

DOI: 10.24850/j-tyca-2024-04-04

Artículos

Determinación de la evapotranspiración con datos satelitales y de reanálisis utilizando *Google Earth Engine*

Evapotranspiration determination with satellite and reanalysis data using Google Earth Engine

María Florencia Degano¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8365-6085>

Raúl Eduardo Rivas², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3027-5529>

Martín Ignacio Bayala³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8617-8357>

¹Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Instituto de Hidrología de Llanuras, Tandil, Buenos Aires, Argentina, mfdegano@ihlla.org.ar

²Comisión de Investigaciones Científicas, Instituto de Hidrología de Llanuras, Tandil, Buenos Aires, Argentina, rrivas@rec.unicen.edu.ar

³Comisión de Investigaciones Científicas, Instituto de Hidrología de Llanuras, Tandil, Buenos Aires, Argentina, martinbayala@gmail.com

Autora para correspondencia: María Florencia Degano, mfdegano@ihlla.org.ar

Resumen

Los flujos verticales, dentro del ciclo hidrológico, son una de las variables de mayor relevancia en zona de llanura, dado que las pendientes varían entre 0 y 5%, y los flujos horizontales no son significativos. En este sentido, la evapotranspiración juega un rol fundamental en el manejo hídrico, ya que alrededor del 85% del agua que sale del sistema lo hace mediante este proceso, requiriendo una cuantificación precisa. El objetivo principal de este trabajo es calcular la evapotranspiración potencial y real (ETp y ETr) con datos de satélite y reanálisis mediante el uso de la plataforma *Google Earth Engine*. Para su cálculo se tomó la ecuación de Priestley-Taylor (PT) combinado con información de humedad de suelo, con una resolución espacio-temporal de 250 x 250 m cada ocho días, en la región pampeana argentina (RPA). El producto se valoró en siete estaciones de la RPA, cuyos resultados mostraron, para la ETp, un R-RMSE (*error cuadrático medio robusto*) de 0.5 mm d⁻¹; un error sistemático (mediana) de 0.3 mm d⁻¹, y el error aleatorio (RSD-*desviación estándar robusta*) de 0.5 mm d⁻¹; mientras que para la ETr, estos valores son de 0.6, -0.2 y 0.5 mm d⁻¹, respectivamente. Los resultados globales muestran que el método utilizado es una herramienta válida para caracterizar la ET en la RPA y que se puede usar para analizar su variabilidad espacio-temporal en diferentes condiciones extremas y realizar estudios ambientales aplicados.

Palabras clave: MODIS, NOAA, SMAP, Priestley-Taylor, región pampeana argentina.

Abstract

Vertical flows, within the hydrological cycle, are one of the most relevant variables in the plains, since slopes vary between 0 and 5%, and horizontal flows are not significant. In this sense, evapotranspiration plays a fundamental role in water management since about 85% of the water leaving the system does so through this process, requiring precise quantification. The main objective is to calculate potential and actual evapotranspiration (ET_p and ET_a) with satellite and reanalysis data using Google Earth Engine platform. For its calculation, the Priestley-Taylor (PT) equation combined with soil moisture information was used, with a spatio-temporal resolution of 250 x 250 m every eight days, in the Argentine Pampas region (APR). The product was valued in seven stations of the APR, whose results showed, for ET_p, an R-RMSE (Robust Root Mean Square Error) of 0.5 mm d⁻¹, a systematic error (Median) of 0.3 mm d⁻¹, and the random error (RSD- Robust Standard Deviation) of 0.5 mm d⁻¹; while, for ET_a, these values are 0.6, -0.2 and 0.5 mm d⁻¹, respectively. The overall results show that the method used is a valid tool to characterize ET in the APR and that it can be used to analyze its spatio-temporal variability under different extreme conditions and to carry out applied environmental studies.

Keywords: MODIS, NOAA, SMAP, Priestley-Taylor, Argentina Pampas region.

Recibido: 22/08/2022

Aceptado: 22/01/2023

Publicado Online: 25/01/2023

Introducción

Los flujos verticales dentro del ciclo hidrológico tienen un rol fundamental, en particular la evapotranspiración (ET), ya que en zonas de llanuras se pierde alrededor del 85% del agua del sistema mediante este proceso (Weinzettel & Usunoff, 2001).

En este sentido, y dado que dentro de los objetivos de la agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas se destaca la importancia de la disponibilidad y gestión sostenible del agua y saneamiento, así como promover la agricultura sostenible y tomar medidas urgentes en torno a combatir el cambio climático y sus impactos, el análisis y estudio del ciclo hidrológico, y en particular de los flujos verticales, en los cuales la atmósfera interactúa con el agua superficial, las superficies con vegetación y los suelos desnudos, es de vital importancia para el cuidado y gestión de los recursos tanto a nivel local como global (McMahon, Peel, Lowe, Srikanthan, & McVicar, 2013; Liu, Yao, & Wang, 2019; Peng *et al.*, 2019; Tasumi, 2019; Xiang, Li, Horton, & Feng, 2020; Degano, 2021a).

Con respecto a la evapotranspiración (ET), cuantificarla espacial y temporalmente tiene importancia en la gestión de los recursos hídricos; en la determinación de la huella hídrica (Liu & Yang, 2010; Olivera-Rodríguez *et al.*, 2020), y en la mejora de la productividad del agua y la seguridad alimentaria (Garg *et al.*, 2012; Liu, Zehnder, & Yang, 2009).

Según la escala de trabajo que se requiera, la ET se puede estimar con diversos métodos: (1) a escala puntual: porómetros, medidores de

flujo de savia en la planta y lisímetros de pesada (medida directa) (Allen, Pereira, Howell, & Jensen, 2011; Silicani, 2015; Faramiñán, Carmona, Rivas, Degano, & Olivera-Rodríguez, 2021a; Pendiuk, 2022); (2) a escala de parcela: balances de agua, relación de Bowen, sistemas *Eddy Covariance* y centilómetros, entre otros; (3) a escala regional: datos de satélite (Rivas & Carmona, 2010; Ocampo & Rivas, 2013; Degano, 2021a; Degano *et al.*, 2021b; Degano, Rivas, Carmona, Niclòs, & Sánchez, 2021c).

Estos métodos presentan errores asociados que pueden estar relacionados con el sensor (sesgo de calibración, funcionamiento, operación o ubicación incorrecta); con la interpretación o el procesamiento erróneo de los datos; con las características de la vegetación; con la medición, que incluye componentes aleatorios asociados con la resolución de las lecturas del sensor, el ruido electrónico, el ruido inducido mecánicamente, las respuestas térmicas de los sensores, la gestión de la vegetación y el agua del suelo, así como con otros errores aleatorios específicos para el tipo de sistema de medición (Allen *et al.*, 2011; Gao *et al.*, 2020).

Es importante destacar también los errores relacionados con los diferentes métodos de cálculo de ET (Allen *et al.*, 2011), en particular el balance de agua en el suelo, con un error típico de 10 a 30%; el balance de energía con teledetección, cuyo error oscila entre 10 y 20%; los gravímetros superconductores, que disminuyen el error del método a valores de 3 a 4% (Pendiuk, 2022).

En general, la medición directa de la ET ofrece grandes dificultades tanto a escala regional como global, dado que los factores que intervienen

en este proceso son diversos, y variables en el tiempo y en el espacio; es donde adquieren mayor relevancia los datos de satélite, que facilitan la determinación de la variación espacial y temporal de los diferentes términos de la ecuación de balance de energía (Brutsaert, 1984) a escalas espaciales que pueden ir desde parcelas hasta escala de cuenca, así como la obtención de datos a nivel global, al facilitar el estudio y análisis de la variabilidad climática.

Dentro de las plataformas de mayor envergadura e importancia en cuanto a las variables biofísicas se encuentran distintos satélites que portan sensores a diferentes resoluciones espectrales, espaciales y temporales (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las distintas misiones de satélite.

