

# Calibración del producto de evapotranspiración potencial "MOD16A2" para la Región Pampeana Argentina

María Florencia Degano<sup>(1,2)</sup>, Raúl Eduardo Rivas<sup>(1,2)</sup>, Facundo Carmona<sup>(1,3)</sup>, Adán Faramiñán<sup>(1,3)</sup> y Paula Olivera Rodríguez<sup>(1,3)</sup>

(1) Instituto de Hidrología de Llanuras. CIC-CONICET-UNCPBA. Gral. Pinto 399, C.P. B7000GHG, Tandil, Buenos Aires, Argentina. mfdegano@ihlla.org.ar

(2) Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICPBA), Argentina

(3) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

## RESUMEN

La evapotranspiración (ET) es la variable hidrológica de mayor relevancia en la Región Pampeana Argentina (RPA), debido a que mediante este proceso se pierde gran parte del agua que ingresa como precipitación al sistema. Conocer la variabilidad espacial de la ET es esencial para introducirla en modelos hidrológicos. Una alternativa es el uso de productos de satélite. En trabajos previos se evaluó el producto MOD16A2 de ET potencial (ETp), comparándolo con datos *in situ* de veinticuatro estaciones distribuidas en la RPA para los años 2012, 2013 y 2014, con un total de 3094 pares de datos analizados, observándose una sobreestimación sistemática mayor al 50%, que podría ser atribuida al error en el término de radiación neta de la ecuación de ETp. Utilizando la misma base de datos, en este trabajo se corrigió el error sistemático encontrado del producto MOD16A2 por medio de una regresión lineal, usando el 60% de los pares de datos ETp(MOD16A2) de medidas *in situ* para calibrar el modelo y el 40% restante para su validación. Los resultados mostraron una disminución del error cuadrático medio de 2,4 a 0,6 mm día<sup>-1</sup> y el error medio absoluto de 2,2 a 0,5 mm día<sup>-1</sup>. Luego de la corrección, el producto MOD16A2 mejora significativamente. Se recomienda evaluar el método para grandes cuencas y en otras regiones del mundo para determinar si existen errores sistemáticos y eventualmente corregirlos siguiendo el procedimiento aquí propuesto.

Palabras clave: Calibración, Evapotranspiración potencial, Producto MOD16A2, Región Pampeana Argentina.

## ***Calibration of the potential evapotranspiration product "MOD16A2" for the Argentinian Pampas Region***

### ABSTRACT

*Evapotranspiration (ET) is the hydrological variable with the greatest relevance in the Argentina Pampas Region (APR), because through this process a large part of the water that enters as precipitation is lost from the system. Knowing the spatial variability of the ET is essential to be able to include it in hydrological models. An alternative is the use of satellite products. In previous papers, the MOD16A2 product of potential ET (ETp) was evaluated, comparing it with in situ data of twenty-four stations distributed in the APR in 2012, 2013 and 2014, with a total of 3,094 pairs of analyzed data, observing a higher over estimation of 50% throughout the period which could be attributed to the error in the term of net radiation in the ETp equation. Using the same database, in this paper the systematic error found in the MOD16A2 product was corrected by means of a linear regression, using 60% of the data pairs ETp (MOD16A2) of in situ data to calibrate the model and the remaining 40% for its validation. The results showed a decrease in the mean square error of 2.4 to 0.6 mm day<sup>-1</sup> and the mean absolute error of 2.2 to 0.5 mm day<sup>-1</sup>. After correction, the MOD16A2 product improves significantly and can be used for hydrological purposes at the basin scale. It is recommended for evaluating the method in large basins and in other regions of the world to determine if there are systematic errors, and eventually correct them following the procedure proposed here.*

*Keywords: Argentina Pampas Region, calibration, MOD16A2 product, potential evapotranspiration.*

## Introducción

Uno de los procesos más importantes del ciclo hidrológico es la evapotranspiración (ET). De hecho, este es el componente más significativo del balance hídrico después de la precipitación. La ET representa el agua removida desde el suelo y la vegetación hacia la atmósfera. Por tal motivo, la estimación de este parámetro es esencial en el estudio de los procesos hidrológicos (Marini *et al.*, 2017).

A través de teledetección se pueden determinar las distintas variables meteorológicas de manera indirecta, como es el caso de la ET. En la República Argentina, García *et al.* (2013) evaluaron estimaciones de ET basadas en el uso de productos satelitales derivados del sensor MODIS frente a mediciones directas de ET real (ET<sub>r</sub>) y estimaciones de ET potencial (ET<sub>p</sub>) a partir de información meteorológica registrada en superficie.

En la Región Pampeana Argentina (RPA), la ET tiene un importante impacto económico, ya que su estimación precisa permite reducir el costo de los proyectos de riego, evaluar la recarga de agua al acuífero y estimar la productividad de granos, entre otros. Por lo tanto, es un tema de investigación activa en áreas tales como la hidrología, la agricultura y la meteorología. Esto ha llevado al desarrollo de variados modelos empíricos que se pueden aplicar con datos de satélite (Ocampo, *et al.*, 2012, Rivas *et al.*, 2016, Silicani, 2015, Teuling *et al.*, 2009).

