

# VALIDACIÓN DE LA EVAPOTRASNPIRACIÓN REAL Y POTENCIAL DEL PRODUCTO MOD16\_A2 EN LA PAMPA HÚMEDA ARGENTINA

Degano, María Florencia<sup>1</sup>, Sánchez Tomás, Juan Manuel<sup>2</sup>, Rivas, Raúl<sup>3</sup>, Carmona, Facundo<sup>4</sup>.

## I. Introducción

La evaporación (Ev) representa la cantidad de agua que, en forma de calor latente, se transfiere a la atmósfera, proveniente del suelo y las masas de agua. En un suelo con cubierta vegetal, existe además otra aportación de agua a la atmósfera: la transpiración (T) de las plantas. En ellas se dan tres caminos para perder vapor de agua, en base a lo cual se distinguen tres tipos de T: estomática, cuticular y lenticular. Dado que la cutícula presenta un fuerte carácter hidrófobo, y que las lenticelas son mucho menos abundantes que los estomas, la T estomática es la responsable de la mayor parte del agua transpirada (Botella y Campos, 1993).

La Ev y la T, son dos procesos físicos muy similares que consisten en el paso de agua desde un estado líquido a un estado de vapor, forma en la cual escapa hacia la atmósfera, diferenciándose únicamente uno del otro en el tipo de superficie evaporante (Brasa, 1997). En la naturaleza, ambos ocurren simultáneamente, sin que sea fácil distinguirlos. Por ello, se engloban bajo el término de evapotranspiración (ET).

La ET desde una superficie con vegetación es función de las condiciones meteorológicas del área, así como de las características anatómicas y fisiológicas de la vegetación (Allen *et al.*, 1998). En la Pampa Subhúmeda-Húmeda, la ET es la variable hidrológica de mayor relevancia (Rivas *et al.*, 2002), debido a que mediante este fenómeno se pierde el 85% del agua que precipita (Weinzettel y Usunoff, 2001). El proceso es consecuencia del aporte de energía, principalmente por la radiación solar directa, y en menor medida, por la temperatura ambiente del aire. La fuerza impulsora de este proceso es la diferencia de presión entre el vapor de agua en la superficie evaporante y del vapor de agua de la atmósfera circundante (Allen *et al.*, 1998).

Existen tres tipos diferentes de ET, la potencial (ET<sub>p</sub>), la del cultivo de referencia (ET<sub>0</sub>) y la Real (ET<sub>r</sub>). En lo que respecta a la primera, como indica Thornthwaite (1948), es la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación, con desarrollo óptimo y sin limitaciones de agua, según ésta definición, la ET<sub>p</sub> está controlada por factores meteorológicos, por las características del cultivo y del suelo, sin depender de las condiciones de humedad del suelo. La definición ET<sub>0</sub> es muy similar a la ET<sub>p</sub>, (en éste trabajo se utilizan como sinónimos) pero con la diferencia de que la ET<sub>0</sub> se calcula con datos aplicados a un cultivo específico (gramínea o alfalfa), basada en la ecuación de Penman Monteith (PM) determinada por Monteith y Unsworth, 1990, donde la ET<sub>0</sub> se define como la tasa de ET desde un cultivo hipotético sano, con una altura de 12 cm, crecimiento activo que da una cobertura sombreada al suelo, cubre un área extensa y que está bien provisto de agua, asumiéndose una resistencia del cultivo de 70 s/m y un albedo de 0,23 (Allen

---

<sup>1</sup> Comisión de Investigaciones Científicas, Instituto de Hidrología de Llanuras.  
mflorencia.ihlla@gmail.com

<sup>2</sup> E. Politécnica de Cuenca, Instituto de Desarrollo Regional. juanmanuel.sanchez@uclm.es

<sup>3</sup> Comisión de Investigaciones Científicas, Instituto de Hidrología de Llanuras.  
rrivas@rec.unicen.edu.ar

<sup>4</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.  
facundo.carmona@rec.unicen.edu.ar

et al., 1998). La Ecuación 1 representa la simplificación de la ecuación de balance de energía propuesta por PM.

$$\lambda ET = \frac{\Delta \cdot (R_N - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{(e_a - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (1)$$

donde  $\lambda ET$  es el flujo de calor latente (MJ/m<sup>2</sup>/día),  $R_N$  es la radiación neta (MJ/m<sup>2</sup>/día),  $G$  es el flujo de calor del suelo (MJ/m<sup>2</sup>/día),  $\rho$  es la densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>),  $c_p$  es el calor específico del aire húmedo a presión constante (MJ/kg/°C),  $e_a$  es la presión de vapor del aire (kPa),  $e_d$  es la presión de saturación de vapor (kPa),  $r_c$  es la resistencia del cultivo (día/m),  $r_a$  es la resistencia aerodinámica (día/m),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C) y  $\gamma$  es la constante psicrométrica (kPa/°C).