Misión/sensor	Años activo	Procedencia	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (días)
Landsat 1-9 (Tatem, Goetz, & Hay, 2008)	1972-Actualidad	NASA ¹ /USGS ²	30-60-100	16
CERES ³ (Smith <i>et al.</i> , 2011)	1997-Actualidad	NASA/JAXA ⁴	1°	1
MODIS ⁵ (Terra y Aqua) (Justice <i>et al.</i> , 1998)	1999-Actualidad	NASA	250-500-1 000	1
Copernicus Sentinel 1-6	2014-Actualidad	ESA ⁶	10-20-60	10
SMOS ⁷ (Barré, Duesmann & Kerr, 2008)	2009-Actualidad	ESA	50 000	3
SMAP ⁸ (Entekhabi <i>et al.</i> , 2010)	2015-Actualidad	NASA	36000	2-3
SAOCOM ⁹ 1 A y B (Giraldez, 2004)	2018-Actualidad	CONAE ¹⁰ /ASI ¹¹	10-100	16

¹National Aeronautics and Space Administration.

²United States Geological Survey.

³Clouds and the Earth's Radiant Energy System.

⁴Japan Aerospace Exploration Agency.

⁵Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

⁶European Space Agency.

⁷Soil Moisture and Ocean Salinity.

⁸Soil Moisture Active Passive.

⁹Satélite Argentino de Observación Con Microondas.

¹⁰Comisión Nacional de Actividades Espaciales.

¹¹Agencia Espacial Italiana.

Como complemento a la información que brindan las misiones satelitales, es importante destacar los conjuntos de datos de reanálisis (Tabla 2). Se trata de bases de datos que permiten desarrollar un registro completo de la variabilidad climática en el tiempo. Tienen en cuenta las observaciones y un modelo numérico que simula uno o más aspectos del sistema terrestre, y se combinan objetivamente para generar una estimación sintetizada del estado del sistema. Por lo general se extienden a lo largo de varias décadas y cubren todo el globo (Wielicki *et al.*, 1996; Rienecker *et al.*, 2011; Poli *et al.*, 2016).

Tabla 2. Características de los productos de reanálisis.

Base de datos de reanálisis	Periodo	Procedencia	Resolución espacial	Resolución temporal
ERA5 (Muñoz-Sabater, 2019)	1950-Actualidad	ECMWF ¹	3 000 m	3 horas
JRA-55 ² (Kobayashi & National Center for Atmospheric Research Staff, 2015)	1958-Actualidad	JMA ³	1.25°	6 horas
NOAA ⁴ -CFSV2 ⁵ (Saha <i>et al.</i> , 2011)	1979-Actualidad	NCEP ⁶ /CFS	22 264 m	6 horas
MERRA 2-GMAO ⁷ (Gelaro <i>et al.</i> , 2017)	1980-Actualidad	NASA	50 km	Diario

¹European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.

²Japanese 55-year Reanalysis.

³Japan Meteorological Agency.

⁴National Oceanic and Atmospheric Administration.

⁵Climate Forecast System versión 2.

⁶National Centers for Environmental Prediction.

⁷Modern Era Retrospective-analysis of Research and Applications of Global Modelling and Assimilation Office.

Las ventajas que presentan las plataformas satelitales y las bases de datos de reanálisis dieron lugar a un gran número de aplicaciones que permiten obtener variables de superficie a partir de datos registrados en diferentes sectores del espectro electromagnético. En relación con esto, es de gran utilidad la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que combina diferentes catálogos de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales en un mismo sitio, y opera íntegramente en la nube.

La plataforma GEE de uso gratuito proporciona acceso a (1) imágenes de teledetección disponibles públicamente y productos procesados para su uso directo con una aplicación web de exploración; (2) procesamiento paralelo de alta velocidad y algoritmos de aprendizaje automático que utilizan la infraestructura informática de Google, y (3) una biblioteca de interfaces de programación de aplicaciones (API) con entornos de desarrollo que admiten lenguajes como JavaScript y Python. Juntas, estas características principales permiten a los usuarios descubrir, analizar y visualizar grandes datos geoespaciales sin necesidad de acceso a súpercomputadoras o experiencia en codificación especializada. El desarrollo de GEE ha generado entusiasmo y compromiso en los campos de la ciencia de datos geoespaciales y la teledetección. Sin embargo, después de una década desde que se lanzó GEE, su impacto en la ciencia geoespacial y la teledetección no se ha explorado a profundidad (Mutanga & Kumar, 2019; Tamiminia *et al.*, 2020).

En este sentido, el objetivo general del presente trabajo es estimar la evapotranspiración potencial (ET_p) y real (ET_r) aplicando la ecuación de Priestley-Taylor combinada con datos de humedad de suelo (H_s),

utilizando la plataforma GEE, con una resolución espacial de 250 x 250 m y temporal de ocho días. Para este fin se incorporan datos de entrada a la ecuación de ET de NOAA/CFSV2, MODIS y SMAP, que serán evaluados con la base de datos NASA Power y con datos de campo. Además, se valorará el producto de ETp y ETr con datos de ET medidos *in situ*. Por último, se busca analizar el comportamiento de la ET a escala espacial por medio de mapas regionales.

Metodología

Desarrollo del modelo. Ecuación de Priestley-Taylor

Haciendo uso de la plataforma en línea GEE se determinó la ETp y la ETr con una resolución espacial de 250 x 250 m y temporal de ocho días, este rango temporal definido es capaz de representar el desarrollo vegetativo de las plantas/cultivos. Para el cálculo de ETp (en este caso es sinónimo de ET₀, porque se trabaja sobre parcelas experimentales de pasto corto), se utilizó como base la ecuación de PT (Ecuación (1)) (Priestley & Taylor, 1972) para obtener un modelo robusto, sencillo y de fácil aplicación. La consistencia del método está demostrada por diferentes autores (Stannard, 1993; Fisher, Tu, & Baldocchi, 2008; Rivas & Carmona, 2010; Miralles *et al.*, 2011; Marshall, Tu, & Andreo, 2020; Chandrasekar *et al.*, 2022; entre otros), que utilizan la ecuación de PT para determinar ET:

$$ETp_{PT} = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) (Rn - G) \quad (1)$$

siendo:

α = equivalente a 1.26

Δ = pendiente de la curva de saturación de vapor (Ecuación (2)) (kPa °C⁻¹)

γ = constante psicrométrica (Ecuación 4)

R_n = radiación neta (Ecuación 6)

G = flujo de calor en el suelo (este parámetro se desprecia en proporción al valor de R_n (Rivas y Ocampo, 2009)).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_a + 237.3)^2} \quad (2)$$

donde:

e_s = equivale al promedio de la presión de saturación de vapor del aire (kPa)

T_a = temperatura del aire (°C)

$$e_s = 0.6108 \exp\left(\frac{17.27 T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (3)$$

siendo:

$\exp$ = 2.7183 (base de ln) elevado a una potencia

$$\gamma = \frac{C_p P_{atm}}{\xi \lambda} \quad (4)$$

donde:

C_p = calor específico del aire y equivale a 1.013×10^{-3} (MJ kg⁻¹ °C⁻¹)

P_{atm} = presión atmosférica (kPa)

ξ = cociente del peso molecular del vapor de agua/aire seco = 0.622

λ = equivale al calor latente de vaporización (MJ kg⁻¹) (Ecuación (5))

$$\lambda = 2.501 - (0.002631 T_a) \quad (5)$$

$$Rn = (1 - alb) R_s^\downarrow + (\varepsilon R_l^\downarrow - \varepsilon \sigma T_s^4) \quad (6)$$

donde:

alb = albedo (adimensional)

$R_s^\downarrow$ = radiación de onda corta entrante (Wm⁻²)

ε = emisividad de la superficie (adimensional) (Ecuación (7); Van der Griend & Owe, 1993)

$R_l^\downarrow$ = radiación de onda larga entrante (Wm⁻²)

σ = constante de Stefan-Boltzmann 5.67×10^{-8} (Wm⁻² K⁻⁴)

T_s = temperatura superficial (K)

$(\varepsilon \sigma T_s^4)$ = equivale a la $R_l^\uparrow$ (radiación de onda larga saliente de la superficie)

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.047 \times \ln \text{NDVI} \quad (7)$$

donde:

NDVI = índice de vegetación de diferencia normalizada (adimensional)

Por otro lado, teniendo en cuenta el método de PT, la ET_r corresponde a la relación entre la ET_p estimada con PT y la fracción evaporativa (FE) (Ecuación (8); Davies & Allen, 1973):

$$ET_r = FE \cdot ET_{p_{PT}} \quad (8)$$

donde:

FE (Ecuación (9)) = modificador de las condiciones de humedad, relacionando la demanda máxima de agua de la atmósfera con la disponibilidad de agua real del sistema suelo-planta (Rivas & Ocampo, 2009)

$$FE = \frac{Hs_i - Hs_{min}}{Hs_{max} - Hs_{min}} \quad (9)$$

donde:

Hs = humedad de suelo

Hs_i = Hs instantánea

$H_{s_{min}}$ = H_s mínima o punto de marchitez

$H_{s_{max}}$ = H_s máxima o capacidad de campo

La estimación de este parámetro permite conocer el agua disponible en el suelo, que da lugar al proceso de ETr. Varía en particular con las características del suelo, su textura y estructura, así como por el tipo de suelo.

