

Evaluación del desempeño de productos satelitales para estimar evapotranspiración en la región pampeana (Argentina)

Miguel Nolasco¹, Silvina Sayago¹, Gustavo Ovando¹, Yanina Bellini², María Laura Belmonte², 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 evapotranspiración es una variable de importancia, después de la precipitación, por sus efectos en los ciclos hidrológicos. Su cuantificación es necesaria por su dependencia, en el área agrícola, del tipo de uso y humedad del suelo. La teledetección se constituye en una alternativa importante para estimar evapotranspiración en diferentes escalas espaciotemporales. El objetivo de este estudio fue evaluar la concordancia entre evapotranspiración proveniente de MOD16 y registros de estaciones meteorológicas de INTA, para la región pampeana (2007- 2017) y desarrollar un modelo lineal de ajuste para uso a nivel regional. Los resultados muestran que la evapotranspiración de MOD16 reproduce adecuadamente la registrada en su evolución temporal. Se obtuvieron coeficientes de ajuste $R^2 = 0,84/0,77/0,83$, cuando se agrupó la evapotranspiración registrada cada 8 días (para concordancia con los datos satelitales) usando promedio/máximo/mediana respectivamente. Una vez aplicado el modelo se determinaron $R^2 = 0,90$ y RECM entre 0,53 y 1,09 mm/d.

Palabras clave: MODIS, validación, evapotranspiración, La Pampa, Córdoba, Buenos Aires.

1 Introducción

La evapotranspiración es el proceso conjunto entre la evaporación del suelo y la transpiración de los vegetales, y es uno de los principales componentes de los ciclos hidrológicos. En una escala global, más del 80% de la precipitación terrestre es agua transferida a la atmósfera a través de la evapotranspiración. Como se expresa en [1] esta variable juega un rol importante en hidrología, agricultura, climatología y ecología, entre otras.

En lotes agrícolas la cantidad de agua evapotranspirada depende del cultivo realizado, el tipo de suelo y el contenido de humedad en el mismo. La heterogeneidad de condiciones hace que la estimación precisa de la evapotranspiración sea necesaria; como se señala en [2] su relación directa con el dióxido de carbono asimilado en las plantas, hace de ella una variable importante para monitorear y estimar rendimiento y biomasa de los cultivos.

Por otra parte, la evapotranspiración es una variable necesaria como input en los modelos de cultivo, entre ellos podemos citar el CERES-Wheat, el CropSyst, el WOFOST, etc. [3].

Por las consideraciones anteriores, es necesario la determinación precisa en tiempo y lugar de la evapotranspiración, y en particular de la evapotranspiración potencial (ETP), pues su cantidad y tasa de evolución es altamente variable espacio-temporalmente. Como señalan [4] y [5] la evapotranspiración potencial está afectada por la radiación solar, velocidad del viento, temperatura del aire, entre otros. Esta variable, que en las primeras definiciones se obtenía a partir de una expresión matemática, se puede medir en forma directa utilizando lisímetros, estaciones de relación de balance de energía y torres de torbellinos (Eddy Covariance), u obtener en forma indirecta a partir de modelos semi-empíricos o aplicando modelos de simulación de cultivos. Los métodos directos, además de costosos no siempre están disponibles [6].

En las últimas décadas, los datos provenientes del uso de teledetección o bien la combinación de éstos a partir de un algoritmo o modelo, se pueden utilizar para estimar la ET en una variedad de escalas espaciales y temporales [7], [8]. Los datos de esta variable se pueden obtener de numerosos sensores remotos, entre otros Landsat ETM (Enhanced Thematic Mapper), MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer), ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) y AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)[8]. Dentro de éstos, uno de los más usados es el Producto de Evapotranspiración Terrestre Global (MOD16) de MODIS, que genera el producto a partir de los insumos: tipo de cobertura del suelo MODIS, índice de área foliar y los productos de albedo [9].

