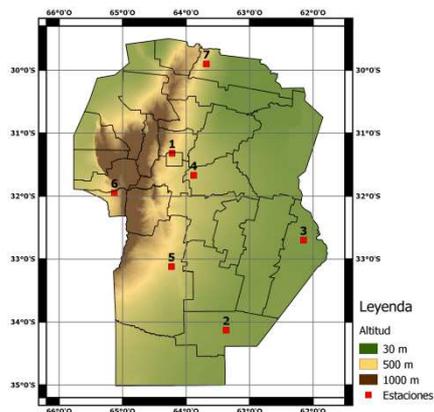


Fig. 1. Estaciones meteorológicas de la Provincia de Córdoba consideradas en este estudio.

2.2 Productos GPM

Las precipitaciones para las estaciones consideradas en la Tabla 1 se obtuvieron de los tres productos IMERG v05; éstos incluyen datos de precipitaciones con una resolución espacial de 0.1° de latitud/longitud y una resolución temporal diaria, generados a partir de la combinación de los datos de los satélites de la constelación GPM, y calibrados mediante análisis del Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) [10].

Los datos de GPM se obtuvieron de Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>) en dos presentaciones: como gráficos (Figura 2) y en archivos de valores separados por coma (*.csv).

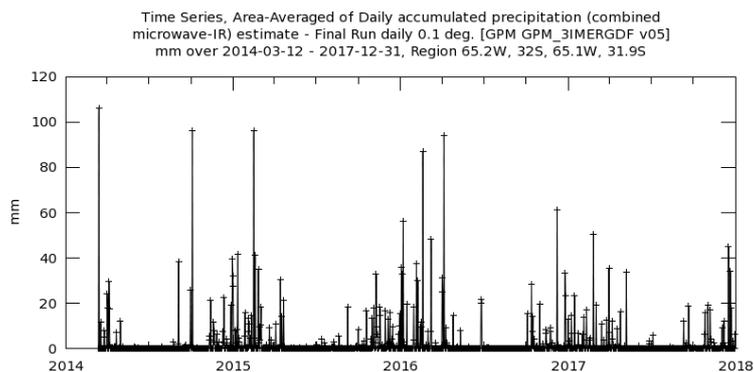


Fig. 2. Imagen de salida del producto GPM IMERG F v05, en Giovanni.

El sistema IMERG se ejecuta dos veces en tiempo casi real, primero para producir los datos IMERG-E que da cuenta de lo ocurrido 6 horas después del tiempo de ob-

servación nominal, y un segundo producto IMERG-L que contiene datos con aproximadamente 18 h de latencia. Una vez que se recibe el análisis de indicador mensual, se conforman los datos de IMERG-F, los cuales se ofrecen a los 3 meses posteriores de la observación. Este último producto se espera que describa mejor los cambios en la intensidad y características de la lluvia, ya que se ajusta utilizando datos de medición climatológica (análisis mensuales de GPCC).

2.3 Estadísticos de validación

Como el objetivo del trabajo fue evaluar la adecuación de los datos de GPM se contrastaron las precipitaciones informadas por los tres productos del mismo con los datos registrados por el SMN en forma independiente. Para ello se calcularon, considerando resolución temporal diaria, decádica y mensual, los coeficientes de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el porcentaje que representa en RMSE (%RMSE) y el sesgo (BIAS).

3 Resultados y discusión

Los valores de precipitación diaria máxima registrados y los estimados por cada producto GPM, para las estaciones consideradas y todo el período de tiempo que abarca el presente trabajo, se presentan en la Tabla 2.

Como puede observarse en la Tabla 2, los registros diarios presentan marcadas diferencias entre lo informado por el SMN y GPM, cualquiera sean sus productos. Éstas pueden provenir de que el producto satelital informa un promedio para cada píxel que presenta una resolución espacial de $0,1^\circ$ (aproximadamente 11,1 km). Otra fuente de error puede deberse a que el valor diario de precipitación del SMN es registrado en hora local, mientras que el producto GPM integra el valor diario en sistema Tiempo Universal Coordinado (UTC). Estos problemas de representatividad de los pluviómetros, fueron informados por [4], particularmente para estimaciones en cortos períodos de tiempo y en áreas extensas.