Datos de satélite

Dado que en la plataforma GEE se encuentra una gran cantidad de catálogos de datos de satélite, al igual que reanálisis de manera gratuita y disponible para las unidades académicas, se calcularon la ETp y ETr utilizando las bases de datos disponibles en esta plataforma (Tabla 3), según las ecuaciones descritas en el apartado anterior.

Tabla 3. Catálogos de GEE utilizados como datos de entrada para la ecuación de PT.

Variable	Catálogo	Resolución temporal	Resolución espacial (m)	Unidad	Periodo
Ta: temperatura del aire	NOAA/CFSV2/FOR6H	6 horas	22 264	K	1979-01-01 Actualidad
Patm: presión atmosférica	NOAA/CFSV2/FOR6H	6 horas	22 264	Pa	1979-01-01 Actualidad
Rs↓: radiación de onda corta entrante	NOAA/CFSV2/FOR6H	6 horas	22 264	Wm ⁻²	1979-01-01 Actualidad
RL↓: radiación de onda larga entrante	NOAA/CFSV2/FOR6H	6 horas	22 264	Wm ⁻²	1979-01-01 Actualidad
Ts: temperatura de superficie	MODIS/061/MOD11A2	8 días	1 000	K	2000-02-18 Actualidad
NDVI	MODIS/061/MOD09Q1	8 días	250	Adim.	2000-02-18 Actualidad
Albedo	MODIS/006/MCD43A3	Diario	500	Adim.	2000-02-24 Actualidad
Humedad de suelo	NASA_USDA/HSL/ SMAP10KM_ soil_moisture	3 días	10 000	mm	2015-04-02 Actualidad

El catálogo NOAA/CFSV2/FOR6H disponible en GEE proviene del *National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Climate Forecast System (CFS)*, que es un modelo que representa la interacción entre la atmósfera, los océanos, la tierra y el hielo marino. CFS fue desarrollado

en el *Environmental Modeling Center* (EMC) en NCEP, donde se creó el *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR), que desarrollaron el conjunto de datos CFSv2 (Kalnay *et al.*, 1996; Saha *et al.*, 2011). Presentan datos de variables hidrometeorológicas promedio cada seis horas (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC). En particular, la variable T_a que se encuentra en este catálogo es la temperatura a una altura de 2 m. Respecto de la P_{atm} , la $R_s^\downarrow$ y la $R_l^\downarrow$, se obtienen valores promedio en seis horas.

La variable T_s se extrajo a partir del catálogo MODIS/061/MOD11A2. El producto MOD11A2 versión 6 proporciona una temperatura de la superficie terrestre promedio de ocho días en una cuadrícula de 1 200 x 1 200 kilómetros. Cada valor de píxel en MOD11A2 es un promedio simple de todos los píxeles T_s MOD11A1 correspondientes recopilados dentro de ese periodo de ocho días (Wan, 2019). Es importante indicar que con este producto se obtiene el valor de la T_s diurna y nocturna; para la aplicación de este producto se realizó un promedio de la T_s para obtener un valor diario.

Los valores de NDVI se obtienen haciendo el cálculo según la Ecuación (10), empleando como entrada el catálogo de datos MODIS/061/MOD09Q1, que proporciona datos de reflectancia espectral de la superficie de las bandas 1 y 2, con una resolución de 250 x 250 m, corregida para condiciones atmosféricas (gases, aerosoles y dispersión de Rayleigh). Junto con las dos bandas de reflectancia, también se incluye una capa de calidad. Para cada píxel se selecciona un valor de todas las adquisiciones dentro del compuesto de ocho días en función de la alta cobertura de observación, el ángulo de visión bajo, la ausencia de nubes

o sombra de nubes, y la carga de aerosoles (Vermote, Roger, & Ray, 2015).

$$NDVI = \frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)} \quad (10)$$

siendo:

NIR = banda de reflectividad del infrarrojo cercano (sur_refl_b02 en GEE)

Red = banda perteneciente reflectividad en el rojo (sur_refl_b01 en GEE).

El conjunto de datos del modelo MCD43A3 versión 6 de albedo es un producto diario de 16 días. Proporciona reflectancia hemisférica direccional (albedo de cielo negro) y reflectancia bihemisférica (albedo de cielo blanco) para cada una de las bandas de reflectancia de superficie MODIS (1 a 7), así como para las bandas del visible, infrarrojo cercano y onda corta. Cada imagen diaria de 500 x 500 m se genera utilizando 16 días de datos, centrados en el día de interés. También se proporciona una banda de calidad para cada una de las 10 bandas de albedo (Strahler *et al.*, 1999).

Los datos de Hs global SMAP mejorado de NASA-USDA proporcionan información sobre la Hs en todo el mundo, con una resolución espacial de 10 km. Este conjunto de datos incluye Hs superficial y subterráneo (mm), perfil de Hs (%), y anomalías de Hs superficial y subterráneo (-).

El conjunto de datos se genera mediante la integración de observaciones de Hs de nivel 3 de SMAP, las anomalías de Hs se calcularon a partir de la climatología del día de interés. La climatología se

estimó con base en el registro completo de datos de la observación satelital SMAP y el enfoque de ventana móvil centrada en 31 días. La asimilación de las observaciones de Hs SMAP ayuda a mejorar las predicciones basadas en modelos, en particular en zonas que carecen de datos de precipitación de buena calidad (O'Neill, Chan, Njoku, Jackson, & Bindlish, 2016). Este conjunto de datos fue desarrollado por el *Hydrological Science Laboratory at NASA's Goddard Space Flight Center* en cooperación con *USDA Foreign Agricultural Services* y *USDA Hydrology and Remote Sensing Lab*.

Procesamiento y valoración de los datos de satélite

La secuencia de procesamiento aplicada en lenguaje *JavaScript* de la plataforma GEE integra la definición del sitio de interés; aplicación de funciones de filtrado espacial y temporal de los catálogos para la zona de estudio (RPA); selección y conversión de datos de variables involucradas en el cómputo, y desarrollo del algoritmo de PT para los valores de ETp con disgregación del dato a 250 m de resolución espacial. Este resultado se multiplica por la FE (que tiene como datos de entrada a la Hs), para obtener la ETr a la resolución deseada. Dicha resolución se logra aplicando el remuestreo con interpolación bilineal para cada conjunto de datos (Smith, 1981).

Este método de remuestreo determina el nuevo valor de píxel basándose en el promedio de distancia ponderada de los cuatro centros de píxeles más cercanos. Es válido para zonas de llanura, donde el procesamiento del relieve es omitido y otorga resultados esperables para

mejorar la resolución espacial del producto (Salas-Aguilar & Paz-Pellat, 2018) (Figura 1).