$ET_p$  y  $ET_0$  corresponden a definiciones teóricas, ya que el proceso de ET se produce en una superficie natural y no siempre se encuentra en las condiciones hipotéticas planteadas (Rivas, 2004). Por lo que se define el concepto de  $ET_r$ , como la cantidad de agua verdaderamente perdida por la superficie, que depende de las condiciones atmosféricas, el contenido de agua en el suelo y las características de la vegetación (Inoue y Moran, 1997; Entraigas et al., 2001).

La ET tiene un importante impacto económico en diferentes regiones, dado que su estimación permite reducir el costo de los proyectos de riego entre otros usos productivos. Por lo tanto, es un tema de investigación activa en áreas tales como la hidrología, la agricultura y la meteorología, lo que 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).

### 1.1. Datos de satélite

A través de teledetección se pueden estimar distintos parámetros del planeta Tierra de manera indirecta, como es el caso de la ET. Así pues, parte de este trabajo se centra en determinar la ET mediante teledetección. Para ello se empleará el producto MOD16\_A2 del sensor MODIS a bordo del satélite EOS-Terra, que posee una resolución espacial de 1 km, una resolución temporal de 8 días y se encuentra a escala global. El producto MOD16\_A2 está compuesto por cinco bandas, de las cuales dos son de ET (real y potencial (mm/8días), con factor de corrección de 0,1), otras dos de calor latente (real y potencial (J/m<sup>2</sup>/8días)) y por último la banda de calidad. Para la realización de este trabajo solo se tuvieron en cuenta las bandas de  $ET_r$  y  $ET_p$  (Mu et al., 2013).

Diversos trabajos han mostrado que el producto MOD16\_A2 presenta problemas de subestimación y sobreestimación de  $ET_r$  y  $ET_p$ , respectivamente, para diferentes zonas y remarcan que deben realizarse mejoras del modelo (Mu et al., 2011; Kim et al., 2012, Ruhoffet et al., 2013, Nadzri y Hashim, 2014; Ramoelo et al., 2014, Barraza Bernardas, 2015, Hu et al., 2015, Autovino et al., 2016).

## I.II. Datos *in situ*

Dado que la teledetección proporciona datos tomados de medidas indirectas, el objetivo principal de este trabajo es comprobar la fiabilidad de éstas mediante su validación con datos *in situ*. De esta forma se determina si se trata de un método de uso factible. Para ello, se utilizan datos medidos con un lisímetro de pesada, instalado en una parcela con pasto corto ubicada en el Campus Universitario de la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) de la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina. Estos datos corresponden a evapotranspiración real (ETR) determinados a partir de variación de peso.

El producto de ETp MOD16\_A2 se evaluó con estimaciones de  $ET_0$  (en éste trabajo se toman como sinónimos) realizadas por la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA) perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina que utiliza el método de PM (Ecuación 1). La evaluación se realizó para cuatro estaciones pertenecientes a la Provincia de Buenos Aires: Azul, Pigüé, Bolívar y Junín y una perteneciente a la provincia de La Pampa: General Pico (Rivas *et al.*, 2016).

## II. Zona de estudio y mediciones

### II.I. Zona de estudio

En la Figura 1 se muestra la ubicación de las distintas estaciones, el lisímetro de pesada está en la ciudad de Tandil, ( $37^{\circ} 19' 7.67'' S - 59^{\circ}4'42,45'' O$ ), la estación de Azul, se encuentra a los  $36^{\circ}29'60''S$  y  $59^{\circ}31'48''O$ , a 147 msnm; la de Pigüé, a  $37^{\circ}21'36''S$  y  $62^{\circ}13'48''O$ , a 304 msnm; la perteneciente a Bolívar, a los  $36^{\circ}7'15''S$  y  $61^{\circ}2'24''O$ , con 94 msnm; Junín, se sitúa en las coordenadas geográficas  $34^{\circ}19'48''S - 60^{\circ}33''O$ , y a 81 msnm, y General Pico, a los  $35^{\circ}25'14''S - 63^{\circ}27'2''O$ , 145 msnm (Rivas *et al.*, 2016). Las diferentes estaciones se encuentran dentro de distintos ambientes de la región pampeana, las localidades de Tandil y Azul están dentro de la subregión de las Sierras Septentrionales, Junín, Bolívar y General Pico, integran la subregión de la Pampa Arenosa y Pigüé se encuentra dentro de la subregión Interserrana.