Tabla 2. Precipitación diaria máxima registrada e informada por GPM para Estaciones Meteorológicas consideradas.

Localidad	Precipitación (mm)			
	Registrada SMN	IMERG-E	IMERG-L	IMERG-F
Córdoba (Aero)	116	123,9	116,8	123,8
Laboulaye	137	136,0	116,0	107,7
Marcos Juárez	110	151,9	140,4	130,6
Pilar	83	157,2	151,6	127,9
Río Cuarto	77	91,7	95,6	68,5
Villa Dolores	69	208,1	211,5	106,4
Villa de María de Río Seco	82	90,9	88,3	93,7

Por lo anterior y dado que para algunas aplicaciones se necesita, en la mayoría de los casos, precipitación acumulada decádica o mensual, es que se muestran en la Tabla 3 los estadísticos de validación para las relaciones de las precipitaciones registradas e informadas por GPM, para todo el período en estudio, según los tres intervalos de tiempo considerados.

Tabla 3. Estadísticos de ajuste para precipitación registrada e informada por GPM, según se consideren datos diarios, decádicos y mensuales, en las Estaciones Meteorológicas consideradas entre 2014-2017.

Localidad	IMERG-E		IMERG-L		IMERG-F	
	R ²	%RMSE	R ²	%RMSE	R ²	%RMSE
Precipitación Diaria						
Córdoba (Aero)	0,27	362,35	0,28	344,66	0,34	321,26
Laboulaye	0,41	279,85	0,42	271,32	0,43	254,50
Marcos Juárez	0,37	372,55	0,36	367,37	0,38	333,99
Pilar	0,33	429,24	0,35	402,40	0,39	365,05
Río Cuarto	0,37	350,28	0,35	342,53	0,39	306,07
Villa Dolores	0,23	468,24	0,22	472,16	0,31	381,87
Villa de María de Río Seco	0,23	356,31	0,25	348,46	0,28	354,13
Precipitación Decádica						
Córdoba (Aero)	0,40	122,64	0,46	112,89	0,60	95,00
Laboulaye	0,68	80,84	0,69	77,59	0,80	60,92
Marcos Juárez	0,68	103,56	0,70	96,32	0,78	73,11
Pilar	0,71	119,44	0,68	105,42	0,79	73,85
Río Cuarto	0,42	105,34	0,42	100,11	0,63	76,49
Villa Dolores	0,37	144,30	0,40	142,86	0,57	102,09
Villa de María de Río Seco	0,40	118,74	0,46	114,37	0,60	98,59
Precipitación Mensual						
Córdoba (Aero)	0,56	74,22	0,61	68,51	0,90	35,97
Laboulaye	0,70	47,38	0,70	47,77	0,89	27,76
Marcos Juárez	0,69	59,86	0,68	56,50	0,83	36,95
Pilar	0,69	82,91	0,72	74,21	0,91	48,70
Río Cuarto	0,78	76,69	0,74	72,17	0,90	46,02
Villa Dolores	0,44	88,47	0,42	90,28	0,74	56,45
Villa de María de Río Seco	0,44	81,60	0,46	79,13	0,74	55,38

Como puede observarse en la Tabla 3, los valores de los estadísticos presentados, mejoran al usar el producto IMERG-F, independientemente de la estación y también a medida que se pasa de precipitación diaria a decadal y mensual.

Los coeficientes de R^2 que se obtuvieron para las estaciones de Córdoba se encontraron para IMERG-F entre 0,28-0,43 en valores diarios y 0,74-0,91 para los mensuales. Evaluando este mismo producto y resoluciones temporales para Singapur [11] encontraron, en promedio, valores de 0,28 y 0,67 para escala diaria y mensual, respectivamente; [12] presentaron para valores diarios de $R^2=0,38$ para la cuenca del río Ganjiang en China. Por otra parte [13] encontraron para los Países Bajos que también el índice R^2 mejoró gradualmente de 0,40 para precipitaciones diarias a 0,78 para acumuladas mensuales.

La Figura 3 muestra gráficos del tipo scatter plot donde se puede observar la concordancia en las estaciones con mayor y menor valor del coeficiente R^2 (Laboulaye y Villa Dolores, respectivamente) entre los datos registrados por el SMN y el IMERG-F, para cuando las precipitaciones se consideran por períodos de 10 días.

