

Evaluación del producto NASA-POWER para estimar la evapotranspiración de referencia en el sudeste de Córdoba

Lucas Alberto Gusmerotti^{1,2}, Jorge Luis Mercáu³, Natalia Noemí Gattinoni¹ y Carlos Marcelo Di Bella^{4,5}

¹ Instituto de Clima y Agua, INTA. De Los Reseros y N. Repetto S/N (Hurlingham, Buenos Aires). gusmerotti.lucas@inta.gob.ar, gattinoni.natalia@inta.gob.ar

² Cátedra de Manejo y Conservación de Suelos, FCyF, UNLP.

³ AER San Luis, INTA. mercáu.jorge@inta.gob.ar

⁴ Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información (FAUBA). carlos.m.dibella@gmail.com

⁵ IFEVA (FAUBA, CONICET)

Resumen. La cuantificación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) resulta de utilidad para diferentes aplicaciones. Sin embargo, su estimación está limitada por la carencia de instrumentos y redes de observación terrestres. Actualmente, se dispone de productos satelitales grillados de reanálisis que surgen como alternativa para estimar variables meteorológicas espacialmente explícitas a escala local y regional. El objetivo de este trabajo fue evaluar la estimación de la ET_o diaria mediante el producto de reanálisis NASA-POWER en el sudeste de Córdoba. Mediante el modelo Penman-Monteith, se estimó la ET_o diaria a partir de los datos de temperatura, humedad, velocidad de viento y radiación solar obtenidos de dos estaciones meteorológicas convencionales y del producto NASA-POWER. Los resultados mostraron que NASA-POWER estimó precisamente la ET_o cuando se la comparó con aquella observada en las estaciones, con un R² cercano a 0,90 y errores inferiores a 1 mm.día⁻¹. Durante el verano NASA-POWER sobreestimó la ET_o, con mayores errores en la estimación; mientras que en invierno la sobreestimación se dio en valores superiores a 2 mm.día⁻¹. En los meses primaverales y otoñales el ajuste fue mayor, aunque los errores fueron levemente superiores a los meses invernales. Se concluye que el producto NASA-POWER puede reconstruir la falta de registros meteorológicos en el sudeste de Córdoba y a partir de ello estimar con bajo error la ET_o.

Palabras clave: datos de reanálisis, variables meteorológicas, Penman-Monteith.

1 Introducción

Después de la precipitación, la evapotranspiración (ET) es el componente más importante del ciclo terrestre del agua y es considerada como la pérdida del agua precipitada sobre los sistemas productivos. A través de la evaporación desde la superficie y la transpiración de los vegetales, la ET devuelve a la atmósfera más del 60% de las lluvias [1], por lo que ejerce una importante influencia sobre la disponibilidad de agua en la

superficie y constituye una de las variables más afectadas por los cambios climáticos globales. Además, la ET es un importante flujo de energía, ya que utiliza más de la mitad de la energía solar total absorbida por las superficies terrestres [2]. En este contexto, una estimación precisa de la ET no sólo responde a la creciente competencia por las limitadas reservas hídricas, sino que también es esencial para proyectar los posibles cambios en el ciclo hidrológico mundial en diferentes escenarios de cambio climático.

La gestión del agua en sistemas agrícolas y forrajeros requiere la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos y recursos forrajeros en condiciones estándar (ETc). La ETc se estima a partir de la evapotranspiración de una cobertura de referencia (ETo) y un coeficiente que varía con el tipo y el estado de un determinado cultivo (Kc) [3]. Así, la ETo constituye un componente fundamental del balance hídrico y un factor clave en la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. Su estimación resulta de utilidad para la producción vegetal, la realización de estudios ambientales, la programación del riego, la implementación de modelos de simulación y la planificación integral de los recursos hídricos.

La ETo se define como la tasa de evaporación y transpiración de un cultivo de referencia hipotético que se asemeja a una superficie extensa de hierba verde de altura uniforme, en crecimiento activo, con un suministro adecuado de agua y que sombrea completamente al suelo [3]. Aunque existen diferentes modelos que estiman la ETo a partir de variables meteorológicas (e.g. temperatura, velocidad de viento, humedad relativa y/o radiación solar), la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) considera la ecuación Penman-Monteith (PM)-FAO56 [3] como un estimador robusto de la ETo a nivel mundial [4-6]. Dicho método ha sido ampliamente validado en numerosas regiones y en condiciones climáticas contrastantes, lo que implica que puede utilizarse globalmente sin necesidad de calibración de parámetros adicionales [7]. En la provincia de Córdoba se han empleado diferentes métodos para estimar la ETo a través de estaciones meteorológicas distribuidas en diferentes localidades [8-11]. La mayoría de los autores concluyen que el método más recomendado para estimar la ETo corresponde a la metodología de PM, incluso en situaciones de alta nubosidad [8]. Sin embargo, el modelo PM requiere determinados parámetros que no siempre se encuentran disponibles (e.g. la radiación solar), lo cual limita su implementación a través de estaciones meteorológicas que carecen de los instrumentos de medición apropiados. En este sentido, la utilización de datos grillados de reanálisis surge como alternativa para superar la insuficiencia de observaciones y para obtener información espacialmente explícita sobre determinadas variables meteorológicas tanto a nivel local como regional [12].