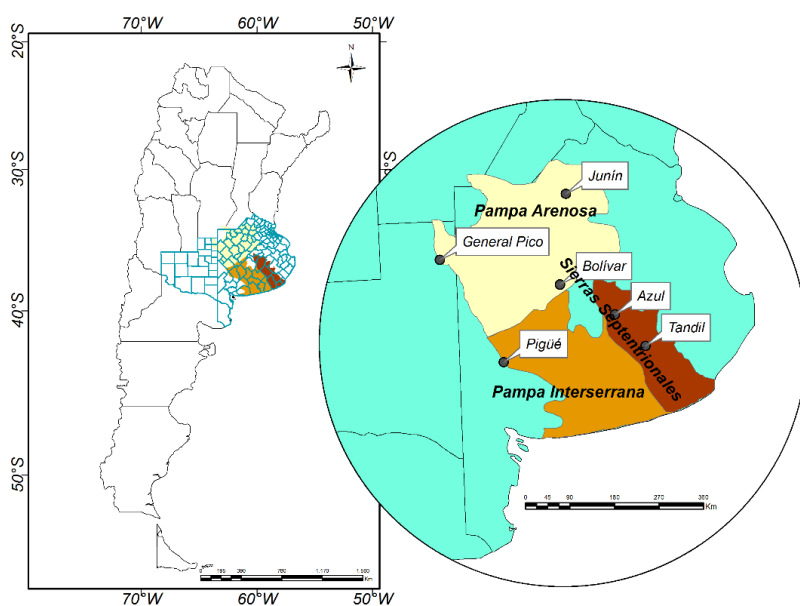


Figura 1. Distribución espacial de las estaciones (modificado de Rivas *et al.*, 2016).

El clima del Complejo de las Sierras Septentrionales (Tandil y Azul) es templado-frío y seco según algunos autores y subhúmedo seco, según otros. La temperatura media anual disminuye de NE a SO. El sur de la provincia de Buenos Aires es barrido durante todo el año por masas de aire de dirección SO-NE, ya que está influido por las anticiclones del Atlántico y del Pacífico austral. En el invierno llegan los vientos fríos y secos del SO (Quattrocchio *et al.*, 2008). Las temperaturas anuales media, máxima media y mínima media 15,4; 22,9 y 9,1 °C, respectivamente. La precipitación media anual es de 700 mm y la velocidad media anual de viento es de 6,19 m/s. El relieve irregular del sistema serrano origina microclimas locales (Morello, *et al.*, 2012). En lo referente al partido de Tandil, al norte se extiende una llanura verde, de suave declive y montes cubiertos con diversas especies arbóreas, con excelentes suelos para cultivos. La precipitación promedio anual es de 912 mm (Servicio Meteorológico Nacional de Argentina, período 2000-2010) y una ET de entre 730 y 820 mm/año (según el Intituto de Hidrología de Llanuras 1994-2014) (Silicani, 2015).

Según Morello *et al.*, (2012), en la Pampa Arenosa (Junín, Bolívar y General Pico), el clima es templado húmedo, con temperaturas medias anuales entre 15 y 18 °C. Los veranos son cálidos y los inviernos suaves, las temperatura medias de enero y julio son 23-24 y 7-8 °C, respectivamente. Las precipitaciones medias anuales varían entre 1000 y 800 mm decreciendo hacia el oeste; la variación interanual es grande. Las precipitaciones estivales son escasas y frecuentemente se producen sequías severas. La evapotranspiración potencial es de 800 mm anuales, por lo cual hay exceso hídrico muy leve o ausente. Hacia el oeste aumentan las condiciones de aridez, la estacionalidad y la continentalidad climática. La subregión Interserrana (Pigüé), forma parte de una gran planicie, rodeada de serranías. Posee un clima templado, donde se registran precipitaciones frecuentes.

El suelo adquiere importancia en el marco de este trabajo en el caso del lisímetro y no así en el resto de estaciones consideradas y por lo tanto solo se hace referencia a este para la parcela ubicada en el campus de la UNCPBA. Según Rivas y Ocampo (2009), el tipo de suelo de la región corresponde a un Argiudol Típico, lo que significa que se trata de un Molisol (que contiene un horizonte superficial (A) y enriquecido con materia orgánica que esta humificada, la partícula Argi implica que en el subsuelo se acumuló arcilla como resultado de un proceso de migración (por suspensión y movimiento en agua) desde horizontes suprayacentes (horizontes Bt1 y Bt2) (Silicani, 2015). Según mapa de suelos 1:50000 del INTA pertenece a la Unidad Cartográfica SP (Sierra de los Padres) 6, una asociación que incluye los suelos serie Mar del Plata, serie Tandil y serie Cinco Cerros. La parcela del lisímetro contiene una cubierta vegetal mixta (*Dactylis glomerata*, *Festuca arundinacea* y *Lolium Multiflorum*) que se mantiene a una altura de 12 cm en condiciones de secano.

## II.II. Medidas de superficie

### Evapotranspiración real (Lisímetro)

Los lisímetros son grandes “contenedores” llenos de suelo, ubicados en el campo, para representar el medio ambiente local, con superficie con vegetación o en suelo desnudo, para la determinación de ET de un cultivo en crecimiento, o de una cobertura vegetal de referencia, o de un suelo sin vegetación (Aboukhaled *et al.*, 1982).