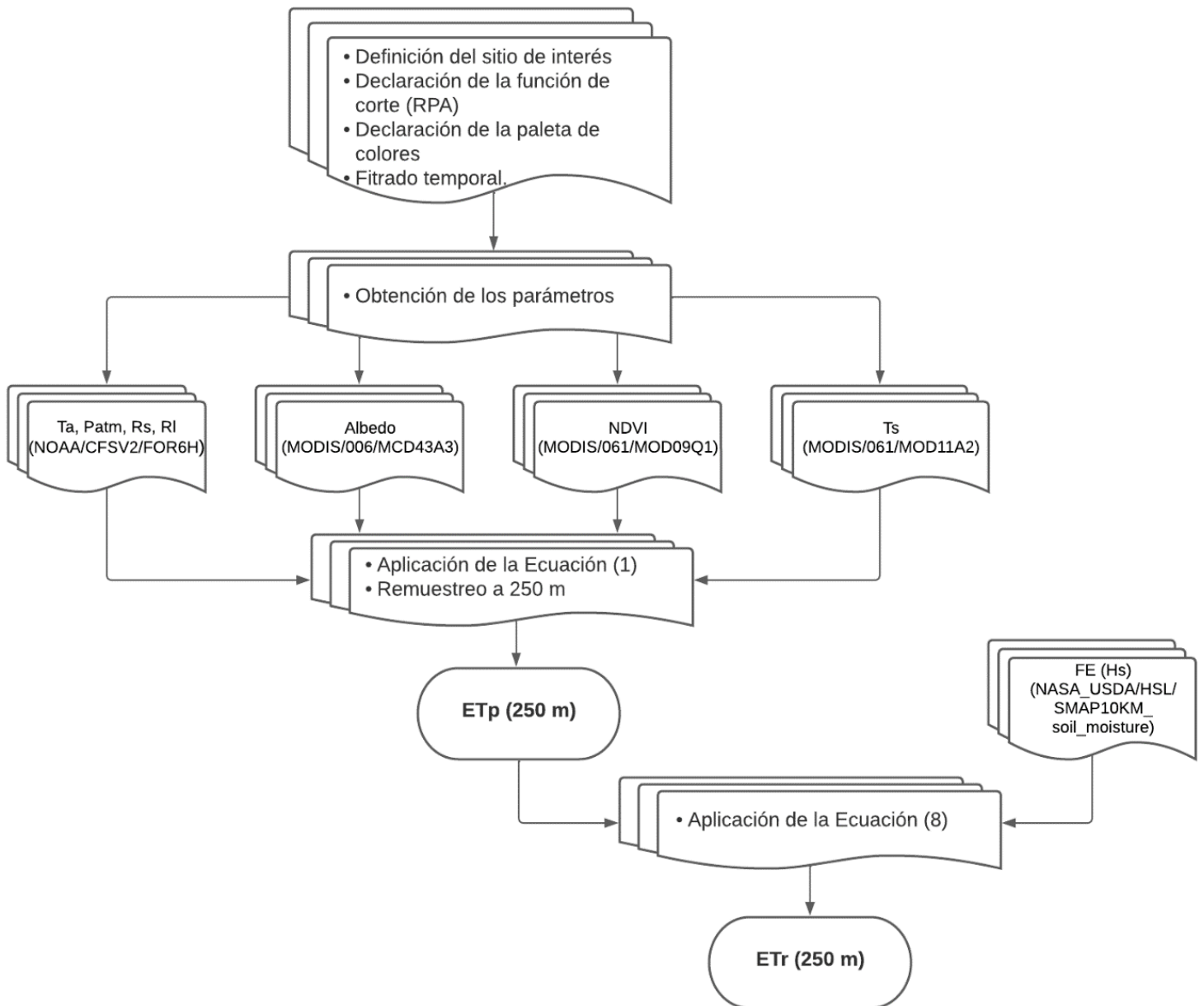


Figura 1. Diagrama de flujo del procesamiento de los datos de satélite para el cálculo de la ETp y ETr.

Para la valoración de los datos, en primera instancia se evaluaron particularmente las variables de entrada para estimar ET ($R_s^\downarrow$, $R_l^\downarrow$, T_a y T_s), que son los parámetros que aportan en el balance de energía, y por consecuencia, en el balance hídrico (principalmente la $R_s^\downarrow$; Faramiñán *et al.*, 2021a). Para llevar a cabo tal evaluación, se compararon las variables de satélite obtenidas de GEE (NOAA/CFSV2 y MODIS), con los obtenidos de NASA Power (base de datos validada en la RPA por Orte *et al.*, 2021; Faramiñán, Degano, Carmona, & Rodríguez, 2021b; García-Bu-Bucogen, Piccolo, & Bohn, 2022), cuyos datos provienen de reanálisis (CERES, MERRA2), en el periodo 2015-2021.

Por un lado, Orte *et al.* (2021) compararon los datos diarios de R_s de NASA-Power con mediciones en tierra en las ocho estaciones de la red de irradiancia solar Saver-Net instalada en el sur de América del Sur. Realizaron un análisis de regresión lineal para analizar la concordancia entre los datos satelitales y las mediciones terrestres, donde el coeficiente de determinación mostró una correspondencia relevante, con un valor medio de 0.95. El error absoluto medio (MAE) ($0.63 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y el RMSE ($0.48 \text{ kWh m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) reflejan una diferencia esperable.

Por su parte, Faramiñán *et al.* (2021b) obtuvieron el valor de ET_r utilizando NASA-Power como datos de entrada del algoritmo Support Vector Machine (SVR) en la RPA. Compararon los resultados obtenidos con valores de ET_r (balance hídrico) con base en información de 12 estaciones agrometeorológicas de la ORA (1983-2012). Observaron errores estadísticos medios de $0.39 \pm 0.07 \text{ mm d}^{-1}$, $0.54 \pm 0.09 \text{ mm d}^{-1}$ y 0.67 ± 0.07 para MAE, RMSE y R^2 , respectivamente. Los resultados

muestran la factibilidad de aplicar algoritmos de aprendizaje automático para la obtención de valores de ETr en planicies agrícolas.

En este sentido, se considera que el conjunto de datos NASA Power es consistente para analizar los datos de satélite (GEE) en la RPA. Asimismo, con el fin de constatar la información con datos de campo, se verificó la respuesta de las variables de entrada con datos medidos *in situ*, en una parcela de cebada ubicada en las cercanías de la localidad de Tandil (-37.49; -58.90) durante el periodo julio-diciembre de 2019 (sensores y variables detalladas en Faramiñán *et al.*, 2022).

Por otro lado, para evaluar el producto final de ETp y ETr, se obtuvieron los datos de entrada con una resolución temporal promedio de ocho días, mientras que para la realización de los mapas se optó por una resolución temporal anual para analizar los cambios en ese periodo de tiempo. La valoración del producto de ETp y ETr se hizo en el periodo 2015-2021 debido a la disponibilidad de datos (tanto de campo como de satélite), y a la variabilidad en las precipitaciones, abarcando temporadas de máximos, mínimos y promedio anuales.

Datos *in situ*, zona de estudio

Los datos locales los determinó la Oficina de Riesgo Agropecuario (ORA). Calculan la ET_0 con datos meteorológicos medidos en estaciones por el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina (SMN), y se basan en el método de FAO-Penman Monteith (PM) (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998; Monteith & Unsworth, 1990).

Por otro lado, los valores locales de ETr se obtienen realizando un balance hidrológico, de resolución temporal diaria, donde se tienen en cuenta los ingresos y egresos de agua del sistema, despejando el término de ETr para su cálculo (Allen, *et al.*, 1998; Basualdo, 2011).

En cuanto a la RPA, es una región de planicie de alrededor de 520 000 km² de superficie, que se encuentra en el centro-este de la República Argentina. En su extensión, incluye en parte cinco provincias agrícolas: sur de Entre Ríos, sureste de Córdoba, sur de Santa Fe, este de La Pampa y la provincia de Buenos Aires (exceptuando el extremo sur). Una estación meteorológica de referencia en zonas de llanuras representa un área de cobertura de 127 km de radio, delimitada por los círculos rojos que se encuentran en la Figura 2 (según la WMO, 1994; Degano *et al.*, 2021c).