Los productos de reanálisis estiman diferentes variables atmosféricas y de la superficie terrestre a partir de sistemas numéricos de asimilación y diferentes fuentes de información (satélites, imágenes de radar y redes de observaciones). Existen diferentes productos que proporcionan datos de reanálisis diarios [13-16], aunque, debido a la accesibilidad de la información y a su facilidad de uso, uno de los más ampliamente utilizados es el *National Aeronautics and Space Administration Prediction of Worldwide Energy Resource* (NASA-POWER) [17]. Con una disponibilidad a escala mundial, NASA-POWER proporciona datos diarios de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, precipitaciones y radiación solar. Todos los

conjuntos de datos están disponibles a escala local, regional y global, con una amplia cobertura temporal que se extiende desde 1981 hasta la actualidad. No obstante, la utilización de productos de reanálisis requiere validaciones previas mediante datos de observaciones para evaluar las eventuales anomalías que surgen de la modelización de determinadas variables de la superficie terrestre [18]. Investigaciones realizadas en los últimos años en diferentes regiones del mundo mostraron una significativa correlación entre variables estimadas por NASA-POWER y registradas en estaciones meteorológicas, principalmente para la temperatura del aire y la radiación solar [12,19]. Sin embargo, la precisión y la bondad de ajuste de las estimaciones de ETo derivadas del producto NASA-POWER varía a lo largo de diferentes regiones mediterráneas [7,20,21].

El objetivo de este trabajo fue evaluar la precisión de las estimaciones diarias de ETo mediante el método PM a partir de NASA-POWER en comparación con la ETo derivada de información proveniente de estaciones meteorológicas en el sudeste de la provincia de Córdoba. La obtención de un producto validado que permita estimar precisamente la ETo a partir de datos de reanálisis permite afrontar las problemáticas asociadas a la distribución heterogénea de estaciones meteorológicas y a la falta de registros en el área de estudio. Además, el empleo de productos grillados disponibles en tiempo real para estimar las necesidades hídricas de los cultivos resulta de gran utilidad para diferentes aplicaciones operativas, tanto en ámbitos agropecuario como ambientales.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

El sudeste de Córdoba (Figura 1) constituye una de las zonas más productivas de la provincia y se encuentra ocupado mayoritariamente por cultivos agrícolas y pasturas implantadas [22]. Posee un clima templado húmedo con una temperatura media anual de 17°C. El régimen pluviométrico oscila alrededor de 900 mm anuales, concentradas en el período primavera-estival. La zona fue seleccionada debido a que la producción agrícola-ganadera se realiza principalmente en condiciones de secano, donde la disponibilidad de agua en el suelo es crucial para asegurar un buen rendimiento de los cultivos. Además, en los últimos años, la zona ha estado sujeta a la ocurrencia de eventos extremos de sequías e inundaciones que han generado pérdidas de gran magnitud en la producción agropecuaria.

2.2 Fuentes de información

El período analizado comprendió desde el 01/01/1984 hasta el 31/12/2022. Se recopiló información diaria de dos estaciones meteorológicas convencionales pertenecientes al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), separadas a una distancia de aproximadamente 6 km (Figura 1). Ambas están incluidas en el Sistema de Información y Gestión Agrometeorológica del INTA (<http://siga.inta.gob.ar/#/>) y fueron seleccionadas porque brindan información homologada sobre variables meteorológicas y por el amplio período de registro (desde 1967 hasta la actualidad). Los datos diarios recopilados fueron: temperatura del aire

máxima y mínima (T_{max} y T_{min} en $^{\circ}C$), humedad relativa media (HR en %), velocidad del viento a 2 metros de altura (u_2 en $km.h^{-1}$) y radiación solar (R_s en $MJ.m^{-2}.día^{-1}$). En las dos estaciones meteorológicas, la R_s se estima a partir del método de Angström-Prescott [23], el cual utiliza como variable de entrada la heliofanía relativa. Por su parte, en la estación SMN la velocidad del viento a 2 metros de altura corresponde al 80% de la velocidad de viento medida a 10 metros [24].

Los datos de reanálisis se descargaron del geportal climático de NASA-POWER, el cual es de acceso libre y gratuito y permite extraer información grillada a escala diaria y mundial, con un tamaño de celda de $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$. Dentro de la comunidad “*agroclimatology*” del producto NASA-POWER, las mismas variables observadas por las estaciones, para el mismo período, se obtuvieron a partir del pixel correspondiente a la ubicación de cada estación.