Con respecto al lisímetro de pesada ubicado en el campus de Tandil (Figura 1), según Silicani (2015), el montaje se realizó de acuerdo a Aboukhaled *et al.* (1982), la superficie del lisímetro es de 0,27 m<sup>2</sup> y tiene una profundidad de 0,88 m (cuya

profundidad útil de suelo de 0,60 m) y un diámetro de 0,59 m. La profundidad seleccionada es debido a que la exploración de raíces no supera los 0,50 m. Está compuesto por un contenedor cilíndrico con el fondo ranurado, este fondo consta de una chapa soldada en ángulo para facilitar el drenaje del excedente de agua. En primera instancia se instala la estructura soporte dentro del pozo, por encima el contenedor cilíndrico, dentro se coloca grava, y por encima de ella, el suelo, en éste caso se pusieron también tres sensores de humedad. Adicionalmente se añadieron tres cadenas de 1 m de longitud en el borde superior del lisímetro, separadas entre sí por ángulos de 120°, que permiten colgar la estructura de una pluma hidráulica para su posterior toma del peso.

En Tandil, desde el año 2011 se obtiene la ETr local con la utilización del lisímetro de pesada. Se realizan mediciones periódicas del peso del lisímetro y mediante conversiones matemáticas, se obtiene la ETr en unidades de mm/día.

### Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial se obtiene de Rivas *et al.* (2016), quienes utilizaron los datos provenientes de la ORA, perteneciente al Ministerio de Agroindustria de la Nación Argentina para las estaciones de Azul, Pigüé, Bolívar, Junín y General Pico. En la ORA calculan los datos de  $ET_0$  utilizando información que les brinda el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina. La  $ET_0$  para cada sitio experimental se estimó a partir del método PM (Ecuación 1) utilizando datos de variables biofísicas censadas *in situ*. Las estaciones se eligieron a partir de la disponibilidad y calidad de una extensa serie de datos. Las variables de interés colectadas en las estaciones fueron temperatura máxima y mínima ( $T_{min}$  y  $T_{max}$ ), humedad relativa (HR %), velocidad de viento (m/s) y radiación solar ( $W/m^2$ ) abarcando un rango temporal desde el año 2002 hasta el 2013. Para la realización del presente trabajo se tomaron los datos de los años 2012 y 2013.

### II.III. Producto de satélite

El producto MOD16\_A2, cuyos datos son la sumatoria de 8 días, posee una resolución espacial de 1 km a través de los 109,03 millones de  $km^2$  a escala global, de áreas con vegetación. El algoritmo MOD16 se basa en la lógica de la ecuación de PM, que utiliza productos provistos por el sensor MODIS combinando con información meteorológica diaria obtenidos a partir de datos de re-análisis como variables de entrada. La ET es la suma de los flujos de vapor de agua de la evaporación del suelo, la evaporación del dosel húmedo, la evaporación del agua de lluvia interceptada por el dosel de las plantas antes de que alcance el suelo, y la transpiración a través de estomas en las hojas y tallos de las plantas (Mu *et al.*, 2013). La temperatura diaria del aire, datos sobre el déficit de presión de vapor, humedad relativa, y el producto LAI de MODIS se utilizan para estimar la conductancia superficial, la resistencia aerodinámica, la capa húmeda, el flujo de calor del suelo en conjunto con otras variables ambientales claves.

Mu *et al.* (2011) han mejorado el algoritmo de Mu *et al.* (2007): 1) simplificando el cálculo de la fracción de cobertura vegetal; 2) calculando ET como la suma de componentes diurnos y nocturnos; 3) calculando el flujo de calor del suelo; 4) mejorando los métodos para estimar la conductancia estomática, la resistencia aerodinámica y la resistencia de la capa límite; 5) la separación de la superficie seca del dosel de la húmeda; y 6) dividiendo la superficie del suelo en superficie húmeda saturada y superficie de humedad, y por lo tanto la evaporación del suelo incluye la evaporación potencial de la superficie húmeda saturada y la evaporación real de la superficie de humedad.

### III. Metodología

#### III.I. Preparación de los datos del Lisímetro

Desde el año 2011 se obtiene la ETr mediante el lisímetro de pesada, se realizan mediciones puntuales del peso del lisímetro, obteniendo los valores en kilogramos (kg). Como describe Silicani (2015), el pesado se realiza suspendiendo la estructura con las cadenas ubicadas en la parte superior del cilindro. Como se observa en la Figura 2A, los extremos de las cadenas se colocan en la parte inferior de una balanza digital (de capacidad máxima de 500 kg y mínima de 0,200 kg, cuyo error asociado es de  $\pm 0,7$  mm) y la parte superior de la balanza es acoplada a una pluma hidráulica (capacidad máxima 2000 kg). Una vez acopladas todas las partes se procede a elevar toda la estructura de manera lenta y verificando que no se produzcan roces sobre los costados del pozo que la contienen (Figura 2B). Este procedimiento se repite tres veces para obtener el coeficiente de dispersión.

Para determinar los valores ETr se calcula la diferencia de masas existente entre dos pesadas consecutivas, a este resultado se lo multiplica por un factor de 0,27, para transformar los kg en mm. El paso siguiente es dividir ese valor por la cantidad de días existentes entre una pesada y la siguiente para obtener los mm evaporados por día. En el caso de que entre una pesada y otra existan lluvias, los mm se suman al total obtenido, si es que la pesada 1 es mayor que la 2, en caso contrario, las lluvias se restan para evitar sumar peso extra.