En este contexto, diversos autores estimaron la ET en esta región con datos satelitales. Di Bella *et al.* (2000) obtuvieron la ET<sub>r</sub> diaria utilizando una regresión múltiple a partir de medidas conjuntas de NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) y TS (*Temperatura Superficial*) adquiridas del satélite NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Carmona y Rivas (2011) estimaron la ET utilizando datos del sensor Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 5 para una parcela de pastura y soja, obteniendo errores de 0,98 y 1,40 mm día<sup>-1</sup> respectivamente.

Rivas *et al.* (2016) determinaron la ET con el producto de Rivas y Caselles (2004), utilizando datos de TS del producto MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*) MYD11A2, cuyos resultados obtenidos establecen que la ET en la RPA crece en sentido SO-NE para el verano, alcanzando valores de hasta 6,5±0,8 mm día<sup>-1</sup>. En los meses de otoño e invierno, observaron un marcado descenso de la ET en sentido SE-NO, llegando a valores de 0,5±0,8 mm día<sup>-1</sup>. Por su parte, Marini *et al.* (2017) calcularon ET con productos MODIS (TS y NDVI) y obtuvieron un R<sup>2</sup> de 0,69 con respecto a la ET derivada de datos meteorológicos.

Recientemente, Carmona *et al.* (2018) utilizaron datos de satélite CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) y estimaron la ET de referencia para la RPA, con un RMSE (*Root Mean Square Error*) de 0,8 a 1,1 mm día<sup>-1</sup>. Por otro lado, Walker *et al.* (2018) determinaron la ET con datos de sensores pasivos de

microondas (*Soil Moisture Active Passive-SMAP*) con un RMSE de 0,88 mm día<sup>-1</sup> y un R<sup>2</sup> superior a 0,8.

Entre los productos globales para determinar ET<sub>r</sub> y ET<sub>p</sub> con datos de satélite y de re-análisis, se destaca el MOD16A2 (colección 5) (Mu *et al.*, 2013), logrado con datos del sensor MODIS a bordo del satélite EOS-Terra (*Earth Observation System-Terra*) e información meteorológica diaria proveniente de MERRA GMAO (*Modern Era Retrospective-analysis of Research and Applications of Global Modelling and Assimilation Office*).

Durante los últimos años, varios autores evaluaron el rendimiento del producto MOD16A2 en diferentes partes del planeta y los resultados indicaron que la fiabilidad del mismo no es lo suficientemente robusta como para predecir la demanda máxima de agua desde la atmósfera. Como explican Autovino *et al.* (2016), las razones del mal desempeño del producto MOD16A2 se relacionan principalmente con la variabilidad espacial de los datos de entrada requeridos por el algoritmo, que generalmente necesitan validación específica del sitio, así como mejorar el producto MODIS a nivel global usando datos meteorológicos de mejor calidad, entre otras razones relacionadas con los modelos asumidos al momento de analizar el proceso de evapotranspiración (Barraza Bernardas, 2014, Ramoelo *et al.*, 2014, Kim *et al.*, 2012, Ruhoff *et al.*, 2013).

Degano (2017) y Degano *et al.* (2018) evaluaron cuantitativamente la bondad del producto MOD16A2 en relación a los datos locales de la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) en la RPA mediante el uso de estadísticos básicos, determinando una sobreestimación sistemática mayor al 50% por parte del producto MOD16A2. En este sentido, el objetivo de este trabajo es corregir el error sistemático encontrado en el producto MOD16A2 por medio de una regresión lineal, para su correcto uso con fines hidrológicos, y conformar un método para ser ensayado en circunstancias distintas.

## Área de estudio

La RPA comprende una extensa planicie ubicada en el centro-este de la República Argentina, en las cinco provincias agrícolas: la mitad austral de Entre Ríos, Sudeste de Córdoba y Sur de Santa Fe, Este de La Pampa y gran parte de la provincia de Buenos Aires, exceptuando el extremo Sur (Matteucci, 2012) (Figura 1). Como indica Pereyra (2003), la RPA se subdivide en 12 ecorregiones: Planicies poligenéticas de Entre Ríos (D25), Pampa pedemontana cordobesa (D26), Pampa arenosa (D27), Pampa endorreica (D28), Delta del Paraná (D29), Pampa Ondulada (D30), Pampa Deprimida (D31), Planicies litorales pampeanas (D32), Sierras Septentrionales Bonaerenses (D33), Pampa Interserrana (D34), Sierras Australes Bonaerenses (D35) y Planicies poligenéticas de La Pampa (D36). Abarca una superficie aproximada de 520000 km<sup>2</sup>, con más de diez cuencas hidrográficas. Para la realización de este trabajo se tomaron veinticuatro estaciones repartidas en la región (Figura 1 y Tabla 1).