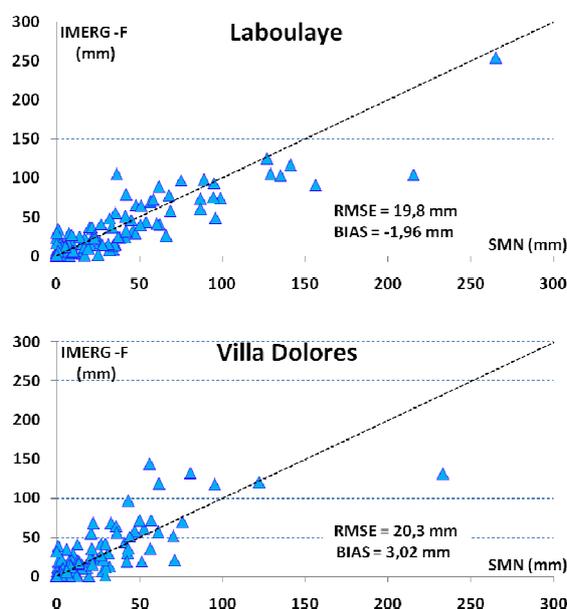


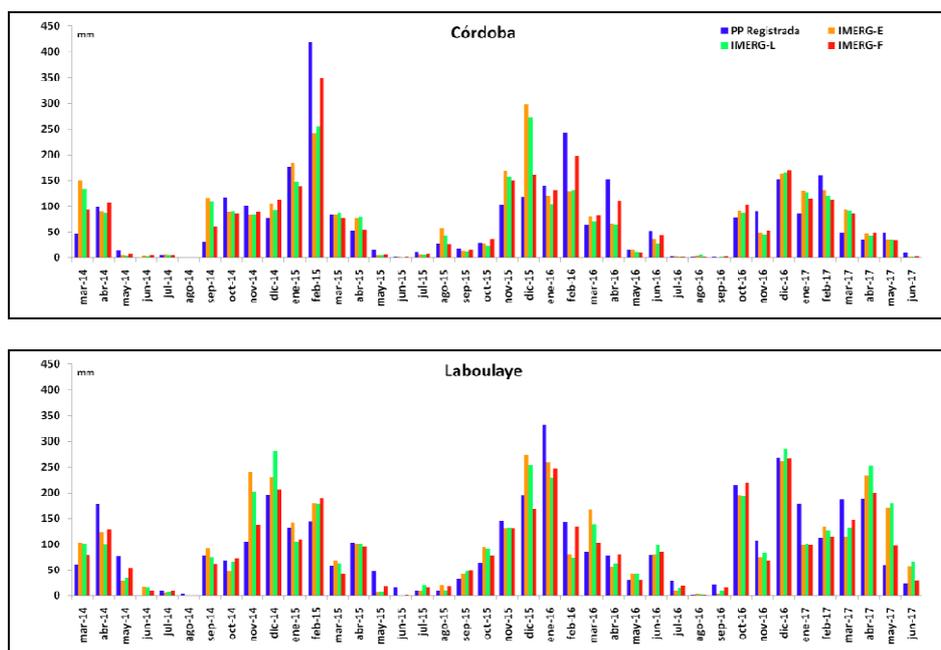
Fig. 3. Scatter Plots para precipitaciones decádicas en las estaciones con mayor y menor ajuste entre datos registrados por el SMN y IMERG-F.