Como ya se ha dicho, el lisímetro opera desde Noviembre del 2011 a la actualidad, pero para este trabajo se tuvieron en cuenta los datos a partir de Abril del 2012 (debido a que el suelo dentro del lisímetro ya había logrado poseer las condiciones naturales y semejantes a las de la parcela) y hasta Diciembre del 2013, y se eligieron estratégicamente las fechas de las pesadas, excluyendo los datos en los que hubo lluvias intensas los días previos, o cuando se realizaron tareas de mantenimiento en la parcela, para que esto no influya ni modifique los valores reales de la ETr.



Figura 2 Pluma Hidráulica acoplada a la balanza y a las cadenas del lisímetro (A). Lisímetro en suspensión (B).

### III.II. Procesado de las imágenes MODIS

Desde WWW1 se descargó el producto MOD16\_A2 para las fechas seleccionadas. La zona de estudio abarca los cuadrantes h12v12 y h13v12. Mediante el uso del software ENVI, con la herramienta "MODIS Conversion Toolkit" fueron reproyectadas, y posteriormente se las multiplicó por el factor de 0,1, para convertir los valores a magnitud física de ET (Mu *et al.*, 2013).

Para poder extraer los datos de ET de MODIS se realizaron ventanas de 3x3 km<sup>2</sup>, en cuyo píxel central se encuentra la coordenada de cada estación. Se generaron Regiones de Interés (ROIs) y se tomó la media de esas ventanas como ET real para la zona correspondiente al lisímetro y potencial para las estaciones de Azul, Pigüé, Bolívar, Junín y General Pico.

### III.III. Comparación de datos de teledetección con medidas *in situ*.

Para evaluar la respuesta del producto MOD16\_A2 se utilizaron medidas *in situ* de las diferentes estaciones meteorológicas ya nombradas. Se tomaron las bandas de ETr y ETp del producto y a la primera se la comparó con la parcela que contiene un lisímetro de pesada, y a la segunda con los datos provenientes de la ORA.

Se obtuvieron los valores de ET para las distintas estaciones con la utilización del *software* ENVI, extrayendo la media de cada ventana. Se compararon los datos en gráficos ETr\_lisímetro vs DOY y ETr\_MOD16\_A2 vs DOY, lo mismo con la ETp\_ORA. La bondad del producto se evaluó cuantitativamente mediante el uso de la Mediana (Me - diferencia entre la mediana de los valores de MOD16\_A2 y de los datos *in situ*), la RSD (Desviación Estándar Robusta) (Wilrich, 2007) y el R-RMSE (Error Cuadrático Medio Robusto). También se tuvo en cuenta el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>), obtenido al enfrentar en una gráfica la ETr\_lisímetro con ETr\_MOD16 y la ETp\_ORA con la ETp\_MOD16\_A2.

## IV. Resultados

### IV.I. Comparación MOD16\_A2 con medidas de Lisímetro (ETr)

La Figura 3 relaciona los valores de ETr medidos con Lisímetro vs los determinados con MOD16\_A2 para los años 2012 y 2013, observando los datos, se determina una clara subestimación por parte del producto de MODIS, mostrando la nube de puntos por debajo de la línea 1:1. Esta relación posee un R<sup>2</sup> de 0,69.

En el gráfico de la Figura 4 se muestra la variación de los promedios estacionales de la ETr estimada mediante el lisímetro de pesada y a través del producto MOD16\_A2. Se puede observar que los datos de Lisímetro son mayores que los que presenta MOD16\_A2 en todas las estaciones del año y para los dos años. En ambos casos (lisímetro y MOD16\_A2) los valores de ETr son mayores en 2013 en comparación a 2012.

Se han calculado los valores de Me, RSD y el R-RMSE para la relación existente entre los datos de ETr del Lisímetro con los del producto MOD16\_A2 para las cuatro estaciones del año (ver Tabla 1). Se observa que los valores de la Me son en su mayoría negativos, indicando subestimación en los resultados. Para la primavera del 2013 la RSD es mayor que para el 2012 y el R-RMSE es más alto en otoño que en las demás estaciones tanto para el 2012 como para el 2013, seguido de la primavera, verano y finalmente invierno.