La performance del producto MOD16 para estimar ETP ha sido validada para diferentes ecosistemas en EEUU [10]. En [4] se compararon los valores del producto MOD16, con los generados por los sistemas de Eddy Covariance en cinco localidades del noroeste de México, sobre áreas con cultivo de trigo y presencia de arbustos. El producto MOD16 también fue validado por [11] en áreas de humedales costeros del delta del río Liaohe (China), para las distintas estaciones del año. Para la sabana y el sector arbolado del Parque Nacional Kruger en Sudáfrica, [12] encontraron en la estimación de la ETP, a partir de este producto, errores que atribuyeron a influencias de precipitación y a la falta de datos en periodos importantes.

La región pampeana argentina, que incluye las provincias de Buenos Aires, La Pampa y Córdoba, es la principal área agropecuaria del país. Los cultivos predominantes son maíz, soja, trigo y girasol. Estas tres provincias contribuyeron con el 63%, 62,7%, 67,2% y 64,5%, de la producción nacional de maíz, soja, trigo y girasol, respectivamente en la campaña productiva 2017/18[13]. El consumo de agua de estos cultivos es dependiente del valor de evapotranspiración potencial a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo.

El objetivo de este estudio fue evaluar la correlación entre los datos de evapotranspiración potencial, provenientes de MOD16 y los registrados en distintas estaciones meteorológicas, para estimar esta variable en la región agrícola pampeana de Argentina.

En particular, se pretende desarrollar un modelo para ajustar los valores de ETP provistos por el satélite a fin de extender su uso en localidades de la región donde no se cuenta con estaciones meteorológicas.

2 Materiales y Métodos

2.1 Región de estudio

La región pampeana es la principal área agrícola de Argentina. Está localizada en la parte centro-este y comprende las provincias de Córdoba, Buenos Aires, La Pampa, Santa Fe y Entre Ríos. Se caracteriza por presentar un clima templado y un régimen de precipitación monzónico, dado que las lluvias se concentran en el semestre cálido (de octubre a marzo). Esta región recibe, primordialmente, vientos del este, con un gradiente de humedad decreciente hacia el oeste [14]. En esta zona, una importante superficie es destinada a la producción de cereales y oleaginosas, principalmente maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), sorgo (*Sorghum* spp.), soja (*Glycine max* (L.) Merr.) y girasol (*Helianthus annuus* L.) [15].

2.2 Datos de Evapotranspiración Potencial

Se utilizaron en este trabajo datos de evapotranspiración potencial diaria provenientes de registros de la red de estaciones meteorológicas de INTA. Fueron seleccionadas 6 estaciones, dos ubicadas en la provincia de Córdoba, dos en La Pampa y otras dos en Buenos Aires (Tabla 1 y Fig. 1). En todas las estaciones el método de estimación de la evapotranspiración utilizado fue el de Penman-Monteith.

Tabla 1. Estaciones Meteorológicas en la Región Pampeana: ubicación geográfica

Id	Localidad (Provincia)	Ubicación	Altitud (msnm)
(1)	Anguil (La Pampa)	36°30'S 63°58'O	152
(2)	Balcarce (Bs. As.)	37°45'S 58°18'O	97
(3)	Gral. Pico (La Pampa)	35°42'S 63°50'O	143
(4)	Manfredi (Córdoba)	31°51'S 63°44'O	296
(5)	Marcos Juárez (Córdoba)	32°41'S 62°07'O	112
(6)	Pergamino (Bs. As.)	33°56'S 60°33'O	56

En la Fig. 1 se puede observar que las estaciones consideradas cubren, con su ubicación, distintas zonas agropecuarias de la región pampeana, y en la Tabla 1 que las mismas se encuentran en diferentes altitudes. Estas localidades son representativas de las condiciones agroclimáticas de cada provincia, y poseen datos de evapotranspiración para el período 2007- 2017. La amplitud del período seleccionado permite abarcar años climáticamente muy diversos, ya que coexisten años húmedos (2012 o 2014) con otros secos (2008 o 2009), así la década considerada permitirá fortalecer el análisis de los resultados.