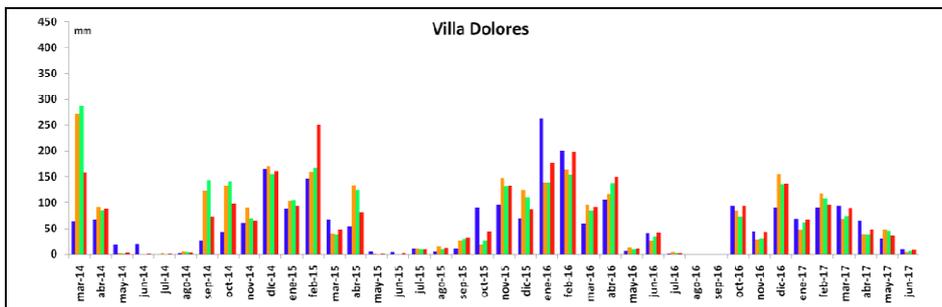
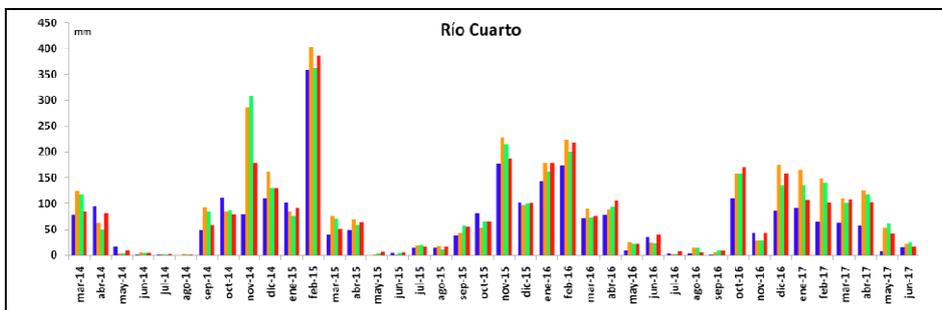
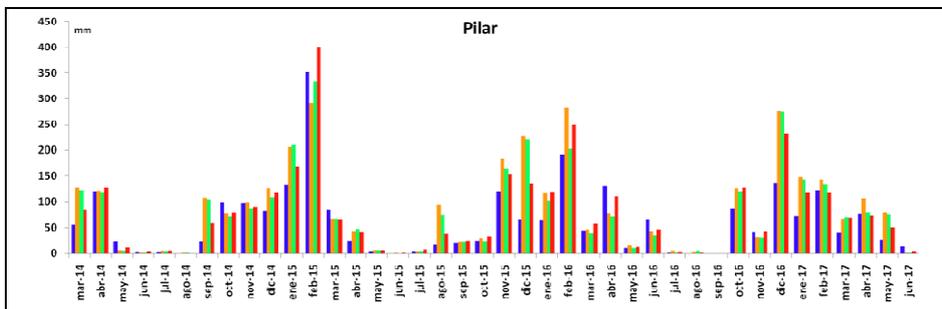
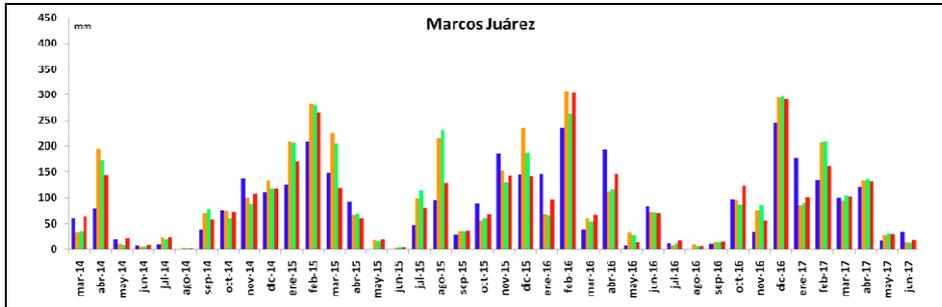
Si bien los valores de %RMSE (Tabla 3) a nivel decádico para Laboulaye y Villa Dolores son 60,9 y 102,1 %, respectivamente, cuando se considera el estadístico RMSE se encuentran valores similares para ambas estaciones (Figura 3). Esto puede deberse a que los valores de RMSE varían no linealmente con la precipitación media del lugar [14], [15]; por esto en localidades como Villa Dolores donde la precipitación media es menor (sólo 19,9 mm en 10 días) es de esperar que se incrementen los valores de %RMSE. Por otra parte en la Figura 3 también puede observarse que el producto IMERG-F tiende a subestimar los valores registrados en Laboulaye (con promedio

decádico de precipitaciones de 32,5 mm) en tanto que en Villa Dolores ocurre lo contrario, lo cual es confirmado por los valores que se obtienen para el BIAS. Esta tendencia de menor ajuste para las localidades con menor precipitación se mantiene cuando el análisis se realiza en diferentes escalas temporales.