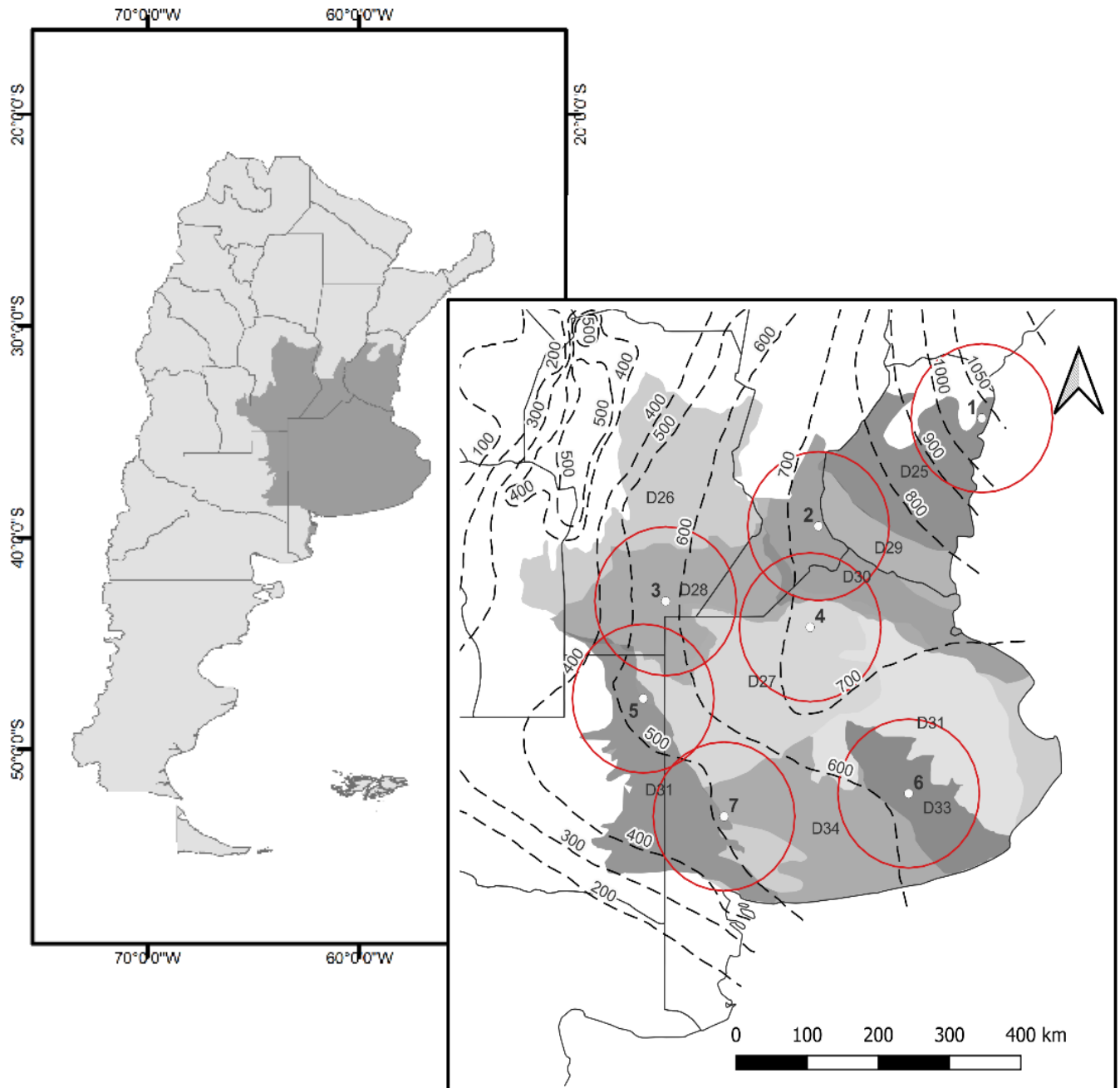


Figura 2. Ubicación de la RPA y de las estaciones de validación (1-7).
Distribución espacial del área de influencia de las estaciones
hidrometeorológicas (círculo rojo) e isolíneas de ETr (INA, 2002)
(modificado de Degano *et al.*, 2021c).

Asimismo, la RPA se subdivide en 12 ecorregiones (Pereyra, 2003): 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), donde el clima general es templado-cálido y en particular varía de húmedo/subhúmedo (estaciones 1. Concordia; 2. Rosario; 3. Laboulaye; 4. Junín, y 6. Tandil, que constituyen la pampa subhúmeda-húmeda) a semiárido (estaciones 5. General Pico y 7. Pigüé, que determinan la pampa semiárida) (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006).

En la Figura 2 se muestran además isolíneas de ETr definidas por el Instituto Nacional del Agua (INA, 2002). Ello determina la variabilidad de este parámetro, dependiendo de la zona de la RPA en la que se hace foco. Es mayor en las zonas más húmedas (noreste de la RPA), y disminuye hacia las zonas semiáridas de la región, variando entre 1 050 y 400 mm por año.

Análisis estadístico

Para analizar el comportamiento del producto de ETp y ETr obtenido es necesario evaluar su respuesta, para ello se utilizaron distintas métricas estadísticas Me (mediana), para analizar el error sistemático; RSD (desviación estándar robusta (Ecuación (11); (Wilrich, 2007), para

corroborar el error aleatorio; R-RMSE (error cuadrático medio robusto - Ecuación (12)); R^2 (coeficiente de determinación, Ecuación (13)), a (pendiente), y b (ordenada del origen), que relacionan los datos medidos localmente con los obtenidos por el modelo aquí propuesto tanto para el producto final como para analizar las variables de entrada del método:

$$RSD = 1.483 Me (|(E_i - O_i) - Me(E_i - O_i)|) \quad (11)$$

$$R\text{-}RMSE = \sqrt{RSD^2 + Me^2} \quad (12)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (13)$$

donde:

E_i = datos estimados

O_i = datos observados

N = cantidad de datos tenidos en cuenta

Resultados y discusión

Análisis de las variables de entrada

Con el fin de corroborar el comportamiento de las variables de entrada con mayor peso en el cálculo de ET_p, se comparó la $R_s^{\downarrow}$, $RI^{\downarrow}$, T_a y T_s provenientes de NOAA/CFSV2 y MODIS (GEE) con la base de datos NASA Power en toda la RPA, tomando valores de los sitios de las siete estaciones mencionadas en la Figura 2.

En este sentido, se hizo un análisis estadístico (Tabla 4, Figura 3A, B, C y D), donde se puede observar que para la variable $R_s^{\downarrow}$ (Tabla 4, Figura 3A), el análisis estadístico arroja valores de R-RMSE de 36 W m^{-2} (del orden de 1.3 mm d^{-1} y de alrededor del 10%), y valores positivos de mediana, lo que indica una sobreestimación de los datos de NOAA/CFSV2; este error sistemático puede ser corregido con un ajuste lineal. El error aleatorio (RSD) es de 15.9 W m^{-2} (alrededor de 0.5 mm d^{-1}); la pendiente es cercana a 1 mm d^{-1} , y el R^2 es de 0.95, marcando una buena relación entre las variables.

Tabla 4. Estadísticos que relacionan los valores de $R_s^{\downarrow}$, $RI^{\downarrow}$, T_a y T_s de reanálisis (NASA Power) con los datos de satélite (NOAA/CFSV2 y MODIS-GEE) para el periodo 2015-2021.