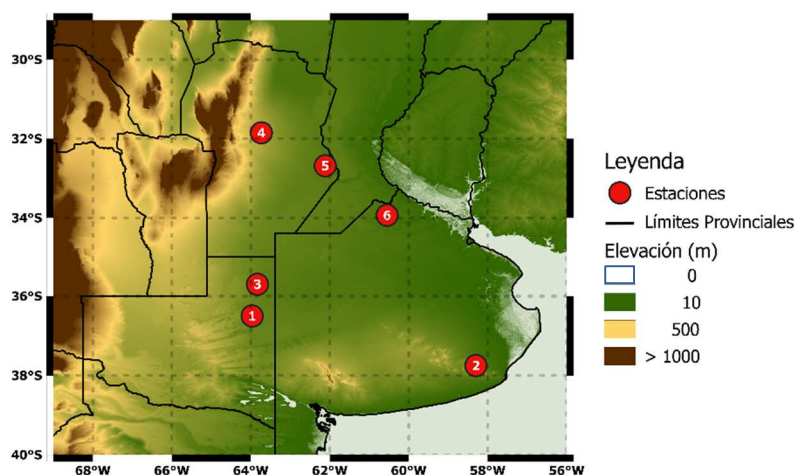


Fig. 1. Estaciones meteorológicas de la región pampeana consideradas en este estudio.

En el presente trabajo los datos diarios de ETP registrados se agruparon de forma de obtener un dato representativo de los ocho días y con el fin de su comparación con los datos de MOD16. Para el agrupamiento se consideraron tres opciones: (A)- Promedio de datos, (B)- Máxima ETP y (C)- Mediana, resultando 506 valores para la década que abarca el estudio. En la Tabla 2 se pueden observar el número de datos disponibles de ETP registrados para cada estación.

2.2 Imágenes MODIS

En este estudio se utilizaron datos de evapotranspiración obtenidos del producto MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/modis>). Este producto se encuentra disponible en forma gratuita para el período 2000-2019, e incluye evapotranspiración real y potencial calculado integrando información de 8 días y una resolución espacial de 500 m.

El algoritmo utilizado para calcular la ETP fue propuesto por [16] y la obtiene utilizando datos meteorológicos globales (temperatura diaria del aire, humedad relativa, radiación neta, velocidad del viento), el índice de área foliar, la fracción de cobertura vegetal, el albedo y el tipo de cobertura terrestre.

Los valores de ETP para el período 2007-2017 fueron extraídos de los píxeles que correspondían a las coordenadas geográficas de cada estación, considerándose sólo aquellos datos que presentaban en la banda de control de calidad un indicador igual a 0 (que MODIS considera como de buena calidad). En la Tabla 2 se pueden observar el número de datos disponibles de ETP proveniente del satélite.

Tabla 2. Número de datos de Evapotranspiración registrados y de MOD16 para Estaciones Meteorológicas consideradas en la Región Pampeana. Período 2007-2017

Id	Localidad	Datos Registrados*	Datos MODIS
(1)	Anguil (La Pampa)	501	373
(2)	Balcarce (Bs. As.)	489	430
(3)	Gral. Pico (La Pampa)	503	334
(4)	Manfredi (Córdoba)	497	352
(5)	Marcos Juárez (Córdoba)	464	375
(6)	Pergamino (Bs. As.)	491	346

* Para los datos registrados se consideró, por correspondencia con MODIS, períodos de 8 días como dato único.

2.3 Estadísticos de validación

Como el objetivo del trabajo fue evaluar el ajuste entre los datos de ETP provenientes del MOD16 con los datos registrados por las estaciones meteorológicas de INTA, en forma independiente, se calcularon los coeficientes de determinación (R^2), la raíz del error cuadrático medio y el porcentaje que representa (RECM- %RECM) y el sesgo (BIAS).

Valores de BIAS y RECM cercanos a cero significan que MOD16 estima ETP con mucha exactitud con respecto a la registrada. Un valor negativo del BIAS significa una subestimación, mientras que un valor positivo da cuenta de una sobreestimación de los valores modelados por el satélite.