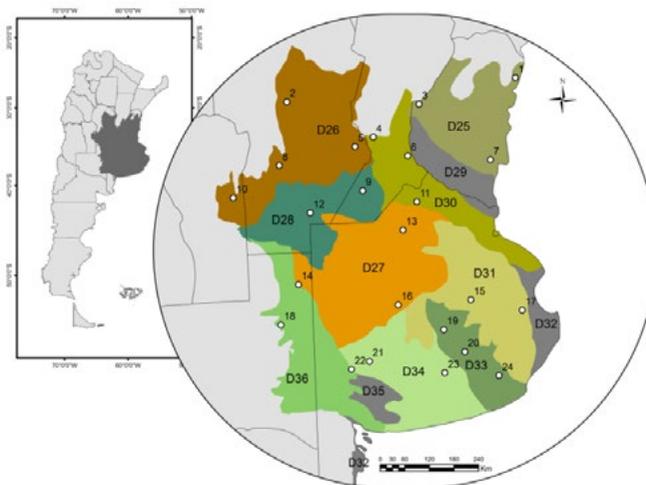
ID	Estación	Latitud	Longitud	Ecorregión
1	Concordia	-31,18	-58,01	D25
2	Pilar	-31,67	-63,88	D26
3	Paraná	-31,78	-60,48	D25
4	El Trébol	-32,5	-61,67	D30
5	Marcos Juárez	-32,7	-62,15	D26
6	Rosario	-32,92	-60,78	D30
7	Gualeguaychú	-33	-58,62	D25
8	Río Cuarto	-33,07	-64,14	D26
9	Venado Tuerto	-33,67	-61,97	D28
10	Villa Reynolds	-33,73	-65,38	D26
11	Pergamino	-33,93	-60,55	D30
12	Laboulaye	-34,13	-63,37	D28
13	Junín	-34,55	-60,92	D27
14	General Pico	-35,7	-63,75	D36
15	Las Flores	-36,09	-59,1	D31
16	Bolívar	-36,2	-61,07	D27
17	Dolores	-36,3	-57,7	D31
18	Santa Rosa	-36,57	-64,27	D36
19	Azul	-36,75	-59,83	D33
20	Tandil	-37,23	-59,25	D33
21	Coronel Suárez	-37,43	-61,88	D34
22	Pigüé	-37,6	-62,38	D34
23	Benito Juárez	-37,7	-59,8	D34
24	Balcarce	-37,75	-58,3	D33

**Tabla 1.** Identificador, estación y coordenadas de cada ecorregión (Carmona *et al.*, 2018).

**Table 1.** Number, station names and coordinates of each eco-region (Carmona *et al.*, 2018).

Por su extensión, la RPA constituye el más importante ecosistema de praderas de la República Argentina (Matteucci, 2012). Alrededor del 60-70% de la superficie pampeana se encuadra en las características de Pampa subhúmeda-húmeda y la superficie restante en la de Pampa semiárida (suroeste de Córdoba, San Luis y La Pampa). El clima pampeano está determinado por dos centros permanentes de alta presión: el anticiclón subtropical Atlántico, que produce vientos cálidos y húmedos que ingresan por el norte y noreste, y el anticiclón subtropical Pacífico, con vientos fríos y secos que llegan por el oeste y sudoeste. Otro sistema que contribuye es la Sudestada, con vientos fríos y húmedos (Aliaga *et al.*, 2017).

Las precipitaciones anuales se encuentran entre máximos de 1200 mm en el Noreste y mínimos de 600 mm en el Suroeste. La temperatura media anual máxima en el Sur ronda los 16°C y en el Norte los



**Figura 1.** Región Pampeana Argentina, ecorregiones (en diferentes colores) y la distribución espacial de las estaciones (puntos blancos) (Carmona *et al.*, 2018).

**Figure 1.** Argentinian Pampas Region, eco-regions (in different colours) and the spatial distribution of the meteorological stations (white points) (Carmona *et al.*, 2018).

18°C; la mínima media anual se encuentra entre los 6 y 14°C. Las temperaturas decrecen en sentido Norte-Sur, con una amplitud de 15°C en el Oeste y 12°C en el Este. Las precipitaciones en el Norte decrecen en sentido Este-Oeste y en el Sur, desde el Norte al Sur. La humedad relativa promedio varía entre un 60 y 70% (Matteucci, 2012).

## Materiales y métodos

### Datos de la ORA

El producto de ET<sub>p</sub> MOD16A2 se relacionó con estimaciones de ET<sub>0</sub> (en este trabajo se toman como sinónimos debido a que las estaciones están ubicadas en sectores con pasto corto) realizadas por la ORA (ORA, 2018), perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina para las veinticuatro estaciones correspondientes a nueve ecorregiones de la RPA (Tabla 1). En la ORA calculan la ET<sub>0</sub> utilizando información que les brinda el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN, 2018) de variables biofísicas medidas *in situ* (Precipitación, Temperatura máxima y mínima, Humedad Relativa, Velocidad de viento, Heliofanía o nubosidad) y se basan en el método de FAO-Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998, Monteith y Unsworth, 1990), que se muestra en la Ec. 1.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (RN-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

donde 0,408 es el factor de conversión a mm día<sup>-1</sup>; Δ [kPa °C<sup>-1</sup>] es la pendiente de la curva de presión de

saturación de vapor;  $RN$  es la radiación neta [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ];  $G$  es el flujo de calor en el suelo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ];  $\gamma$  es la constante psicrométrica [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ]; 900 es el coeficiente para el cultivo de referencia [ $\text{kJ}^{-1} \text{ Kg K día}^{-1}$ ],  $T$  es la temperatura media diaria del aire a 2 m de altura [ $^\circ\text{C}$ ], 273 es un valor de conversión para expresar la  $T$  en  $K$ ,  $u_2$  es la velocidad de viento [ $\text{m s}^{-1}$ ],  $e_s$  es la presión de vapor del aire [ $\text{kPa}$ ],  $e_a$  es la presión de saturación de vapor [ $\text{kPa}$ ],  $(e_s - e_a)$  es el déficit de presión de vapor (VPD) [ $\text{kPa}$ ] y 0,34 es un coeficiente resultante de asumir una resistencia al cultivo de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y una resistencia aerodinámica de  $208/u_2 \text{ s m}^{-1}$  para el cultivo de referencia.