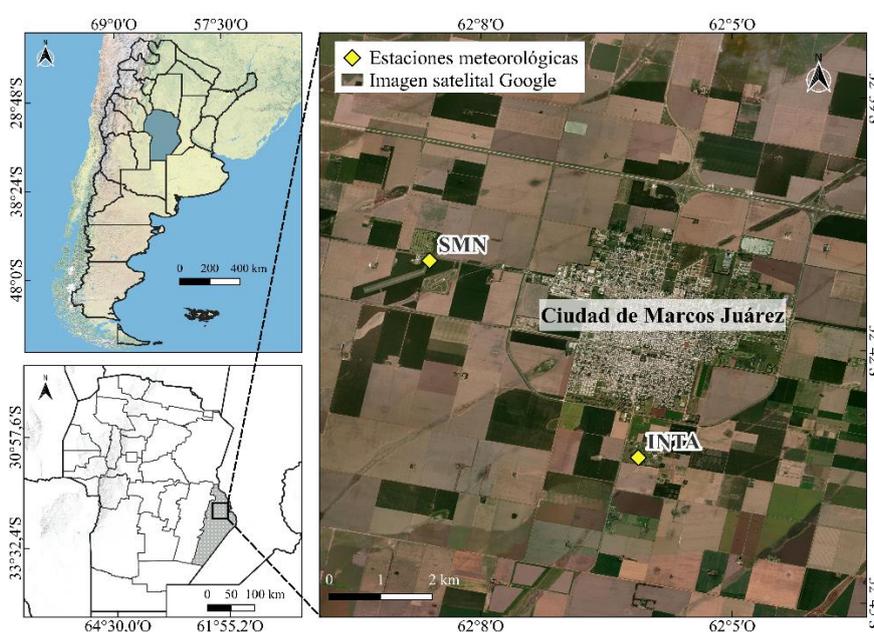


Fig. 1. Área de estudio y ubicación de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) y al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Fuente: elaboración propia.

2.3 Evapotranspiración de referencia

La ETO a escala diaria se calculó mediante el método FAO-56 PM (Ecuación 1) a partir de las variables registradas en las estaciones y aquellas estimadas por NASA-POWER. FAO-56 PM es considerado como el mejor método para la estimación de ETO y es uno de los más precisos comparado con mediciones lisimétricas [25].

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

Donde Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de vapor ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo de referencia ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), G es el flujo del calor del suelo ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), T es la temperatura media del aire ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad media del viento a 2 metros de la superficie ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), e_s constituye la presión de vapor de saturación (kPa), e_a es la presión real de vapor (kPa) y $(e_s - e_a)$ es el déficit de presión de vapor (kPa). Para intervalos de tiempo diarios, los valores de G son relativamente pequeños y, por lo tanto, el término es despreciado [3]. R_n se calcula con la Ecuación 2.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (2)$$

Donde R_{ns} es la radiación neta de onda corta ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), dada por la Ecuación 3, y R_{nl} es la radiación neta de onda larga ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), calculada por la Ecuación 4.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (3)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max}^4 + T_{\min}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right)) \quad (4)$$

Donde R_s es la radiación solar global, α es el albedo de un cultivo herbáceo hipotético de referencia, T_{\max} y T_{\min} son la temperatura máxima y mínima del aire (K) respectivamente, y R_{so} es la radiación solar con cielo despejado ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$), dada por la Ecuación 5.

$$R_{so} = (0,75 + 2z10^{-5}) \cdot R_a \quad (5)$$

Donde z es la altitud de la estación (metros sobre el nivel del mar) y R_a es la radiación extraterrestre ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$). Los valores de z en cada estación fueron de 114 m para la del SMN y de 110 para la del INTA. Los parámetros R_a , e_a y Δ fueron calculados a través de las ecuaciones recomendadas por la FAO [3], las cuales no fueron descriptas en este trabajo. La información de viento a 2 metros de altura, expresada en $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ en las estaciones meteorológicas, se convirtió a $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ para su implementación en el modelo PM.

2.4 Evaluación de la precisión

En cada estación meteorológica, los valores diarios de ET_o estimados a partir de la información provista por NASA-POWER se compararon con aquellos obtenidos mediante los registros de las estaciones. Tanto en la estación INTA como SMN, los días que presentaron datos faltantes de temperatura, humedad, velocidad de viento y/o ra-

diación solar fueron descartados. Los estadísticos analizados fueron (Tabla 1): el Coeficiente de Regresión (b), el Coeficiente de Determinación (R^2), el Error Medio (EM) y su normalización (EMN), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) y el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS). Valores de b cercanos a 1 indican que las variables están estadísticamente relacionadas, mientras que $b > 1$ sugiere una sobreestimación y $b < 1$ una subestimación de la ETo. Un $R^2 > 0,75$ indica que la mayor parte de la varianza de los valores observados es explicada por el modelo de estimación con ajuste significativo, mientras que valores de R^2 de 0,25, 0,50 corresponden a un ajuste débil y moderado, respectivamente [26]. El EM provee información sobre del sesgo de la estimación y permite cuantificar la sobreestimación o subestimación, mientras que el EMN relaciona el EM con la media de las observaciones. La RMSE mide las diferencias globales entre los valores observados y estimados, por lo que debe ser lo más baja posible. El ENS cuantifica la precisión en la estimación de la ETo por parte de NASA-POWER en relación con la media de la ETo observada. Valores de ENS cercanos a 1 indican una estrecha correlación entre la ETo medida y estimada.