3 Resultados y discusión

Los valores de ETP diaria y los obtenidos de MOD16, para cada una de las estaciones consideradas y todo el período de tiempo que abarca el presente trabajo, se presentan en la Fig. 2 (1-6).

Si bien la evolución temporal de los datos de ambas fuentes se reproduce muy bien para todas las estaciones, se encontraron diferencias entre los valores de la ETP registrados y de MOD16, que pueden atribuirse a múltiples causas, posiblemente la parametrización del algoritmo de MODIS, las mediciones de la ETP en las distintas estaciones y/o a la escala espacial de las imágenes, que por unidad de píxel puede estar abarcando coberturas de suelo disímiles. Puede observarse en la Fig. 2 que en todas las estaciones el valor mínimo de la ETP es siempre sobreestimado por MOD16, mientras que el valor máximo se ajusta en la mayoría de los años en forma adecuada para todas las estaciones, con la excepción de Marcos Juárez. En esta última estación se presenta una sobreestimación de los datos de ETP máxima por el satélite para la mayoría de los años comprendidos en este estudio; en esta estación en 2014 no hubo registro de datos.

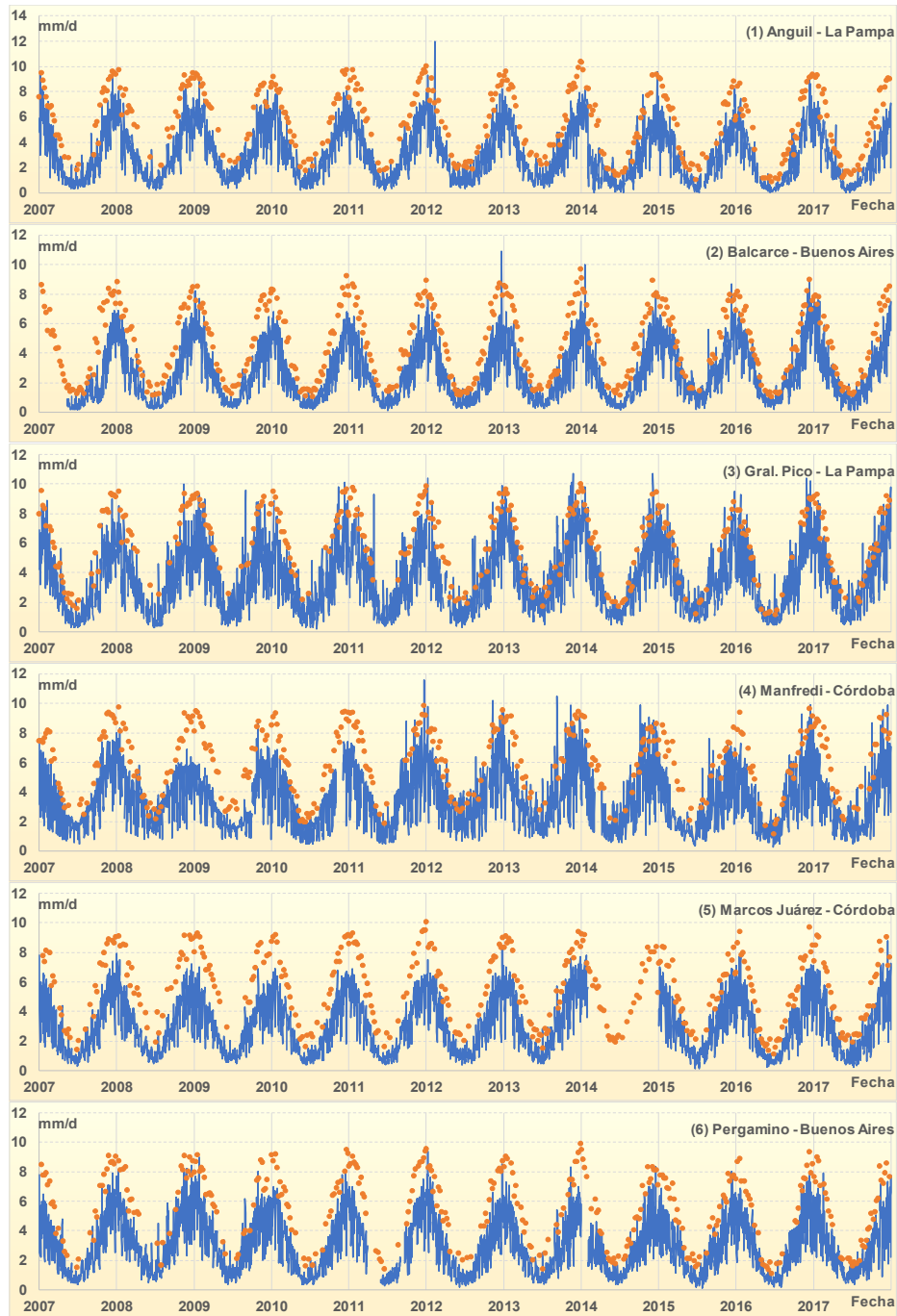
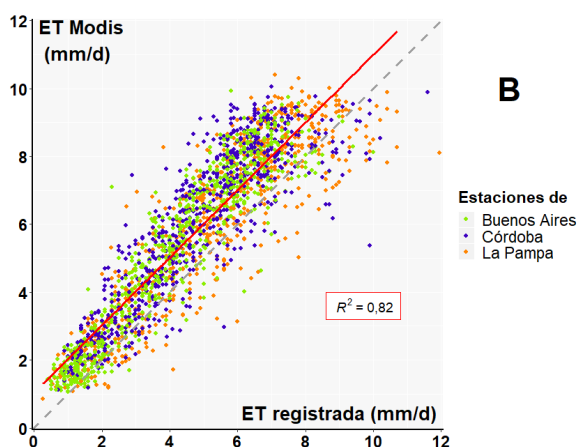
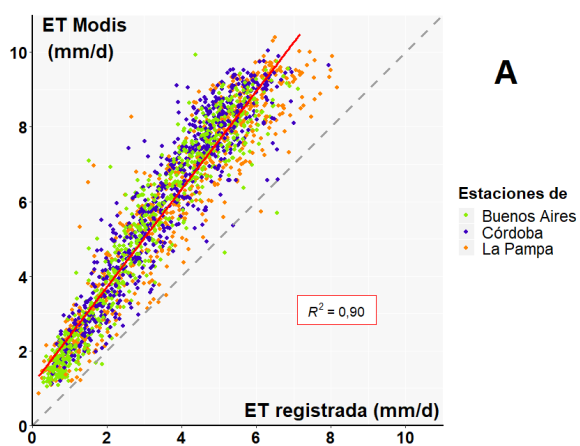


Fig. 2 (1-6). Evolución de la evapotranspiración registrada (|) y de MOD16 (•) para estaciones meteorológicas de la región pampeana consideradas en este estudio.

Considerando todas las estaciones de la región pampeana se presentan en la Fig. 3 los scatter plots que muestran la correlación entre la ETP proveniente de MOD16 y la registrada, agrupada según los tres criterios.

El análisis de las correlaciones permite inferir una óptima concordancia de los valores medidos y obtenidos de MOD16, obteniéndose los mejores coeficientes de determinación ($R^2 = 0,90$) cuando la ETP registrada se promedia cada 8 días (Fig. 3A); si bien se observa claramente la sobreestimación por parte de MOD16. Cuando se considera el valor máximo como representativo del periodo de 8 días (Fig. 3B) los valores de ETP se encuentran menos correlacionados ($R^2 = 0,82$), pero a su vez más próximos a la recta 1-1, lo cual indica menores valores de RECM. Agrupar la ETP de acuerdo a la mediana registrada, no mejora ninguno de los estadísticos de concordancia (Fig. 3C).