El método combinado FAO Penman-Monteith se desarrolló haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura que se asume de 0,12 m, una emisividad de 0,98, una resistencia superficial de  $70 \text{ s m}^{-1}$  y un albedo de 0,23, representando la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. Este método reduce las imprecisiones de métodos previos y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos. Los detalles del método y cálculos se explican en el Manual de la FAO N° 56 (Allen *et al.*, 1998).

En el contexto de ETp, las condiciones de humedad del suelo no intervienen, pero sí las características atmosféricas, que son ampliamente representadas por los datos de las estaciones meteorológicas que, de acuerdo a la Guía de prácticas hidrológicas de la Organización Meteorológica Mundial (1994), abarcan 127 km de radio para una zona llana. Esto último garantiza la representatividad espacial de las variables atmosféricas y facilita la comparación de los datos locales con las estimaciones logradas desde satélite.

### Datos de satélite MOD16A2

El producto del satélite MOD16A2 (colección 5) es provisto por la Universidad de Montana (2017) y está compuesto por cinco bandas, de las cuales dos son de ET (real y potencial, en mm en 8 días), otras dos de calor latente (real y potencial, en  $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$  en 8 días) y por último la banda de calidad. Posee una resolución espacial de  $1 \text{ km}^2$  y temporal de 8 días y se encuentra a escala global (Mu *et al.*, 2013).

En el algoritmo MOD16A2, la ETp (Ec. 2) se calcula como la sumatoria de la ET del dosel húmedo (agua de lluvia interceptada por el dosel de las plantas antes de que alcance el suelo,  $\lambda ET_{wet_c}$  Ec. 3), la transpiración a través de estomas en las hojas y tallos de las plantas ( $\lambda ET_{POT_{trans}}$  Ec. 4), la evaporación del suelo húmedo ( $\lambda ET_{wet_{soil}}$  Ec. 5) y la evaporación potencial del suelo ( $\lambda ET_{soil_{POT}}$  Ec. 6), según Mu *et al.* (2013).

$$T_p = \lambda ET_{wet_c} + \lambda ET_{POT_{trans}} + \lambda ET_{wet_{soil}} + \lambda ET_{soil_{POT}} \quad (2)$$

$$\lambda ET_{wet_c} = \frac{(\Delta RN_c + \rho C_p F_c \frac{VPD}{r_{hr c}}) F_{wet}}{\Delta + \frac{\rho C_p r_{vc}}{\lambda \epsilon r_{hr c}}} \quad (3)$$

$$\lambda ET_{POT_{trans}} = \frac{1,26 \Delta RN_c (1 - F_{wet})}{\Delta + \gamma} \quad (4)$$

$$\lambda ET_{wet_{soil}} = \frac{(\Delta RN_{soil} + \rho C_p (1 - F_c) \frac{VPD}{r_{as}}) F_{wet}}{\Delta + \gamma \frac{r_{tot}}{r_{as}}} \quad (5)$$

$$\lambda ET_{soil_{POT}} = \frac{(\Delta RN_{soil} + \rho C_p (1 - F_c) \frac{VPD}{r_{as}}) (1 - F_{wet})}{\Delta + \frac{r_{tot}}{r_{as}}} \quad (6)$$

donde la variable  $\lambda$  es el calor latente de vaporización,  $RN_c$  es la radiación neta de la cobertura [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ],  $\rho$  es la densidad del aire [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $F_c$  es la fracción de cobertura vegetal,  $r_{hr c}$  es la resistencia aerodinámica [ $\text{s m}^{-1}$ ],  $F_{wet}$  es la fracción de cobertura del agua,  $r_{vc}$  es la resistencia del dosel húmedo [ $\text{s m}^{-1}$ ], 1,26 es el coeficiente de Priestley y Taylor,  $RN_{soil}$  es la radiación neta del suelo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ],  $r_{as}$  es la resistencia aerodinámica de la superficie del suelo [ $\text{s m}^{-1}$ ] y  $r_{tot}$  es la resistencia aerodinámica total al transporte de vapor [ $\text{s m}^{-1}$ ].