Tabla 1. Estadísticos analizados para evaluar la precisión de NASA-POWER. E: dato observado en la estación meteorológica, \bar{E} : promedio de datos observados, S: dato estimado por NASA-POWER, \bar{S} : promedio de datos estimados por NASA-POWER, n: número de observaciones.

Estadístico	Ecuación	Valor óptimo
Coeficiente de regresión	$b = \frac{\sum_{i=1}^n E_i S_i}{\sum_{i=1}^n E_i^2}$	1
Coeficiente de Determinación	$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \bar{E}) (S_i \bar{S})}{\left[\sum_{i=1}^n (E_i \bar{E}) \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (S_i \bar{S}) \right]^{0.5}} \right\}^2$	1
Raíz del Error Cuadrático Medio	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i S_i)^2}{n}}$	0
Error Medio	$EM = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - E_i)}{n}$	0
Error Medio Normalizado	$EMN = \frac{EM}{\bar{E}} \times 100$	< 15%
Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$ENS = 1 - \frac{\sum (S-E)^2}{\sum (E-\bar{E})^2}$	1

3 Resultados y discusión

La ETo media registrada por la estación meteorológica de INTA fue de 3,18 mm.día⁻¹, con un mínimo de 0,48 mm.día⁻¹ y un máximo de 9,74 mm.día⁻¹. En la estación SMN, la ETo osciló entre 0,24 mm.día⁻¹ y 11,59 mm.día⁻¹, con un valor promedio de 3,35 mm.día⁻¹. Por su parte, a partir de los datos NASA-POWER se obtuvo un promedio de ETo de 3,63 mm.día⁻¹, con un mínimo de 0,50 mm.día⁻¹ y un máximo de 12,05 mm.día⁻¹. De esto se desprende que hubo una diferencia de 0,45 mm.día⁻¹ en la ETo media NASA-POWER con respecto a la estación INTA y de 0,28 mm.día⁻¹ en comparación con la estación SMN (Figura 2).

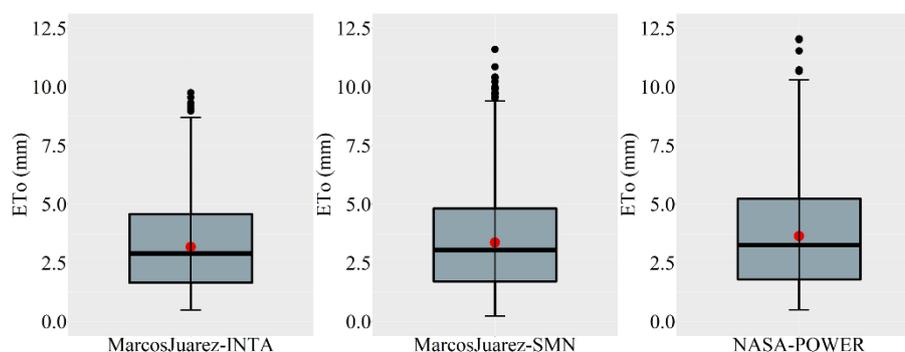


Fig. 2. Diagramas de caja de la evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos observados y aquella estimada mediante los datos NASA-POWER. El punto rojo representa la media de los valores de ETo.

El ajuste entre la ETo diaria observada y la ETo NASA-POWER en ambas estaciones fue significativo, con un R^2 cercano a 0,90 (Figura 3). Además, se evidenció una tendencia a la sobreestimación de la ETo por parte de NASA-POWER ($b > 1$ y EM y EMN > 0 mm.día⁻¹), con un valor de RMSE $\approx 0,8$ mm.día⁻¹ (Tabla 2). Valores similares de b , EM y RMSE fueron reportados por Paredes *et al.* [6] y Pelosi *et al.* [27], quienes evaluaron la estimación de la ETo mediante el producto NASA-POWER a través de diferentes modelos en la península itálica y en Portugal, respectivamente. Estos errores observados en la estimación de la ETo podrían estar asociados a una menor precisión en la estimación de la humedad relativa y la velocidad de viento a 2 metros de altura por parte del producto NASA-POWER [12]. Sin embargo, a pesar de la tendencia a la sobreestimación, los valores de RMSE y EM < 1 mm. día⁻¹ y una ENS $> 0,75$ (Tabla 2) demuestran que la información provista por NASA-POWER tiende a estimar eficientemente la ETo en ambas estaciones [7]. Esto implica que el producto NASA-POWER es un buen estimador de los valores de ETo mediante el método PM.