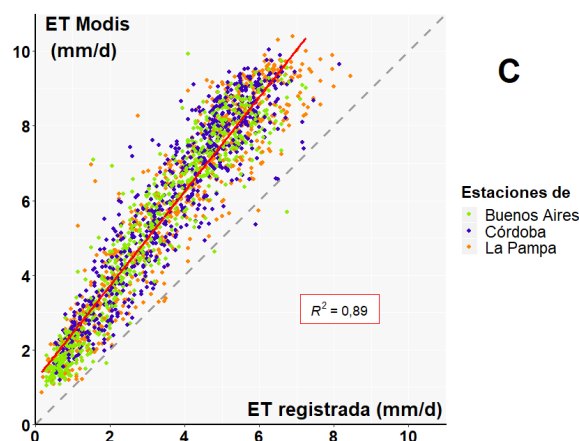


Fig. 3. Scatter Plots para evapotranspiración registrada (considerando ETP agrupadas cada 8 días como (A) promedio– (B) máximo y (C) mediana) y de MOD16, en las Estaciones Meteorológicas de la región pampeana para el período 2007-2017.

Como las distintas estaciones meteorológicas incluidas en este estudio presentan diferencias en el tipo de cobertura del suelo (pastura y/o cultivos), altitud geográfica, condiciones climáticas, etc. se realizó también un análisis estadístico para cada estación meteorológica en forma separada. La Tabla 3 muestra que los valores de R^2 son superiores o inferiores a los calculados para el conjunto completo de datos (Fig. 3), según cada criterio de agrupamiento. Por otra parte, los menores valores de RECM para todas las estaciones se presentan cuando se agrupan las ETP registradas considerando el valor máximo de los 8 días; lo cual confirma la sobreestimación sistemática de los valores mínimos, observado en la Fig. 2.

Tabla 3. Estadísticos de ajuste para evapotranspiración registrada (considerando las tres opciones de agrupamiento) y de MOD16, en las Estaciones Meteorológicas de la Región Pampeana para el período 2007-2017.

Localidad	ETP registrada					
	Promedio		Máxima		Mediana	
	R^2	RECM (mm/d)	R^2	RECM (mm/d)	R^2	RECM (mm/d)
Anguil (La Pampa)	0,93	2,52	0,86	1,59	0,93	2,49
Balcarce (Bs. As.)	0,91	2,08	0,89	1,29	0,91	2,04
Gral. Pico (La Pampa)	0,87	2,15	0,79	1,16	0,85	2,18
Manfredi (Córdoba)	0,82	2,55	0,69	1,58	0,81	2,45
Marcos Juárez (Córdoba)	0,94	2,55	0,89	1,66	0,94	2,45
Pergamino (Bs. As.)	0,93	2,45	0,87	1,44	0,92	2,37

Las estaciones que presentan los menores valores de coeficientes de determinación son General Pico y Manfredi. Éstos podrían estar relacionados con registros de ETP fuera del rango promedio (Fig. 2 (3-4)), ya sea valores muy altos en varios días de los

años 2012 a 2015 para Manfredi y en 2009, 2011 y 2012 para General Pico; o muy bajos en la estación de Manfredi (en los años 2009 y 2010).

Considerando las correlaciones obtenidas se propuso un ajuste a partir de un modelo lineal que permite la calibración para los datos de MOD16 con los registrados agrupados por promedio cada 8 días. Se obtuvo una función lineal $y = 0,76x - 0,83$, para toda la región incluida en el estudio.

Aplicando el modelo desarrollado a la evapotranspiración informada por el satélite, se calcularon los distintos estadísticos para todas las estaciones y el período considerado (Tabla 4).

Tabla 4. Estadísticos obtenidos entre evapotranspiración registrada (*) y de MODIS ajustadas con modelo lineal, en las Estaciones Meteorológicas de la región pampeana para el período 2007-2017.