Se utiliza información meteorológica diaria obtenida a partir de datos de re-análisis como variables de entrada provenientes de MERRA GMAO y productos provistos por el sensor MODIS de 8 días para el cálculo espacial diario de ET, que incluyen la colección 4 de MODIS global de  $1 \text{ km}^2$ , con cobertura terrestre de tipo 2 (MOD12Q1), la colección 5 MODIS global  $1 \text{ km}^2$  LAI/FPAR (*Leaf Area Index and Fraction of Photosynthetically Active Radiation* - MOD15A2) y la colección 5 global  $1 \text{ km}^2$  de albedo (banda 10 de MCD43B2/MCD43B3). La temperatura diaria del aire, datos sobre el déficit de presión de vapor, la humedad relativa, y el producto LAI de MODIS se utilizan para estimar la conductancia superficial, la resistencia aerodinámica, la capa húmeda y el flujo de calor del suelo, en conjunto con otras variables ambientales clave.

De acuerdo a las características de la RPA (humedad relativa ~60-70%, lo que equivale a  $F_{wet}=0$  y a  $F_c=1$ ), las ecuaciones (3) y (5) no contribuyen al cálculo de la  $\lambda ET_{pot}$ . En cuanto a la Ec. 6, el término  $RN_{soil}$  se calcula según la Ec. (7):

$$RN_{soil} = (1 - F_c) RN - G \quad (7)$$

donde  $F_c=1$  y  $G$  (flujo de calor sensible del suelo, [ $\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ ]) tiende a cero para la resolución de 8

días, el término  $\lambda ET_{soil\_POT}$  de la Ec. 6 queda cancelado. Por lo que la  $\lambda ET_{pot}$  es equivalente al cálculo de la Ec. 4, donde  $RN_c$  es equivalente a la Ec. (8):

$$RN_c = F_c RN_{MOD16} \quad (8)$$

donde  $RN_{MOD16}$  es calculado según la Ec. (9):

$$RN_{MOD16} = (1 - \alpha)Rs_{\downarrow} + (\varepsilon_a - \varepsilon_s)\sigma(273,15 + T)^4 \quad (9)$$

donde  $\alpha$  es el producto MODIS de albedo de superficie (MCD43B2/MCD43B3),  $Rs_{\downarrow}$  es la radiación solar entrante de onda corta obtenida de re-análisis (MERRA GMAO),  $\varepsilon_a$  es la emisividad atmosférica efectiva y se calcula según la Ec. (10) (Idso y Shackson, 1969),  $\varepsilon_s$  es la emisividad de superficie y equivale a 0,97,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzman cuyo valor es de  $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$  y  $T$  es la temperatura del aire [°C]. Dicho esto, la ecuación para el cálculo de la  $RN_{MOD16}$  se expresa según la Ec. (11).

$$\varepsilon_a = \left[ 1 - 0,26 \exp^{-7,77 \cdot 10^{-4} T^2} \right] \quad (10)$$

$$RN_{MOD16} = (1 - \alpha)Rs_{\downarrow} + \left[ \left( \left[ 1 - 0,26 \exp^{-7,77 \cdot 10^{-4} T^2} \right] - 0,97 \right) \sigma (273,15 + T)^4 \right] \quad (11)$$

donde el término

$$\left[ \left( \left[ 1 - 0,26 \exp^{-7,77 \cdot 10^{-4} T^2} \right] - 0,97 \right) \sigma (273,15 + T)^4 \right]$$

corresponde a la radiación de entrante de onda larga  $RI_{\downarrow}$ .

### Procesamiento de los datos y análisis estadístico

Degano (2017) y Degano *et al.* (2018) evaluaron el producto MOD16A2 de ETp, comparándolo con datos de  $ET_0$  de la ORA en veinticuatro estaciones de la RPA para los años 2012, 2013 y 2014. Notaron la existencia de errores sistemáticos del orden del 50 % en el valor de ETp. Por lo tanto, es necesario realizar un ajuste previo a la aplicación del producto MOD16A2.

Para la corrección del modelo se utilizaron 3094 pares de datos ( $ETp(MOD16) - ET_0(ORA)$ ) distribuidos en toda la RPA en el periodo 2012-2014, de los cuales se tomó el 60% del total (1856 datos) para obtener los parámetros de calibración (a-pendiente y b-ordenada del origen) y el 40% restante (1238 datos) para validar el producto.

Luego de aplicar la corrección al modelo, se realizó un análisis estadístico calculando el RMSE (error cuadrático medio), MBE (sesgo), MAE (*Median Absolute Error*), a, b,  $R^2$  (coeficiente de determinación),  $a^*$  (pendiente forzada al origen) y  $R^{2*}$  (coeficiente de determinación forzado al origen). A estos parámetros estadís-

ticos de los datos corregidos se los comparó con los obtenidos por Degano (2017) y Degano *et al.* (2018) en la relación ORA-MOD16A2 de datos originales.