Tabla 2. Estadísticos de la comparación entre la ETo estimada con NASA-POWER y aquella estimada por las estaciones INTA y SMN.

Estadístico	Estación INTA	Estación SMN
b	1,14	1,07
RMSE (mm)	0,83	0,81
EM (mm)	0,46	0,31
EMN (%)	14,71	9,28
ENS	0,77	0,82
n	6547	6940

Para realizar un análisis más detallado, se realizó una evaluación estacional de la estimación de la ETo. Los valores de ETo diaria en los trimestres primaverales (septiembre, octubre y noviembre) y otoñales (marzo, abril y mayo) de ambas estaciones presentaron la mejor correlación ($R^2 \geq 0,79$), tanto en la estación INTA como en la

estación SMN. En el trimestre estival (diciembre, enero y febrero) se observó una tendencia a sobreestimar los valores de ETo por parte del producto NASA-POWER. Asimismo, durante el periodo invernal (junio, julio y agosto) se evidenció una sobreestimación de los valores por debajo de 2 mm.día⁻¹, mientras que, por encima de dichos valores, existió una tendencia a la subestimación (Figuras 4 y 5). En el mismo sentido, a través de la evaluación de la variación intermensual de los estadísticos de ambas estaciones se evidenció que los meses de junio y julio la precisión en la estimación de la ETo fue mayor (Figura 6). Los valores de ENS alcanzado en los meses invernales oscilaron entre 0,50 y 0,70, con un EM<0,15 mm y una RMSE que osciló entre 0,33 y 0,53 mm en la estación INTA y entre 0,41 y 0,59 mm en la estación SMN (Figuras 6 y 7). Por el contrario, el mes de enero fue el que presentó mayores errores en la estimación de ETo, con valores máximos de EM=0,96 mm y RMSE de 1,29 mm y 1,36 mm para INTA y SMN, respectivamente. En ambas estaciones, se obtuvieron valores de ENS entre 0,20 y 0,30 durante los meses de enero y febrero, con un valor de EMN de alrededor de 18%.

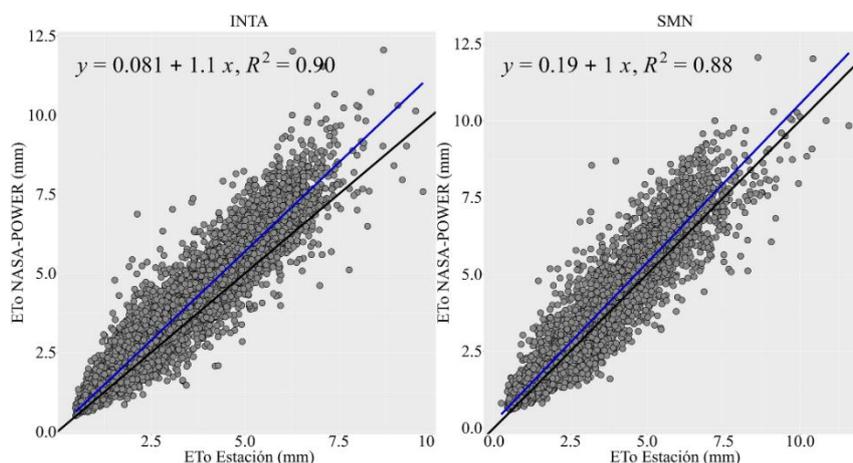


Fig. 3. Diagramas de dispersión entre la evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos observados (ETo Estación) y aquella estimada mediante los datos NASA-POWER (ETo NASA-POWER). La línea sólida azul corresponde a la tendencia lineal, mientras que la línea sólida negra representa el ajuste 1:1.

Uno de los motivos de los mayores errores y la menor precisión de los meses de verano podría estar asociado a la sobreestimación de la radiación por parte de NASA-POWER durante los meses más cálidos, en los cuales el término de radiación de la ecuación PM ejerce un mayor peso en la estimación de la ETo [25,27]. En este aspecto, Bois *et al.* [25] realizaron un análisis de sensibilidad del uso de radiación obtenida por sensores remotos en la fórmula PM en Francia y reportaron mayores errores durante el verano, donde la radiación solar tiene mayor impacto en el modelo (con valores elevados de ETo). Además, estos autores destacan que el uso de modelos que se rigen principalmente por las transferencias radiativas (*e.g.* modelos de Hargreaves y de Priestley–