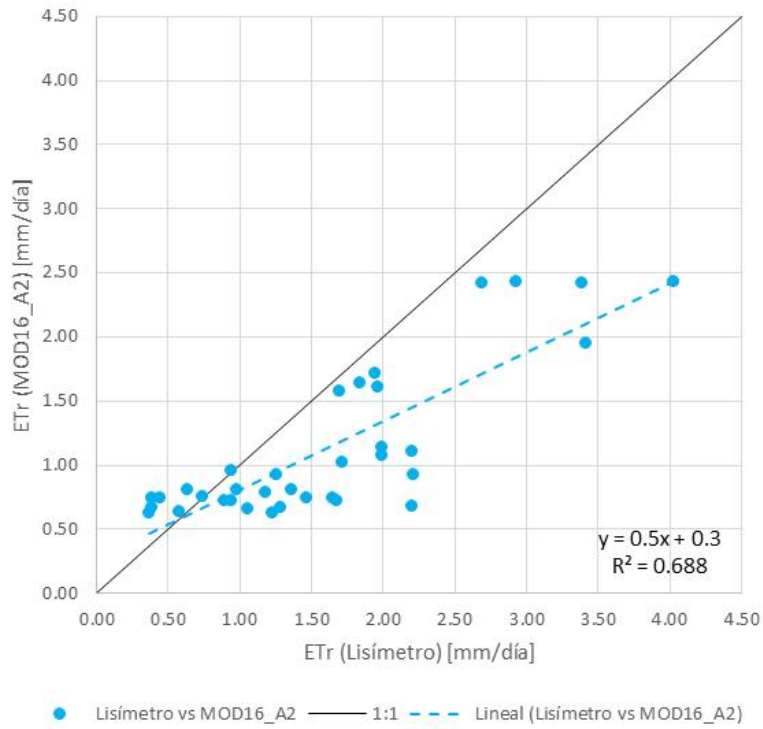


Figura 3 Comparación entre datos de Lisímetro vs MOD16\_A2 de ETr.

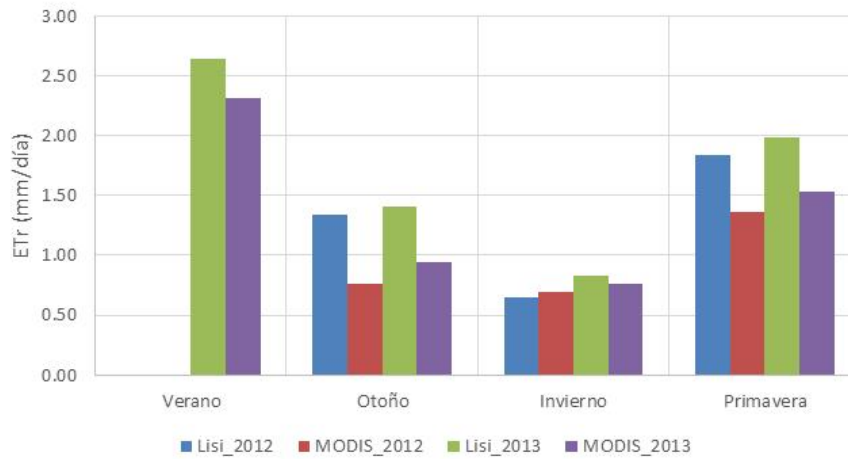


Figura 4 Variación estacional de los valores promedio de ETr para Lisímetro y MOD16\_A2 en 2012 y 2013.

Tabla 1 Me (mm/día), RSD (mm/día) y R-RMSE (mm/día) estacional para los datos de ETr para la relación Lisímetro-MOD16\_A2

Estación	2012			2013		
	Me	RSD	R-RMSE	Me	RSD	R-RMSE
Verano				-0,49	0,3	±0,6
Otoño	-0,70	0,3	±0,8	-0,38	0,2	±0,4
Invierno				0,02	0,2	±0,2
Primavera	-0,48	0,2	±0,5	-0,18	0,5	±0,5
Anual	-0,68	0,3	±0,7	-0,36	0,2	±0,4



#### IV.II. ORA vs MOD16\_A2

En la Figura 5 se muestra un gráfico con la relación entre  $ET_0$  (ORA) y  $ET_p$  (MOD16\_A2) para los años 2012 y 2013. Se puede observar que los puntos se muestran en su totalidad distribuidos por encima de la línea de la relación 1:1, lo que indica una sobrestimación por parte de MOD16\_A2. El valor de  $R^2$  para resulta de 0,70 para el 2012 y de 0,78 para el 2013.

La Tabla 2 refleja la Me, los valores de  $R^2$  y RSD obtenidos para la relación de los datos de  $ET_p$  determinados por la ORA y por los procesados en el producto MOD16\_A2. Para el año 2012 se observa que el  $R^2$  oscila entre 0,58 y 0,93, lo que indica una correlación alta entre ambos métodos, siendo mayor en Pigüé y menor en la zona de Bolívar. En lo referente a la RSD se puede observar que varía entre 2,0 para Junín, seguido por General Pico, Pigüé Bolívar y Azul, con 1,0. Para el 2013, el  $R^2$  varía entre 0,6 y 0,92, siendo mayor en Junín y menor en General Pico. La Me y la RSD otorgan valores menores que el año anterior. Los valores de la Me son positivos en ambos años, lo que indica una sobreestimación por parte MOD16\_A2.