	NOAA/CFSV2/FOR6H			MOD11A2
	$R_s^{\downarrow} (\text{W m}^{-2})$	$RI^{\downarrow} (\text{W m}^{-2})$	$T_a (\text{K})$	$T_s (\text{K})$
Mediana	32.8	-9.2	0.5	0.2
RSD	15.9	5.6	0.9	1.3
R-RMSE	36.5	10.8	1.0	1.3

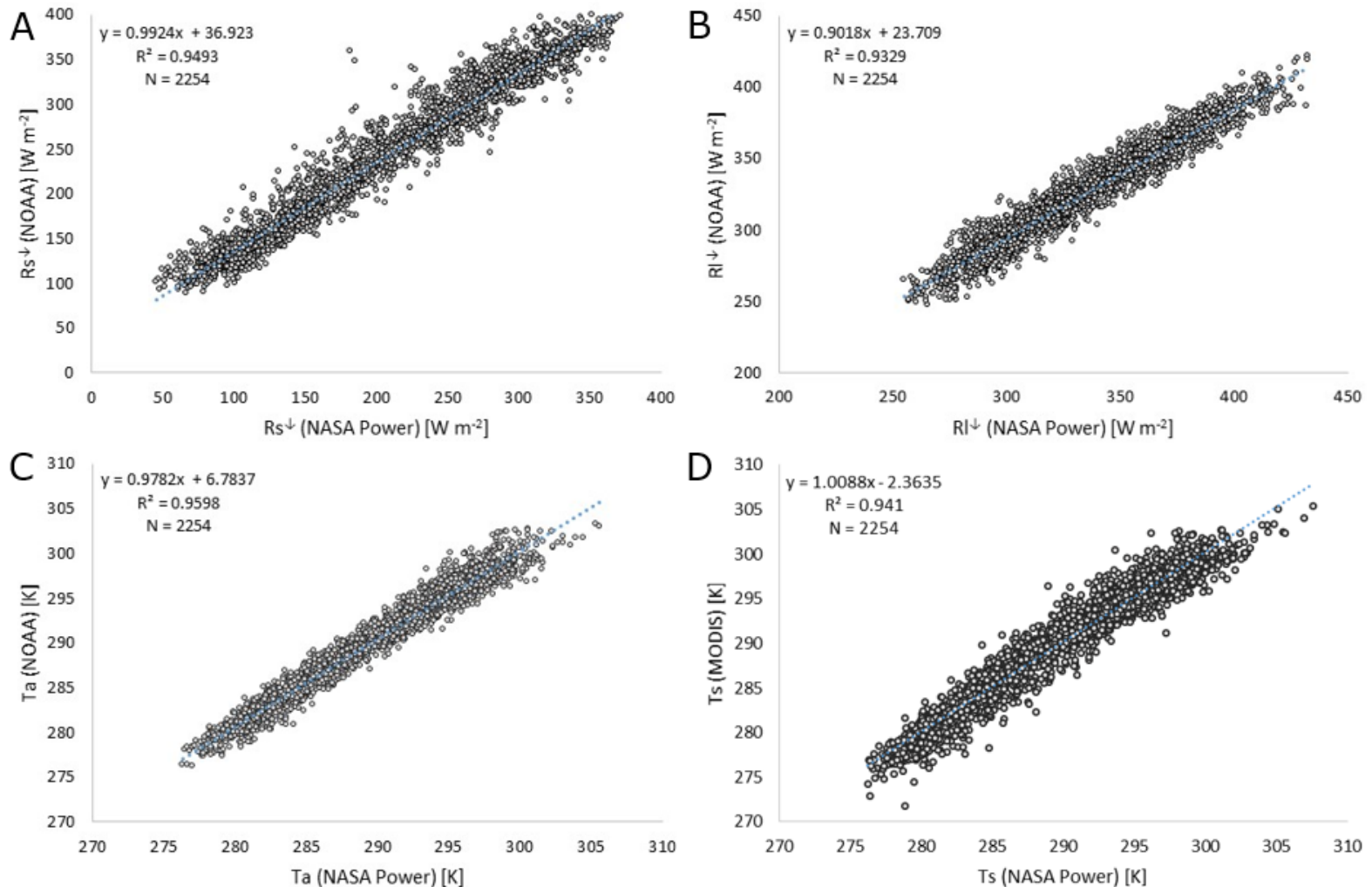


Figura 3. Relación de valores de NASA Power con datos NOAA (A) $Rs_{\downarrow}$; B) $RI_{\downarrow}$; C) T_a), y MODIS (D) T_s (obtenidos de GEE) para el periodo 2015-2021.

En relación con la $RI_{\downarrow}$ (Tabla 4, Figura 3B), el R-RMSE es de 10.8 W m^{-2} (alrededor del 4% - 0.3 mm d^{-1}); la mediana negativa indica una leve

subestimación de los datos; el RSD equivale a 5.6 W m^{-2} (0.1 mm d^{-1}); la pendiente es cercana a 1 mm d^{-1} , y el R^2 es de 0.93.

Por otro lado, la T_a (Tabla 4, Figura 3C) muestra valores de R-RMSE de 1 (K), una mediana positiva, determinando una sobreestimación de los datos de satélite, aunque en bajas proporciones. El error aleatorio es de 0.9 (K); la pendiente es alrededor de 1; el R^2 es de 0.96, y la distribución de los datos se encuentra cercana a la línea 1:1, mostrando una buena relación entre los datos de NASA Power, en comparación con los obtenidos desde satélite.

En cuanto a la T_s (Tabla 4, Figura 3D), los valores de los estadísticos indican errores bajos (1.3 K), así como la mediana positiva, que determina una sobreestimación de los datos de satélite poco notoria, ya que los valores se observan cercanos a la línea 1:1, y el valor de R^2 es de 0.94.

Además, con el fin de corroborar estos resultados, se compararon las variables de entrada con datos de campo, medidos en una estación experimental de cebada (-37.49; -58.90), para el ciclo de cultivo del año 2019 (sensores y variables detalladas en Faramiñán *et al.*, 2022).

En este análisis se obtuvieron resultados similares a los obtenidos con los datos de NASA Power, en la RPA en general, para el conjunto de datos de $R_s^{\downarrow}$ y $R_l^{\downarrow}$ (Tabla 5, Figura 4A y B). Los errores indican un leve aumento en campo tanto para T_a como para T_s (Tabla 5, Figura 4C y D). Asimismo, los valores de la pendiente son cercanos a 1 en todos los casos y el valor del R^2 es superior a 0.9 para las cuatro variables. Este análisis resuelve que los datos de entrada utilizados para el cálculo de ET_p son confiables para su aplicación en el método de PT.

Tabla 5. Estadísticos que relacionan los valores de $R_s^\downarrow$, $R_l^\downarrow$, T_a y T_s medidos en campo con los datos de satélite.

	NOAA/CFSV2/FOR6H			MOD11A2
	$R_s^\downarrow$ ($W\ m^{-2}$)	$R_l^\downarrow$ ($W\ m^{-2}$)	T_a (K)	T_s (K)
Mediana	32.4	-8.8	2.0	1.2
RSD	15.7	4.3	1.0	1.8
R-RMSE	36.0	9.8	2.2	2.2