### Resultados y discusión

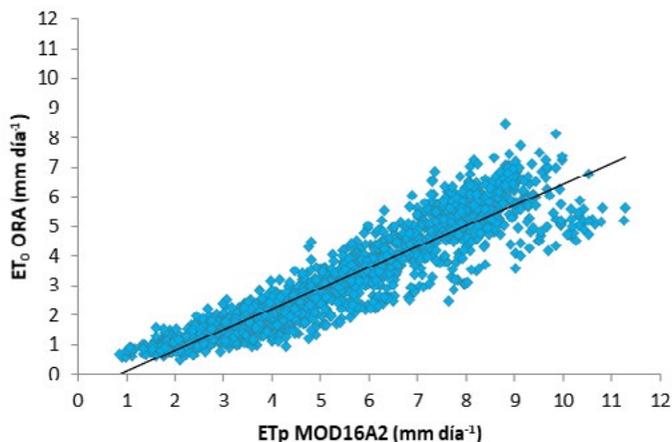
La Figura 2 muestra la dispersión de los datos utilizados para calibrar el producto de satélite MOD16A2 (1856 pares de datos). En el eje x se encuentran los valores de ETp MOD16A2 ( $\text{mm día}^{-1}$ ), que representan los datos a calibrar, y en el eje y los datos de  $ET_0$  ORA ( $\text{mm día}^{-1}$ ). Con ello se obtiene la ecuación lineal de ajuste, cuyos parámetros están determinados en la Tabla 2. Tal como se puede ver en la Figura 2, el producto MOD16A2 sobreestima en toda la región, sin grandes diferencias en la dispersión de puntos entre las distintas ecorregiones (Falasca y Forte Lay, 2003). La no diferenciación en las distintas ecorregiones se debería a un comportamiento suficientemente homogéneo de las variables ambientales, debido a las condiciones topográficas de predominio de la llanura y planicies suavemente onduladas, lo que deriva a que los factores de la Ec. 4 varíen uniformemente en el espacio y en el tiempo. Cabe esperar que, de ser así, la variación de la ETp se deba principalmente a la RN y en menor medida a  $(1 - F_{wet})$ . La estimación de la RN en el producto MOD16A2 depende de la del albedo de la superficie, de la  $Rs_{\downarrow}$  y de la  $RI_{\downarrow}$  que depende de la  $\alpha$  y de la  $Ta$ . El albedo y la  $\alpha$  se determinan con una precisión suficiente de tal modo que el error podría encontrarse en  $Rs_{\downarrow}$ , en la  $Ta$  o en la  $\alpha$  dependiente de la  $Ta$ . La sobreestimación sistemática que presenta el producto MOD16A2 se debería al modelo de Idso y Jackson (1969) utilizado para calcular la  $\varepsilon_a$  (Ec. 10). Éste modelo, de acuerdo a comparaciones a escala global, posee errores de sobreestimación de  $30 \text{ W m}^{-2}$ , que equivalen a  $1,1 \text{ mm día}^{-1}$  (Carmona *et al.* 2014). Éste error se debe a que fue desarrollado para una zona en particular (Alaska, Arizona, Australia y el Océano Índico) y no sería extrapolable a otras regiones de forma directa, ya que los parámetros del modelo son propios de la zona en que se ajustó. Además, se debería de considerar el error asociado a los datos de re-análisis (producto MERRA) de  $Rs_{\downarrow}$  y  $Ta$ . Por el momento, y al nivel de avance en las investigaciones, es apropiado la aplicación de un ajuste lineal para reducir el error del producto.

	a	b [ $\text{mm día}^{-1}$ ]	$R^2$
Parámetros de ajuste	0,70±0,01	-0,57±0,04	0,86

**Tabla 2.** Parámetros de la función ajustada para la corrección local.  
**Table 2.** Parameters of the adjusted function for local correction.

El análisis estadístico determinó un RMSE de  $2,4 \text{ mm día}^{-1}$ , MBE y MAE de  $2,2 \text{ mm día}^{-1}$ , la pendiente es de  $1,22 \pm 0,01$  y la ordenada del origen es  $1,50 \pm 0,03 \text{ mm día}^{-1}$ ,  $R^2$  es 0,86, la pendiente forzada al origen es  $1,58$  y  $R^{2*}$  de 0,76.

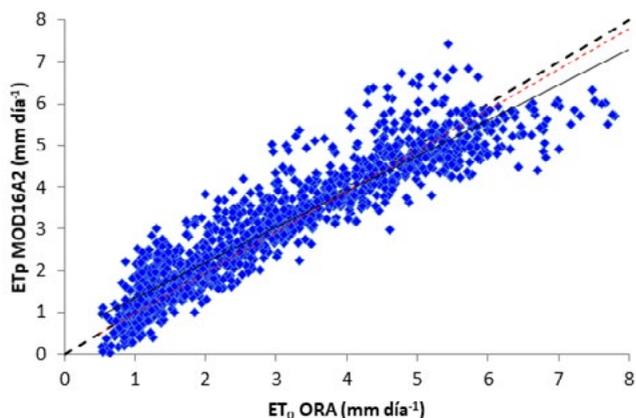
Los parámetros a y b fueron aplicados al restante



**Figura 2.** Dispersión de los datos de ORA versus los de satélite y función lineal ajustada para la calibración del producto. MOD16A2  
**Figure 2.** ORA-satellite data dispersion and linear function adjusted for the MOD16A2 calibration product.

40% de datos de ETp de MOD16A2 con el propósito de obtener valores corregidos de ETp, que posteriormente se evaluaron con las medidas *in situ*. La Figura 3 muestra la relación de los datos de terreno con los de MOD16A2 luego de aplicar los parámetros de corrección, que se ajustan a la recta 1:1, por lo que se ha logrado disminuir el error sistemático observado por Degano (2017) y Degano *et al.* (2018).