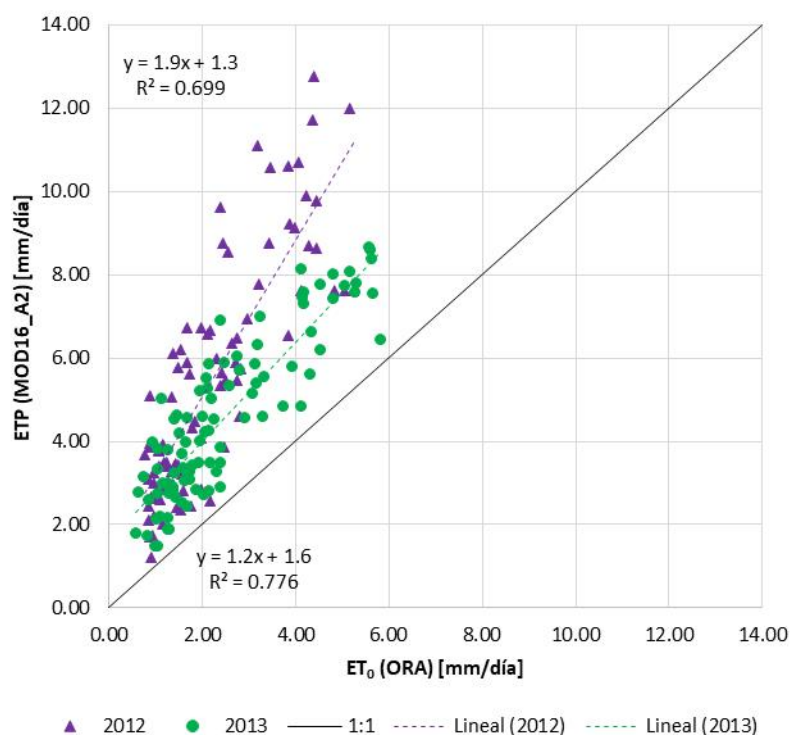


Figura 5 Comparación entre datos ORA vs MOD16\_A2 para  $ET_p$ .

Tabla 2. Me (mm/día),  $R^2$  y RSD (mm/día) de  $ET_p$  entre ORA y MOD16\_A2 para los años 2012 y 2013.

Estación	2012			2013		
	Me	RSD	$R^2$	Me	RSD	$R^2$
Azul	2,05	1	0,84	1,68	0,8	0,83
Pigüé	2,92	1,4	0,93	1,44	0,7	0,87
Bolívar	2,34	1,1	0,58	2,24	1,1	0,92
Junín	4,21	2,0	0,68	2,11	1	0,72
General Pico	3,07	1,5	0,64	2,40	1,2	0,60

## V. Conclusiones

En la relación Lisímetro-MOD16\_A2, donde se comparan los valores de ETr, se obtiene un  $R^2$  entre ambas variables del 69%. El producto MOD16\_A2 estaría subestimando los valores de evapotranspiración real, indicado también por el valor de la Me. Los valores de RSD son mayores en la primavera del 2013, y el valor del R-RMSE es mayor en otoño tanto para 2012 como para 2013.

Observando la relación de ORA con MOD16\_A2, donde se compara la ETp, se concluye que MOD16\_A2 sobreestima la evapotranspiración, en más de un 50%. Los valores positivos de la Me también determinan la sobreestimación por parte de MOD16\_A2. La RSD en 2012 varía entre 1,0 y 2,0 mm/día, siendo mayor en la zona de Junín, y disminuyendo para General Pico, Pigüé, Bolívar y finalmente Azul, lo que indica que, para Azul los valores de ETp son más homogéneos que en el resto de estaciones. En 2013, esta métrica es menor que en el año 2012, oscilando entre 0,70 mm/día en Pigüé y 1,2 mm/día en General Pico. La correlación observada entre los datos es del 70% y 78% para 2012 y 2013, respectivamente.

Este trabajo contribuye a reforzar las afirmaciones de los diferentes autores citados, resaltando discrepancias de los datos del producto MOD16\_A2 con respecto a medidas locales en caso de este trabajo, observándose una subestimación de los valores de ETr y una sobreestimación de los valores de ETp de más del doble en comparación con datos *in situ*. Por tanto, los resultados de este estudio demuestran que hay que tener mucha cautela a la hora de utilizar datos de ET del producto MOD16\_A2 en la región de la Pampa Húmeda Argentina.

## Agradecimientos

El trabajo se realizó gracias a la beca de doctoral otorgada por la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC), a fondos del proyecto FONARSEC 19 "Desarrollo e implementación de sistemas automáticos de alerta de inundaciones y sequías en el área sur de la cuenca del río Salado, provincia de Buenos Aires" (REDIMEC SRL - ADA - CICPBA) y al Instituto de Hidrología de Llanuras por el lugar de trabajo.