Localidad	R ²	RECM mm/d	%RECM	BIAS mm/d
Anguil (La Pampa)	0,93	0,54	15,64	0,15
Balcarce (Bs. As.)	0,91	0,56	19,77	-0,09
Gral. Pico (La Pampa)	0,87	0,77	18,18	-0,38
Manfredi (Córdoba)	0,82	0,72	18,53	0,01
Marcos Juárez (Córdoba)	0,94	0,49	14,63	0,21
Pergamino (Bs. As.)	0,93	0,50	14,43	0,10

(*) Se consideró el promedio de datos registrados como criterio de agrupamiento

Una vez aplicado el modelo, los coeficientes de determinación entre ETP registrada y de MOD16 no varían (Tablas 3 y 4), mientras que el estadístico RECM muestra una importante disminución, mostrando como máximo error 0,8 mm/d. Es importante destacar además que el porcentaje de estos errores (desde 14,43 a 19,77%) indican que el modelo a escala regional permite un adecuado ajuste en cada estación/provincia. Los valores del BIAS muestran que el modelo lineal propuesto da como resultados una ETP con pequeñas subestimaciones para Gral. Pico (0,4 mm/d) y sobreestimación para Marcos Juárez (0,2 mm/d).

Para el noroeste de México, en [4] evaluaron la performance de MOD16 con la ETP medida en cinco sitios y agrupada con el criterio de promedio de los 8 días, para un período de tiempo de un año (entre 2004 y 2010). Los autores registraron valores promedios de ETP desde $0,57 \pm 0,25$ mm/d hasta $4,01 \pm 1,44$ mm/d y obtuvieron estadísticos de ajuste que variaron de 0,04 a 0,93 para R², mientras que para RECM informaron valores entre 0,26 y 1,85 mm/d.

En su evaluación de MOD16 para las regiones de Skukuza y Malopeni (Sudáfrica), [12] encontraron valores de BIAS entre 0,25 y 1,00 mm/d, para períodos de un año (entre 2000 y 2010) para la primera región y para únicamente el año 2009 en Malopeni, BIAS = 0,38 mm/d.

En la Fig. 4 se presenta el gráfico scatter plot que muestra para la región en su totalidad, la relación entre ETP de satélite ajustada y la registrada; en la figura puede observarse, a diferencia de la Fig. 3 A, que aplicar el modelo lineal para ajustar los datos de MOD16 los mismos se distribuyen con pendiente cercana a uno.

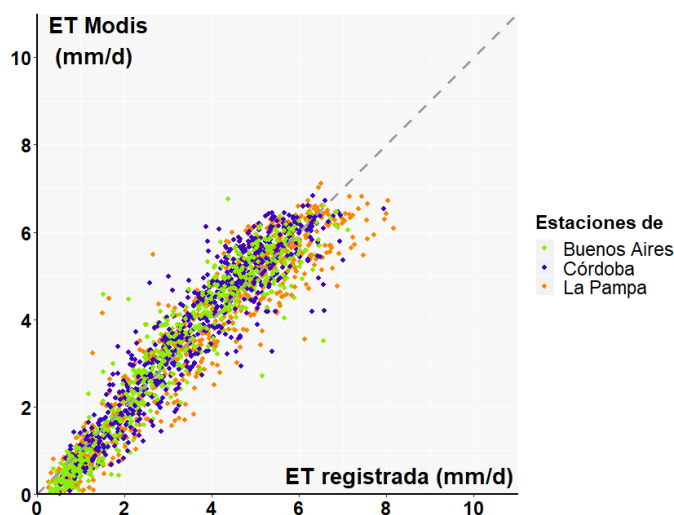


Fig. 4. Scatter Plots para evapotranspiración registrada (considerando ETP promediada cada 8 días) y ajustada por modelo lineal de MOD16, en las Estaciones Meteorológicas de la región pampeana para el período 2007-2017.

Conclusiones

Los resultados encontrados en este estudio, muestran que la evapotranspiración obtenida a partir de información de MOD16, reproduce adecuadamente la registrada en las estaciones meteorológicas de la región pampeana, aunque los valores mínimos del satélite siempre sobreestiman a los registrados.