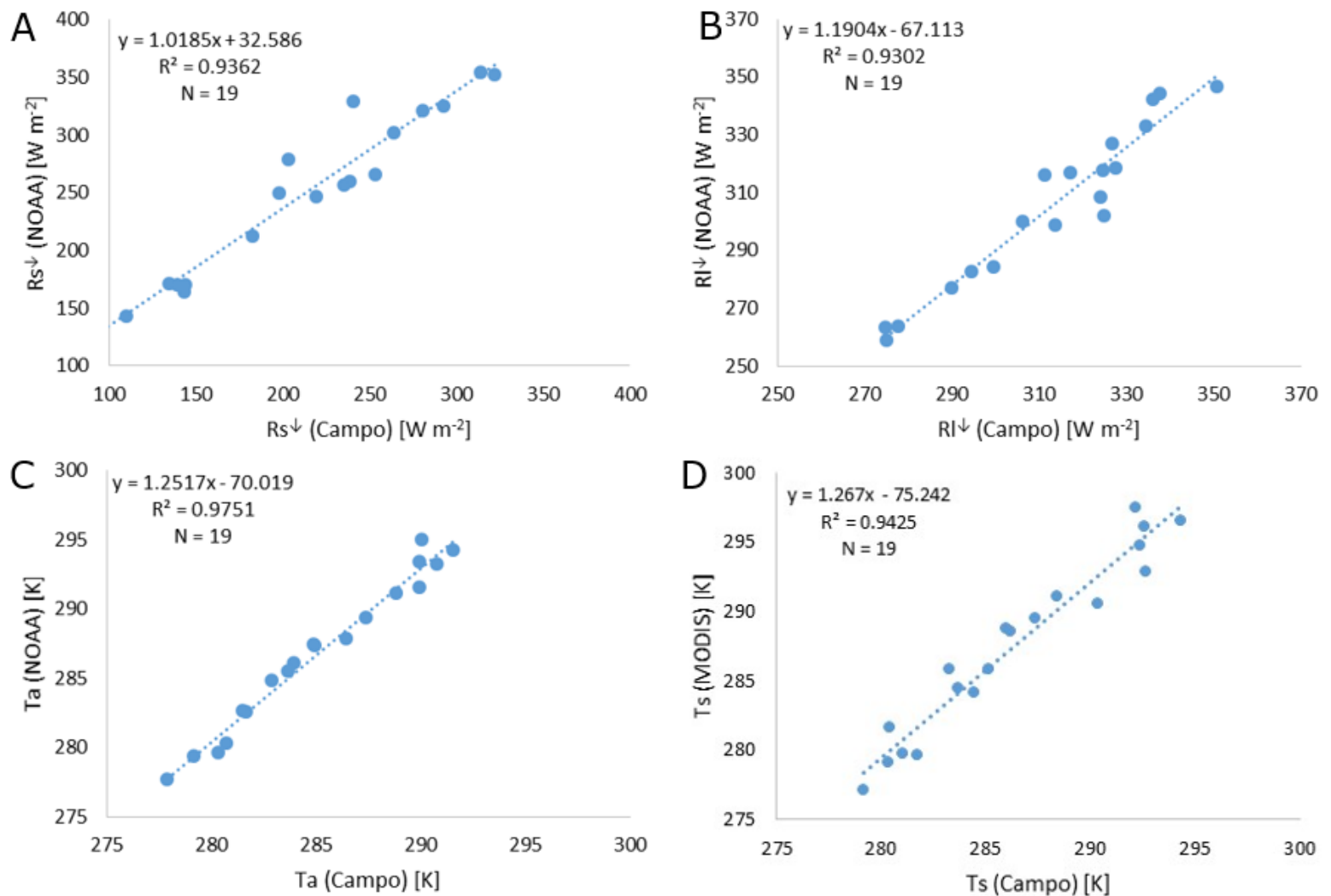


Figura 4. Relación de valores de campo con satélite A) $R_s \downarrow$, B) $RI \downarrow$, C) T_a , D) T_s .

Si bien se observan algunas diferencias en el análisis de los datos de satélite, se puede determinar que muestran una gran potencialidad para la utilización de los mismos en el cálculo de la ET_p y ET_r debido a su concordancia con los datos de referencia.

Análisis del producto de ETP

Utilizando la base de datos de la ORA como datos reales (observados), se realizó la valoración del producto de ETP obtenido mediante la ecuación de PT para las siete estaciones de la RPA (ver Tabla 3 y Figura 2). Para esta valoración, se compararon los datos medidos *in situ* con los obtenidos con el modelo a partir de los datos de satélite (Figura 5). Por otro lado, en la Tabla 6, se listan los estadísticos obtenidos para esta comparación. Los resultados muestran una distribución de la nube de puntos consistente, con un R^2 cercano a 0.9 para toda la región en su conjunto como en particular en cada estación (varía 0.7 y 0.9). Por otro lado, la pendiente general de esta relación es cercana a 1 y la ordenada del origen es de 0.05 mm d⁻¹.

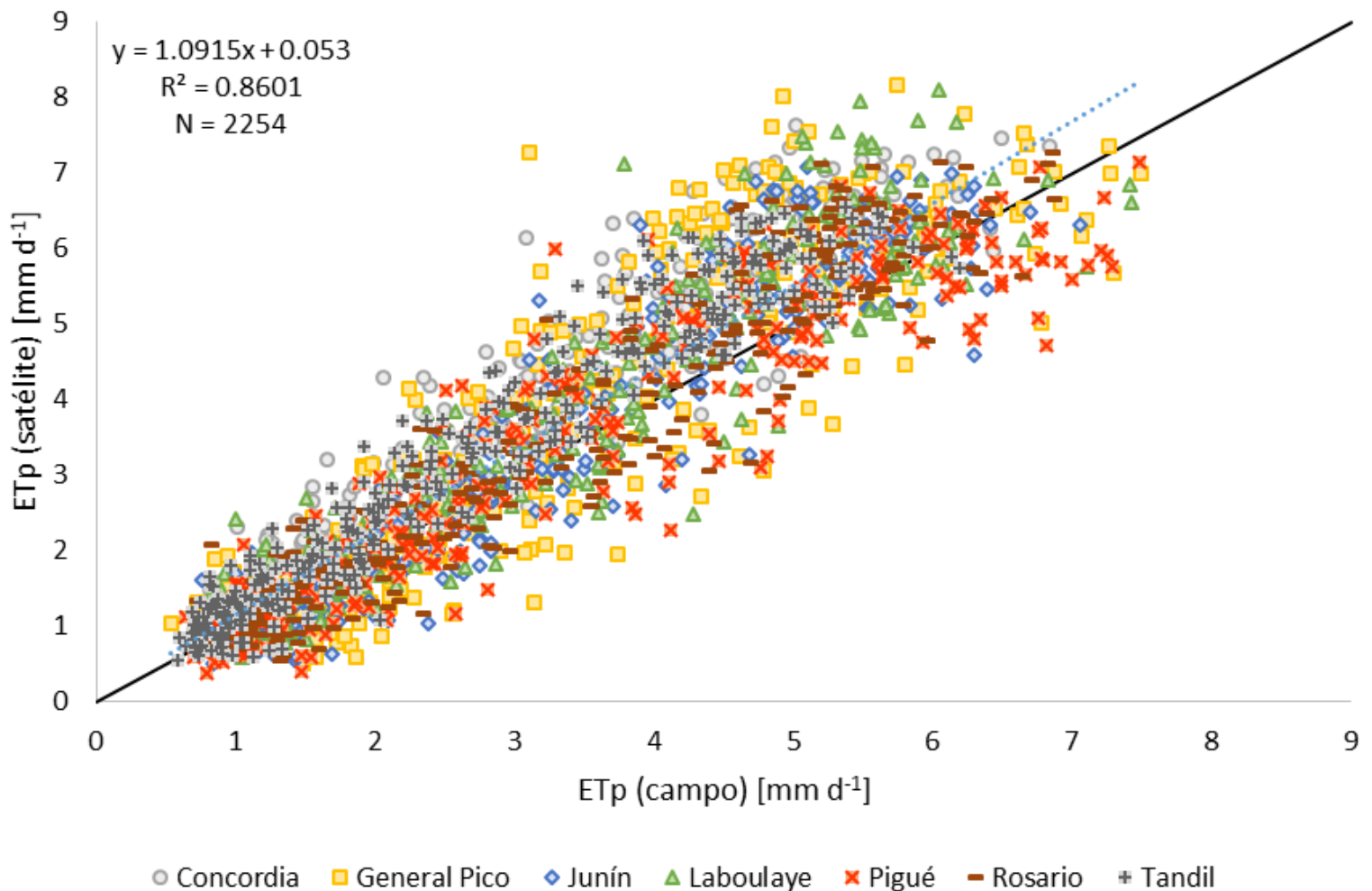


Figura 5. Comparación entre datos de ETp de campo y satélite. Línea negra: relación 1:1. Línea punteada: línea de tendencia.

Tabla 6. Estadísticos que relacionan la ETp modelada con los datos puntuales.

ETp	RPA	Concordia	General Pico	Junín	Laboulaye	Pigüé	Rosario	Tandil
Mediana (mm d ⁻¹)	0.3	0.6	0.2	0.0	0.3	0.0	0.1	0.5
RSD (mm d ⁻¹)	0.5	0.3	0.8	0.6	0.4	0.6	0.4	0.2
R-RMSE (mm d ⁻¹)	0.5	0.7	0.8	0.6	0.5	0.6	0.4	0.5
a	1.09	1.17	1.12	1.12	0.98	0.95	1.1	1.17
b (mm d ⁻¹)	0.05	0.23	-0.07	-0.21	0.42	0.19	-0.16	0.11
R ²	0.86	0.89	0.79	0.83	0.72	0.87	0.90	0.93

Analizando a detalle lo referente a la mediana (0.3 mm d⁻¹), este factor otorga un valor positivo para toda la región, mostrando una leve sobreestimación de los datos, determinando un error sistemático casi imperceptible, como lo es en la mayoría de las estaciones, en particular en Junín, Pigüé y Rosario; es mayor en las zonas de Tandil y Concordia.