Taylor) conduce a sesgos más elevados y mayoritariamente negativos cuando se reemplazan valores de radiación medidos por aquellos estimados por sensores remotos. Asimismo, también se debe tener en cuenta, sobre todo durante los meses invernales, la presencia de días con nubosidad, dado que la cobertura nubosa atenúa la radiación solar en su trayecto hacia la superficie del planeta. Ciertos trabajos reportan que el índice de claridad de la atmósfera incide en la precisión y en los errores de estimación de la radiación, por lo cual puede inferirse su efecto en la ETo [25,28]. Por otro lado, otro aspecto a considerar es la estimación de la radiación por parte de las estaciones meteorológicas INTA y SMN, las cuales utilizan el método de Angström-Prescott [23], basado en la heliofanía relativa como variable independiente para la determinación de la radiación global. En este sentido, De la Casa *et al.* [29] evaluaron diferentes modelos de estimación de la radiación en la provincia de Córdoba a partir de la información provista por la estación meteorológica del SMN, una de las utilizadas en este trabajo. Los resultados de estos autores mostraron que, si bien el método de Angström-Prescott fue uno de los que menos errores produjo, para la localidad de Marcos Juárez se alcanzó una RMSE de $3,33 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$. Estos resultados podrían explicar, en parte, el menor ajuste en la estimación de la ETo por parte del producto NASA-POWER durante los meses invernales y estivales, donde el término radiación adquiere mayor en el modelo PM.

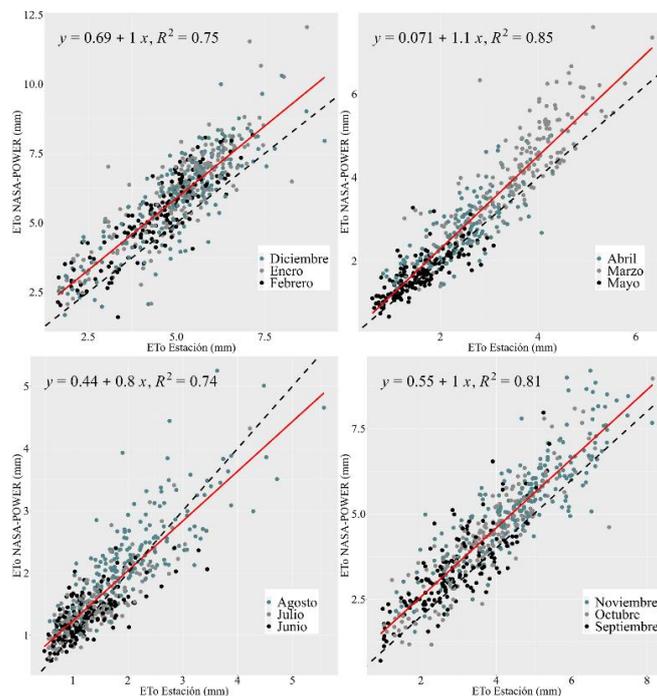


Fig. 4. Diagramas de dispersión trimestrales entre la evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos observados en la estación INTA (ETo Estación) y aquella estimada mediante los datos NASA-POWER (ETo NASA-POWER). La línea sólida roja corresponde a la tendencia lineal, mientras que la línea punteada negra representa el ajuste 1:1.

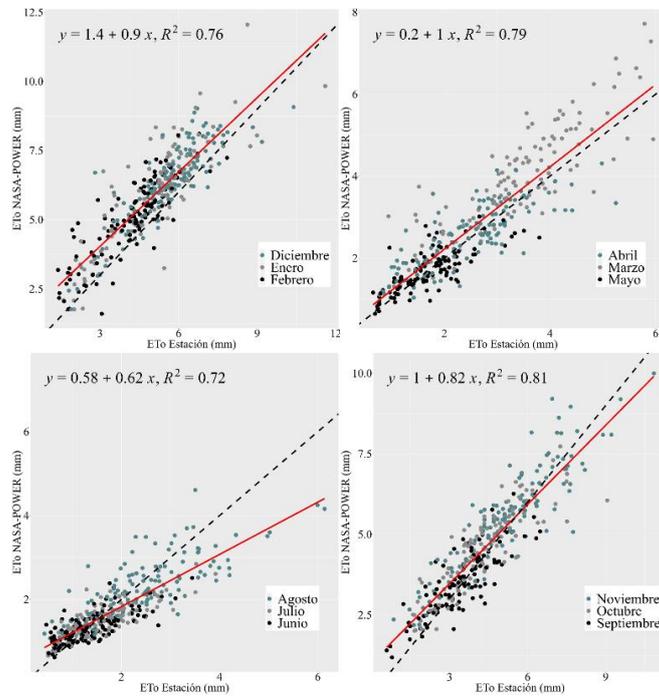


Fig. 5. Diagramas de dispersión trimestrales entre la evapotranspiración de referencia estimada a partir de los datos observados en la estación SMN (ETo Estación) y aquella estimada mediante los datos NASA-POWER (ETo NASA-POWER). La línea sólida roja corresponde a la tendencia lineal, mientras que la línea punteada negra representa el ajuste 1:1.