Cuando se considera el promedio de la ETP registrada cada 8 días para compararlos con los datos del satélite se obtiene el mejor coeficiente de determinación para el ajuste ($R^2= 0,90$), aunque los valores de RECM se ubican entre 2,1 y 2,6 mm/d.

Por último, un modelo lineal de ajuste del producto MOD16 permite reproducir evapotranspiración con muy buen ajuste ($R^2= 0,90$ en promedio y RECM entre 0,5 y 0,8 mm/d), para la región considerada en este estudio. Los estadísticos obtenidos aseguran la aplicabilidad de esta fuente de datos para la toma de decisiones en agricultura como también para ser utilizada por investigadores como insumo de modelos de crecimiento de cultivos.

Agradecimientos

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

Referencias

1. Fisher, J., Melton, F., Middleton, E., Hain, C., Anderson, M., Allen, R., McCabe, M., Hook, S., Baldocchi, D. and Townsend, P., Kilic, A., Tu, K., Miralles, D., Perret, J., Lagouarde, J., Waliser, D., Purdy, A., French, A., Schimel, D., Famiglietti, J., Stephens, G. and Wood, E. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. *Water Resour. Res.* 53, 2618–2626. (2017).
2. Tadesse, T., Senay, G. B., Berhan, G., Regassa, T. and Beyene, S. Evaluating a satellite-based seasonal evapotranspiration product and identifying its relationship with other satellite-derived products and crop yield: a case study for Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 40, 39–54. (2015).
3. Castañeda-Vera, A., Leffelaar, P., Álvaro-Fuentes, J., Cantero-Martínez, C. and Mínguez, M. Selecting crop models for decision making in wheat insurance. *European Journal of Agronomy* 68, 97–116. (2015).
4. Aguilar, A., Flores, H., Crespo, G., Marín, M., Campos, I. and Calera, A. Performance assessment of MOD16 in evapotranspiration evaluation in Northwestern Mexico. *Water* 10(7), 901. (2018).
5. Zhang, K., Kimball, J. and Running, S. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *WIREs Water* 3, 834–853. (2016).
6. Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella, C. M. y Basualdo, A. Estimación de evapotranspiración real (ETR) y de evapotranspiración potencial (ETP) en el sudoeste bonaerense (Argentina) a partir de imágenes MODIS. *Revista de Teledetección* 48, 29–41. (2017).
7. Irmak, A., Allen, R., Kjaersgaard, J., Huntington, J., Kamble, B., Trezza, R. and Ratcliffe, I.
8. Wang, K. and Dickinson, R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Rev. Geophys.* 50(2). (2012).
9. Yang, Y., Long, D., Guan, H., Liang, W., Simmons, C. and Batelaan, O. Comparison of three dual-source remote sensing evapotranspiration models during the MUSOEXE-12 campaign: Revisit of model physics. *Water resources research* 51(5), 3145–3165. (2015).
10. Di, S., Li, Z., Tang, R., Wu, H., Tang, B. and Lu, J. Integrating two layers of soil moisture parameters into the MOD16 algorithm to improve evapotranspiration estimations. *Int. J. Remote Sens.* 36, 4953–4971. (2015).
11. Du, J. and Song, K. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) Using Flux Tower Data from Panjin Coastal Wetland, Northeast China. *Chinese geographical science* 28(3), 420–429. (2018).
12. Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A. and Dzikitani, S. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African savanna, South Africa. *Remote Sensing* 6(8), 7406–7423. (2014).
13. Secretaria de Agroindustria. Ministerio de Trabajo y Producción. Estimaciones Agrícolas. <http://datosestimaciones.magyp.gov.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones> (Consultado: 19 de febrero 2019).
14. Pérez, S., Sierra, E., Momo, F. and Massobrio, M. Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa region and their possible causes. *Climate* 3(1), 150–167. (2015).

15. Ferreras, L., Toresani, S., Faggioli, V. y Galarza C. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana argentina. *Spanish Journal of Soil Science* 5(3), 220–235. (2015).
16. Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment* 115(8), 1781–1800. (2011).