El análisis estadístico muestra una disminución del RMSE luego de la corrección, pasando de 2,4 a 0,6 mm día<sup>-1</sup>, así como el MBE y MAE que pasan de 2,2 mm día<sup>-1</sup> a 0,03 mm día<sup>-1</sup> y 0,5 mm día<sup>-1</sup>, respectivamente. La pendiente toma un valor de 0,85±0,01, la ordenada del origen de 0,50±0,03 mm día<sup>-1</sup>, el valor de R<sup>2</sup> es equivalente en ambos conjuntos de datos (0,86),



**Figura 3.** Comparación de los datos medidos *in situ* versus ETp MOD16A2 luego de la aplicación de los parámetros de la Tabla 2.  
**Figure 3.** Comparison between ETp MOD16A2 data measured *in situ* versus ETp MOD16A2 after the application of the parameters in Table 2.

a\* es 1,58 (determina el porcentaje de sobreestimación, que es del 58%) en los datos originales mientras que es cercana a 1 en los corregidos (lo que demuestra que no hay sobreestimación en este caso) y el R<sup>2\*</sup> toma un valor de 0,83 en los datos corregidos.

### Conclusiones

En este trabajo se propone una corrección del producto evapotranspiración potencial de MODIS que reduce significativamente el error y hace aplicable el producto a escala regional en el área que se considera. En la región Pampeana Argentina (RPA) se compararon los datos de evapotranspiración potencial del producto de satélite MOD16A2 con los de ET<sub>0</sub> medidos *in situ* por la Oficina de Riesgo Agropecuario, donde se observó una sobreestimación sistemática mayor al 50% por parte de MOD16A2 (colección 5) en el periodo 2012-2014, determinando un error cuadrático medio de 2,4 mm día<sup>-1</sup>, un sesgo y un error medio absoluto de 2,2 mm día<sup>-1</sup>. Este error sistemático es atribuido, en parte, al término de radiación de onda larga entrante (calculado por un método empírico) y a posibles errores del producto MERRA. Debido a la sobreestimación encontrada, en el presente trabajo se realizó una calibración por medio de un ajuste lineal, aplicando los parámetros a (pendiente) = 0,70±0,01 y b (ordenada del origen) = -0,57±0,04 mm día<sup>-1</sup> a los datos de ETp del producto MOD16A2 en la RPA, lo que dio como resultado una mejora notable en el análisis estadístico, mostrando una disminución del error cuadrático medio a 0,6 mm día<sup>-1</sup>, un sesgo de 0,03 mm día<sup>-1</sup> y un error medio absoluto de 0,5 mm día<sup>-1</sup>. Dada la importancia de la evapotranspiración en el ciclo hidrológico, se recomienda que, si se va a tener en cuenta el producto MOD16A2 como término de entrada en la ecuación de balance hidrológico, previamente a su aplicación directa en otras zonas del planeta, se verifique la existencia de errores sistemáticos. Con respecto a la validez local del método, el ajuste es representativo para toda la serie de datos MOD16A2 ya que el rango de variación de las condiciones atmosféricas contiene los máximos y mínimos hidrológicos, siendo 2012 un año de máximas precipitaciones, 2013 de mínimas precipitaciones y 2014 de precipitaciones medias, de acuerdo a los registros del Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina. Esto hace robusta la aplicación de esta metodología. En este contexto, el producto corregido puede utilizarse para analizar regionalmente los procesos de balance en modelos semidistribuidos (por ejemplo GIS-BALAN y SWAT- *Soil and Water Assessment Tool*), variación del nivel en cuerpos de agua en relación con las precipitaciones, la disponibilidad de agua en el sistema y en evaluaciones de recarga de acuíferos. Investigadores del Instituto de Hidrología de Llanuras se encuentran desarrollando un modelo que reproduce las oscilaciones del nivel freático en función de la diferencia entre precipitación y evapotranspiración lograda con el pro-

ducto MOD16A2 corregido para la Cuenca del Río Salado (provincia de Buenos Aires), con una resolución temporal mensual.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina, al proyecto FONARSEC n° 19 y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires por sus contribuciones. También al Instituto de Hidrología de Llanuras y a la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. Finalmente, a la Oficina de Riesgo Agropecuario por proporcionar datos de  $ET_0$  y a la Universidad de Montana por facilitar los datos del producto MOD16A2. Además, se agradece a los revisores anónimos que contribuyeron para mejorar el documento.