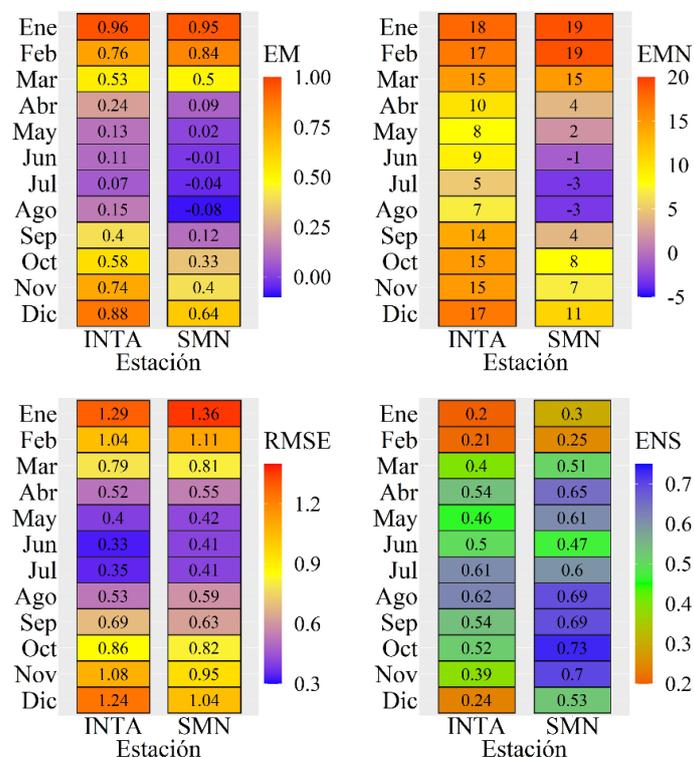


Fig. 6. Variación mensual de los estadísticos analizados en la comparación de la ETo estimada por el producto NASA-POWER y la observada en las estaciones.

4 Conclusiones

Se evaluó la información provista por NASA-POWER como alternativa para estimar la ETo mediante el modelo PM en el sudeste de Córdoba. Los resultados obtenidos muestran que, a partir de las variables meteorológicas NASA POWER se puede realizar una estimación de la ETo con bajo error, lo cual resulta aceptable para determinados análisis agrícolas y/o ambientales, sobre todo en áreas de secano. La comparación de la ETo estimada con la observada en dos estaciones meteorológicas convencionales permitieron alcanzar valores de R^2 cercanos a 0,90, con errores (EM y RMSE) inferiores a 1 mm.día^{-1} y una ENS $> 0,75$. En la evaluación intermensual, los mejores ajustes se observaron durante los meses primaverales y otoñales, mientras que los meses invernales y estivales presentaron mayores errores y una menor correlación entre la ETo estimada y observada.

Los resultados antes mencionados permitirían afirmar que, independientemente de los errores de estimación, los productos de reanálisis NASA-POWER son adecuados para estimar la ETo en zonas donde la mayoría de las variables climáticas pueden no estar disponibles. Esto adquiere gran utilidad en áreas con escasa información meteo-

rológica, sobre todo histórica, o con redes de medición dispersas e irregulares que requieran estimar la ETo en diferentes aplicaciones hidrológicas, agronómicas o ambientales.

Referencias

1. Guo D., Westra, S., Maier, H. R. Sensitivity of potential evapotranspiration to changes in climate variables for different Australian climatic zones. *Hydrology and Earth System Sciences* 21(4), 2107–2126 (2017).
2. Mu, Q., Zhao, M. Running, S.W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment* 115, 1781–1800 (2011).
3. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper* 56 (1998).
4. Mohawesh, O.E., Talazi, S.A. Comparison of Hargreaves and FAO56 equations for estimating monthly evapotranspiration for semi-arid and arid environments. *Archives of Agronomy and Soil Science* 58, 321–334 (2012).
5. Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y., Xie, Z. Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman-Monteith method and the potential influences in northeast China. *Meteorological Applications* 26, 83–96 (2019).
6. Paredes, P., Fontes, J.C., Azevedo, E.B., Pereira, L.S. Daily reference crop evapotranspiration in the humid environments of Azores islands using reduced data sets: Accuracy of FAO-PM temperature and Hargreaves-Samani methods. *Theoretical and Applied Climatology* 134, 595–611 (2018).
7. Rodrigues, G. C., Braga, R. Estimation of Daily Reference Evapotranspiration from NASA POWER Reanalysis Products in a Hot Summer Mediterranean Climate. *Agronomy* 11(10), 2077 (2021).
8. López, M. L. Análisis de los métodos de estimación de evaporación y evapotranspiración a las condiciones locales de la ciudad de Córdoba. Tesis de Maestría en Ciencias Hídricas. Santa Rosa, La Pampa, (2011).
9. De la Casa, A., Ovando, G.G. Climate change and its impact on agricultural potential in the central region of Argentina between 1941 and 2010. *Agricultural and Forest Meteorology* 195-195, 1-11 (2014).
10. Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., Degano, M. F., Kruse, E., Bayala, M. Evaluación de dos modelos para la estimación de la evapotranspiración de referencia con datos CERES. *Asociación Española de Teledetección, Revista de Teledetección* 51, 87-98 (2018).
11. Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Niclós, R., Sánchez, J.M. Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences* 24, 319-328 (2021).
12. Rodrigues, G. C., Braga, R. Evaluation of NASA POWER Reanalysis Products to Estimate Daily Weather Variables in a Hot Summer Mediterranean Climate. *Agronomy* 11(6), 1207 (2021).
13. Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de

- Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J., Park, B. K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. N., Vitart, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137, 553-597 (2011).
14. Kobayashi, S., Yukinari, O.T.A., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Miyaoka, K., Takahashi, K. The JRA-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II Ser. II* 93, 5-48, (2015).
15. Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S.K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., Potter, G.L. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83, 1631-1644 (2002).
16. Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., Kim, G., Bloom, S., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., da Silva, A., Gu, W., Joiner, J., Koster, R. D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P., Redder, C. R., Reichle, R., Robertson, F. R., Ruddick, A. G., Sienkiewicz, M., Woollen, J. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of Climate* 24 (14), 3624-3648 (2011).
17. Chandler, W.S., Hoell, J. M., Westberg, D., Zhang, T., Stackhouse, P. W., Jr. NASA prediction of worldwide energy resource high resolution meteorology data for sustainable building design. In *Proceedings of the Solar 2013 Conference of American Solar Energy Society*, Baltimore, MD, USA, 16-20 April 2013.
18. Sheffield, J., Ziegler, A.D., Wood, E.F., Chen, Y. Correction of the high-latitude rain day anomaly in the NCEP-NCAR reanalysis for land surface hydrological modeling. *Journal of Climate* 17, 3814-3828 (2004).
19. Sayago, S., Ovando, G., Almorox, J., Bocco, M. Daily solar radiation from NASA-POWER product: assessing its accuracy considering atmospheric transparency. *International Journal of Remote Sensing* 41(3), 897-910 (2019).
20. Srivastava, P.K., Singh, P., Mall, R.K., Pradhan, R.K., Bray, M., Gupta, A. Performance assessment of evapotranspiration estimated from different data sources over agricultural landscape in Northern India. *Theoretical and Applied Climatology* 140, 145-156 (2020).
21. Monteiro, A.L., Sentelhas, P.C., Pedra, G.U. Assessment of NASA/POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *International Journal of Climatology* 38, 1571-1581 (2018).
22. García, C. L., I. Teich, A. Kindgard, M. J. Bosio, A. Ravelo, M. Piumetto, H. Morales, Fuentes, M. L. Mapas de cobertura del suelo de la provincia de Córdoba 2017/2018. Informe técnico. Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y Ministerio de Finanzas de la provincia de Córdoba. Córdoba, Córdoba, Argentina. 2018.
23. Rietveld, M. R. A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. *Agricultural Meteorology* 19, 243-252 (1977).
24. Fernández Long, M. E., Spescha, L., Barnatán, I., Murphy, G. Modelo de Balance Hidrológico Operativo para el Agro (BHOA). *Revista Agronomía & Ambiente FAUBA* 32 (1-2), 31-47 (2012).

25. Bois, B., Pieri, P., Van Leeuwen, C., Wald, L., Huard, F., Gaudillere, J.P., Saur, E. Using remotely sensed solar radiation data for reference evapotranspiration estimation at a daily time step. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 619-630 (2008).
26. Henseler, J., Ringle, C., Sinkovics, R. The use of partial least squares path modeling in international marketing. In *New Challenges to International Marketing*; Emerald Group Publishing Limited: Bingley, UK, 20, 277-320 (2009).
27. Pelosi, A., Terribile, F., D'Urso, G., Chirico, Giovanni Battista. Comparison of ERA5-Land and UERRA MSCAN-SURFEX Reanalysis Data with Spatially Interpolated Weather Observations for the Regional Assessment of Reference Evapotranspiration. *Water* 12, 1669 (2020).
28. Sayago, S., Ovando, G., Bocco, M. Estimación de radiación solar diaria a partir de imágenes NASA-POWER con distintos índices de claridad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 21, 49-58 (2017).
29. De La Casa, A., Ovando, G., Rodríguez, A. Estimación de la radiación solar global en la provincia de Córdoba, Argentina, y su empleo en un modelo de rendimiento potencial de papa. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (INTA)*, 32 (2), 45-62 (2003).