## VI. Bibliografía

- Aboukhaled A., Alfaro A. and Smith M. (1982): "Lysimeters FAO Irrigation and Drainage paper N°39", Rome, Italy.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. (1998): "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements". Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- 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.
- Botella, O. y Campos, I. (1993): "El agua en la planta. Agronomía del Riego". Ediciones Mundi-Prensa Universidad de Castilla La Mancha, Madrid, 239-298.
- Brasa, A. (1997): "Determinación mediante teledetección de la evapotranspiración en regadíos extensivos". Tesis doctoral, Universidad de Castilla La Mancha, Cuenca, España 167 pp.
- Entraigas I., Rivas R. y Usunoff E. (2001): "Intercepción y Distribución de la Precipitación bajo el Canopeo de Maíz". Revista de la Asociación Argentina de Agrometeorología, Vol. 1, 2 : 89-94.

- Hu, G.C., Jia, L. and Menenti, M. (2015): "Comparison of MOD16 and LSA-SAF MSG evapotranspiration products over Europe for 2011". *Remote Sens. Environ.* 156,510–526.
- Inoue, Y. and Moran, M. S. (1997): "A simplified method for remote sensing of daily canopy transpiration-a case study with direct measurements of canopy transpiration in soybean canopy". *International Journal Remote Sensing*, 18, (1): 139-152.
- Kim, H.W., Hwang, K., Mu, Q., Lee, S.O., Choi, M., (2012): "Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia". *KSCE J. Civil Eng.* 16 (2), 229–238.
- Monteith, J. L. y Unsworth, M. H. (1990): "Principles of environmental physics". Edward Arnold, London, second edition, 291 pp.
- Morello, J., Matteucci, S. D., Rodríguez, A. F., Silva, M. y de Haro, C. J. (2012): "Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos". Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo. Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente. Orientación Gráfica Editora. Cap. 12, 341-495
- Mu, Q., Heinsch F. A., Zhao M. y Running S.W. (2007): "Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data". *Remote Sensing of Environment*, 111, 519-536.
- Mu, Q., Zhao, M. y Running, S. W. (2011): "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm". *Remote Sens. Environ.*, 115(8), 1781–1800, doi:10.1016/j.rse.2011.02.019.
- Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W. (2013): "MODIS Global Terrestrial Evapotranspiration (ET) Product (NASA MOD16A2/A3)". Algorithm Theoretical Basis Document. Collection 5. Numerical Terradynamic Simulation Group. College of Forestry and Conservation. The University of Montana.
- Nadzri, M. I., y Hashim M. (2014): "Validation of MODIS Data for localized spatio-temporal evapotranspiration mapping". *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, 18(1), 012183, doi:10.1088/1755- 1315/18/1/012183.
- 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". 8vo Encuentro Internacional del E-ICES en Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Quattrocchio, M.E.; Borromei, A.M., Deschamps, C.M., Grill, S.C. and Zavala, C.A. (2008): "Landscape evolution and climate changes in the Late Pleistocene–Holocene, southern Pampa (Argentina)". *Evidence from palynology, mammals and sedimentology. Quaternary International* 181: 123-138
- 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 Sens.*, 6(8), 7406–7423, doi:10.3390/rs6087406.
- Rivas, R. (2004): "Propuesta de un modelo operativo para la estimación de la evapotranspiración". Tesis doctoral, Universidad de Valencia, Valencia, España 140 pp.
- 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". Libro de actas: XVII Simposio Internacional En Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica SELPER. 7 al 11 de Noviembre. 1397-1404.

- Rivas R. y Ocampo D. (2009): "Comportamiento del balance de energía en un cultivo de Avena sativa L. Estudios en la Zona no saturada del Suelo", Vol IX O. Silva et al. Barcelona, 18 a 20 de Noviembre.
- Ruhoff, A. L., Paz, A. R. Aragao, L. E., Mu, Q., Malhi, Y., Collischonn, W., Rocha, H. R. and Running, S. W. (2013): "Assesment of the MODIS global evapotranspiration using Eddy Covariance measurements and hydrological modelling in the Rio Grande basin". *Hydrol. Sci. J.* 58, 1-19, <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2013.837578>.
- Silicani, M. R. (2015): "Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo". Tesis de especialización. Universidad de Cuyo, Argentina.
- Teuling, A. J., Hirschi, M., Ohmura, A., Wild, M., Reichstein, M., Ciais, P., et al. (2009): "A regional perspective on trends in continental evaporation". *Geophysical Research Letters*, 36, L02404.
- Thornthwaite, C.W. (1948): "An approach toward a rational classification of Climate". *Geographical Review*, 38: 55-94.
- Weinzettel P. y Usunoff E. (2001): "Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada". En: A. Medina, J. Carrera y L. Vives (Ed.). *Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas*, Tomo I, 225-232.
- Wilrich, P.T. (2007): "Robust estimates of the theoretical standard deviation to be used in interlaboratory precision experiments" *Accred. Qual. Assur.*, vol. 12, pp. 231–240.
- WWW1: NTSG "Numerical Terradinamic Simulation Group", "Modeling and Monitoring Ecosystem Function At Multiples Scales" (2013) <http://www.ntsg.umt.edu/project/mod16>, The University Of Montana.
- WWW2: USGS "United States Geological Survey", "Science for a changing world" (2017) <https://glovis.usgs.gov/next/>