## Referencias

- Aliaga, V.S., Ferrelli, F. y Piccolo, M.C. 2017. Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37, 1237-1247.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. 1998. *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. Irrigation and Drainage Paper 56 (97), Rome, Italy.
- Autovino, D., Minacapilli, M. y Provenzano, G. 2016. Modelling bulk surface resistance by MODIS data and assessment of MOD16A2 evapotranspiration product in an irrigation district of Southern Italy. *Agricultural Water Management*, 167, 86-94.
- Barraza Bernardas, V. D. 2015. *Modelos y aproximaciones basadas en información satelital en microondas pasivas para la estimación de la evapotranspiración en áreas boscosas de la Cuenca del Río Bermejo*. Tesis doctoral. Biblioteca Digital de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., Degano, F., Kruse, E. y Bayala, M., 2018. Evaluation of two models using CERES data for reference evapotranspiration estimation. *Revista de Teledetección*, (51), 87-98.
- Carmona, F. y Rivas, R. 2011. Estimación de la evapotranspiración real mediante datos meteorológicos e imágenes de satélite. *Teledetección: Recientes aplicaciones en la región pampeana*. Buenos Aires, Argentina.
- Carmona, F., Rivas, R. y Caselles, V. 2014. Estimation of daytime downward longwave radiation under clear and cloudy skies conditions over a sub-humid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 281-295.
- Degano, M. F. 2017. Evaluación del producto de evapotranspiración global MOD16 con medidas *in situ* en la región de la Pampa Húmeda, Argentina. Tesis de Maestría. Facultad de Física, Universidad de Valencia.
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Sánchez, J. M., Carmona, F. y Niclòs, R. 2018. Assessment of the Potential Evapotranspiration MODIS Product Using Ground Measurements in the Pampas. In *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, San Miguel de Tucumán, Argentina, 1-5.
- Di Bella, C., Rebella, C. y Paruelo, J. 2000. Evapotranspiration estimates using NOAAVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. *International Journal of Remote Sensing*, 21(4), 791-797.
- Falasca, S y Forte Lay, J. A. 2003. Cambio en la evapotranspiración potencial de la pradera pampeana (República Argentina) inducido por un período húmedo. *Revista Geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, 34, 119-152.
- García, A.G., Campos, A.N., Di Bella, C.M. y Posse Beaulieu, G. 2013. Evolución de la evapotranspiración en diferentes coberturas vegetales de la Argentina utilizando productos derivados del sensor MODIS. INTA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Artículo de divulgación.
- Idso, S.B. y Jackson R. D. 1969. Thermal radiation from the atmosphere". *Journal Geophysical Research* 74: 5397–5403.
- Kim, H.W., Hwang, K., Mu, Q., Lee, S.O. y Choi, M. 2012. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(2), 229-238.
- Marini, F., Santamaría, M., Oricchio, P., Di Bella y C.M., Basualdo, A. 2017. Estimation of real evapotranspiration (ETR) and potential evapotranspiration (ETP) in the southwest of the Buenos Aires Province (Argentina) using MODIS images. *Revista de Teledetección*, 48, 29-41.
- Matteucci, S. D. 2012. Ecorregión Pampa. In Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F., Silva, M. and de Haro, C. (ed), *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Gráfica Editora. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente. Buenos Aires, Argentina, Cap. 12, 341-495.
- Monteith, J. L. y Unsworth, M. H. 1990. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London, second edition, 291 pp.
- Mu, Q., Zhao, M. y Running, S.W. 2013. MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3)". *Algorithm Theoretical Basis Document, Collection 5*.
- Ocampo, D., Rivas, R., Silicani, M., Carmona, F., Holzman, M. y Mancino, C. 2012. Estimación de la fracción evaporativa a partir de registros de humedad de suelo y un lisímetro de pesada. *8° Encuentro del "International Center For Earth Sciences"-E-ICES*, Mar del Plata, Argentina. 8.
- Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA), 02/06/18, <http://www.ora.gob.ar/>
- Organización Meteorológica Mundial 1994. Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición de datos, aná-

- lisis, predicción y otras aplicaciones. WMO-N°168, 5ta edition, pp. 273-303.
- Pereyra, F. 2003. *Ecorregiones de la Argentina*. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires, 189 pp.
- Ramoelo, A., Majazi, N., Mathieu, R., Jovanovic, N., Nickless, A. y Dziki, S. 2014. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. *Remote Sensing*, 6(8), 7406-7423.
- Rivas R. y Caselles V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing-based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing of Environment*, 93:68-76.
- Rivas, R., Bayala, M., Carmona, F., Holzman, M., Degano, M. F. y Mancino, C. 2016. Adaptación del modelo de Rivas y Caselles para el cálculo de la evapotranspiración con datos del producto modis MYD11A2. *XVII Simposio Internacional En Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica SELPER*. Misiones, Argentina, 1397-1404.
- Ruhoff, A. L., Paz, A. R. Aragao, L. E., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., Rocha, H. R. y Running, S. W. 2013. Assesment of the MODIS global evapotranspiration using Eddy Covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin. *Hydrological Sciences Journal*, 58(8), 1658-1676.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN), 02/06/18, <http://www.smn.gov.ar/>
- Silicani, M. R. 2015. *Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo. Tesis de especialización*. Universidad de Cuyo, San Juan, Argentina.
- Teuling, A. J., Hirschi, M., Ohmura, A., Wild, M., Reichstein, M. y Ciais, P. 2009. A regional perspective on trends in continental evaporation. *Geophysical Research Letters*, 36 (2).
- Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of Climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94.
- Universidad de Montana, 19/04/17, [http://files.nts.g.umt.edu/data/NTSG\\_Products/MOD16/](http://files.nts.g.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/)
- Walker, E., García, G. A. y Venturini, V. A. 2018. Actual evapotranspiration estimation over flat lands using soil moisture products from SMAP mission. *Revista de Teledetección*, 52, 17-26.

Recibido: julio 2019  
Revisado: noviembre 2019  
Aceptado: enero 2020  
Publicado: marzo 2021