Al analizar la precipitación mensual acumulada, el estadístico %RMSE del producto IMERG-F varía entre 27,76 y 56,45 %, valores similares a los presentados por [5] quienes informaron para este producto mensual, %RMSE de poco menos de 40% a mas de 60% en distintos meses y diferentes estaciones meteorológicas de China.

En la Figura 4 se puede observar la evolución temporal de las precipitaciones mensuales registradas por el SMN y las provenientes de los tres productos GPM empleados en este trabajo. En un primer análisis de la Figura 4 puede señalarse que los patrones estacionales de la lluvia del SMN, que se presentan en todas las estaciones consideradas, se repiten cuando se obtienen las precipitaciones mensuales a partir de IMERG E, IMERG-L e IMERG-F. Si bien cuando los registros pluviométricos acumulados mensuales superan los 350 mm no siempre las imágenes IMERG presentan concordancias similares; mientras que en las estaciones de Córdoba y Laboulaye subestimaron los registros, en Río Cuarto y Pilar sucedió lo contrario.





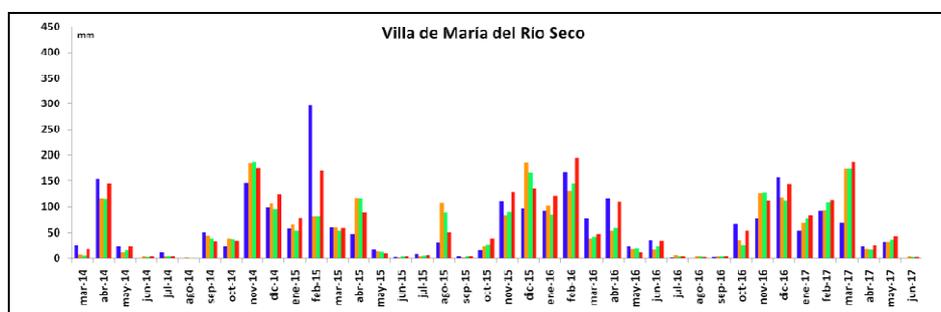


Fig. 4. Evolución temporal de las precipitaciones mensuales, registradas por el SMN y los tres productos GPM, para todas las estaciones consideradas en este estudio.

Es importante señalar que, para las dos estaciones con menor precipitación, las lluvias informadas por GPM, en cualquiera de sus tres presentaciones, siempre sobrees-timan los registros del SMN, exceptuando dos precipitaciones extremas correspondientes a enero de 2016 en Villa Dolores y febrero de 2015 en Villa de María del Río Seco (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticos de ajuste para precipitación mensual registrada por SMN e informada por GPM, en Estaciones Meteorológicas consideradas entre 2014 y 2017.

Localidad	IMERG-E		IMERG-L		IMERG-F	
	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS
Córdoba (Aero)	54,18	2,05	50,01	-2,51	26,26	-0,72
Laboulaye	45,85	3,02	46,23	2,70	26,87	-5,82
Marcos Juárez	50,78	14,04	47,93	10,28	31,35	5,16
Pilar	51,50	23,13	46,10	17,62	30,25	15,01
Río Cuarto	49,08	24,54	46,18	18,84	29,45	15,28
Villa Dolores	52,27	11,14	53,34	9,76	33,35	8,99
Villa de María de Río Seco	48,18	-1,49	46,72	-2,56	32,70	6,63

Conclusiones

Los resultados encontrados en este estudio, muestran que la precipitación estimada a partir de información satelital reproduce adecuadamente la información meteorológica registrada con pluviómetros del SMN en la provincia de Córdoba. Los errores espaciotemporales de los distintos productos IMERG fueron identificados y cuantificados en este estudio.

Dentro de los productos IMERG el que presenta el mejor desempeño es el final, por lo cual si es posible esperar el período de latencia, se recomienda su empleo. El ajuste

mejora cuando la integración temporal pasa de valores diarios a decadales y mensuales. Los errores disminuyen en la región sudeste de Córdoba donde las precipitaciones son mayores.

Por último podemos afirmar que las subestimaciones o sobreestimaciones no significativas indican la capacidad de los tres productos IMERG para reproducir la distribución de la lluvia y por lo tanto la aplicabilidad potencial de GPM en gestión del agua para la agricultura y ser utilizada por productores y decisores para ajustar las prácticas agrícolas en lugares sin registros pluviométricos.

Es necesario continuar y extender este trabajo a fin de desarrollar un procedimiento que permita corregir los valores de GPM y así mejorar los estadísticos de ajuste y conjuntamente incrementar la capacidad de identificar y cuantificar eventos extremos.

Agradecimientos

Al Servicio Meteorológico Nacional por la información meteorológica de las estaciones consideradas en este estudio.

A los científicos de la misión MODIS y el personal asociado de NASA por la producción de los datos usados en esta investigación.

Al convenio INTA - AUDEAS – CONADEV, en el marco del Proyecto CIAC 940182.

Referencias

1. Bano, I. and Arshad, M. Climatic Changes Impacton Water Availability (Chapter 2). M. Arshad (ed.), Perspectives on Water Usage for Biofuels Production, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66408-8_2. (2018).
2. Boluwade, A., Stadnyk, T., Fortin, V. and Roy, G. Assimilation of precipitation Estimates from the Integrated Multisatellite Retrievals for GPM (IMERG, early Run) in the Canadian Precipitation Analysis (CaPA). *Journal of Hydrology: Regional Studies* 14, 10-22. (2017).
3. Ulloa, J., Ballari, D., Campozano, L. and Samaniego, E. Two-step down scaling of Trmm 3b43 V7 precipitation in contrasting climatic regions with sparse monitoring: The case of Ecuador in Tropical South America. *Remote Sensing* 9(7), 758. (2017).
4. Hou, A., Kakar, R., Neeck, S., Azarbarzin, A., Kummerow, C., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K. and Iguchi, T. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(5), 701-722. (2014).
5. Chen, F. and Li, X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over mainland China. *Remote Sensing* 8(6), 472. (2016).
6. Sungmin, O., Foelsche, U., Kirchengast, G., Fuchsberger, J., Jackson, T. and Petersen, W. A. Evaluation of GPM IMERG Early, Late, and Final rainfall estimates using Wegener Net gauge data in southeastern Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(12), 6559-6572.(2017).
7. Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Nelkin, E. J. and Xie, P. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4.5. NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG). (2015).

- https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V5.1b.pdf (Consultado: 19 de marzo 2018).
8. de la Casa, A. and Nasello, O. Tendencias parciales de los días de lluvia y la intensidad media anual en la Provincia de Córdoba, Argentina. *Meteorológica* 37(2), 67-77. (2012).
 9. Sánchez, C. Caracterización del territorio Noroeste de la provincia de Córdoba. 1ª ed. Manfredi, Córdoba (AR): Ediciones INTA. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi, 49 p. (2013). https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_caracterizacion_territorio_noroeste_crdoaba.pdf (Consultado: 19 de marzo 2018).
 10. Schneider, U., Fuchs, T., Meyer-Christoffer, A. and Rudolf, B. Global precipitation analysis products of the GPCC. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet Publikation, 112. (2008). http://www.mapcruzin.com/environmental-shapefile-maps/water/precipitation/GPCC_intro_products_2008.pdf (Consultado: 19 de marzo 2018).
 11. Tan, M. L. and Duan, Z. Assessment of GPM and TRMM precipitation products over Singapore. *Remote Sensing* 9(7), 720. (2017).
 12. Tang, G., Zeng, Z., Long, D., Guo, X., Yong, B., Zhang, W. and Hong, Y. Statistical and hydrological comparisons between TRMM and GPM level-3 products over a midlatitude basin: Is day-1 IMERG a good successor for TMPA 3B42V7? *Journal of Hydrometeorology* 17(1), 121-137. (2016).
 13. Rios Gaona, M. F., Overeem, A., Leijnse, H. and Uijlenhoet, R. First-year evaluation of GPM rainfall over the Netherlands: IMERG day 1 final run (V03D). *Journal of Hydrometeorology* 17(11), 2799-2814. (2016).
 14. Huffman, G.J., Adler, R.F., Arkin, P., Chang, A., Ferraro, R., Gruber, A. and Schneider, U. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 78(1), 5-20. (1997).
 15. Franchito, S. H., Rao, V. B., Vasques, A. C., Santo, C. M. and Conforte, J. C. Validation of TRMM precipitation radar monthly rainfall estimates over Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D2). (2009).