Con respecto al error aleatorio, determinado por el RSD, se obtienen valores de 0.5 mm d⁻¹ para la RPA en general, siendo mayor en las estaciones ubicadas en la zona semiárida (Pigüé y General Pico) y menor en la subhúmeda/húmeda. En cuanto al R-RMSE, su valor es de 0.5 mm d⁻¹ en la RPA en general, que se encuentra por debajo del error de estimación del método; según la Tabla 1, para estimaciones realizadas con satélite, el error típico es entre el 10 y 20% (Allen *et al.*, 2011).

Los errores asociados con este producto de ETp son comparables con los obtenidos por otros autores que calculan ET con el método de PT y PM (Monteith & Unsworth, 1990) en distintas regiones del planeta. En particular, Laipelt *et al.* (2021), que obtuvieron la ET con el método SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), utilizando datos LANDSAT y ERA5 con GEE, arrojando errores medios de 0.67 mm día^{-1} y valores R^2 superiores a 0.4 para la mayoría de los sitios evaluados en distintas zonas de Brasil.

Por su parte, Yao *et al.* (2017) aplicaron la ecuación de PT para calcular ETp en varios biomas y climas del noreste de China. Utilizaron como datos de entrada distintos productos MODIS, logrando una resolución espacial de 1 km y temporal de ocho días. Estos autores observaron errores menores en zonas con cobertura vegetal continua y con disponibilidad de agua (alrededor de 0.6 mm d^{-1}). Mientras que en regiones sin cobertura o con cobertura discontinua y con clima semiárido/árida, el algoritmo muestra errores mayores (alrededor de $0.8/0.9 \text{ mm d}^{-1}$).

Por otro lado, Degano *et al.* (2021c) evaluaron el producto MOD16A2 (ETp) para la RPA (Mu, Heinsch, Zhao, & Running, 2007; Running, Mu, & Zhao, 2017). Este producto, disponible globalmente, cuya resolución espacial es de 1 km (discontinuado) y 500 m, y temporal de ocho días, está basado en el modelo de PM. Los autores encontraron que para esta zona de estudio, el producto MOD16A2 presenta un error sistemático, indicando las debilidades del mismo para ser utilizado de forma directa en la RPA. Por lo tanto, desarrollaron una ecuación de ajuste

lineal para corregir ese producto, logrando disminuir los errores asociados (de 3.4 mm d^{-1} a 0.6 mm d^{-1}).

En la Figura 6 se muestran los mapas anuales de ETp para la RPA (2016-2021). La ET aumenta con sentido sudeste-noroeste, con un patrón similar entre años. En la zona semiárida, donde hay mayor demanda de agua de la atmósfera, la ETp es mayor; en las zonas más húmedas, los valores de ETp disminuyen.

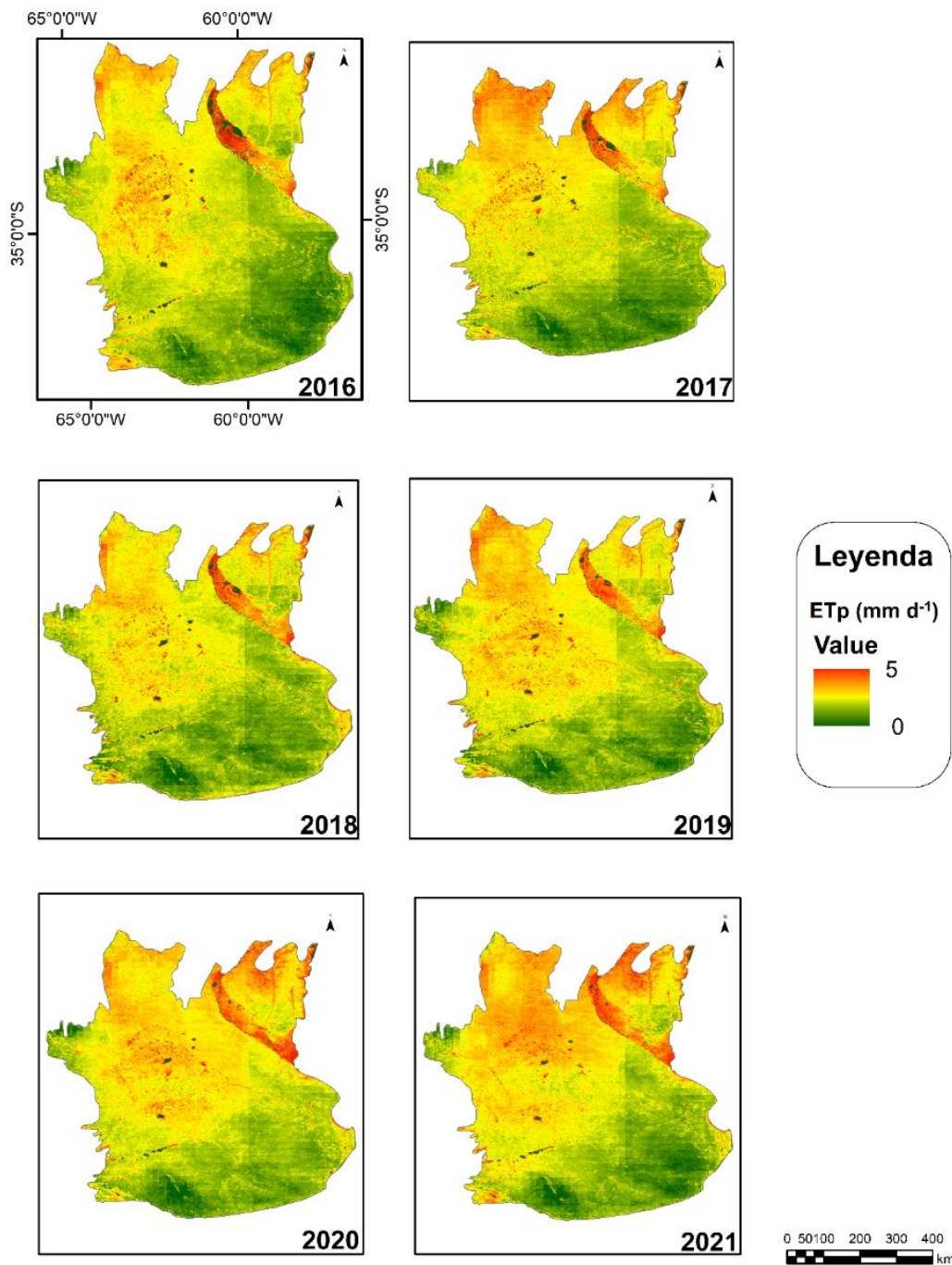


Figura 6. Variabilidad espacial de la ETp en la RPA.

En este estudio se tuvieron en cuenta seis años, de los cuales se encuentran años extremos y promedios en cuanto a la precipitación (800-1 100 mm) y humedad del suelo (40-70%). En particular, el 2016 y 2017 fueron los más húmedos, el 2018 y 2019 con precipitaciones promedio, y los años restantes más secos. El análisis temporal muestra un aumento de la ETp desde el 2016 (mayores precipitaciones) al 2021 (menores precipitaciones), es decir, a mayor demanda de agua de la atmósfera se observan valores de ETp más altos, incrementándose el límite de los valores altos de este parámetro, mostrando un corrimiento del mismo hacia el sudeste para el año 2021.

Este análisis multitemporal de la ETp puede ser determinante para los productores agropecuarios, dado que la disponibilidad de agua del sistema es vital para el desarrollo de los cultivos. En dicho sentido, y teniendo en cuenta esta variable, las personas involucradas en la producción de los diferentes cultivos serán posibles usuarios de este producto de ETp a escala regional (en el marco del proyecto JOVIN se está realizando la transferencia de la aplicación de este producto a la ORA, perteneciente al Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-MAGyP (03-JOVIN-71I)).

Análisis del producto de ETr

En la comparación entre datos de satélite con datos *in situ* respecto de la ETr (Figura 7, Tabla 7), se puede observar una mayor dispersión en la nube de puntos, indicado por el valor de R^2 de 0.54, disminuyendo en las

estaciones de Concordia y Tandil; en el resto de las estaciones varía entre 0.6 y 0.7.

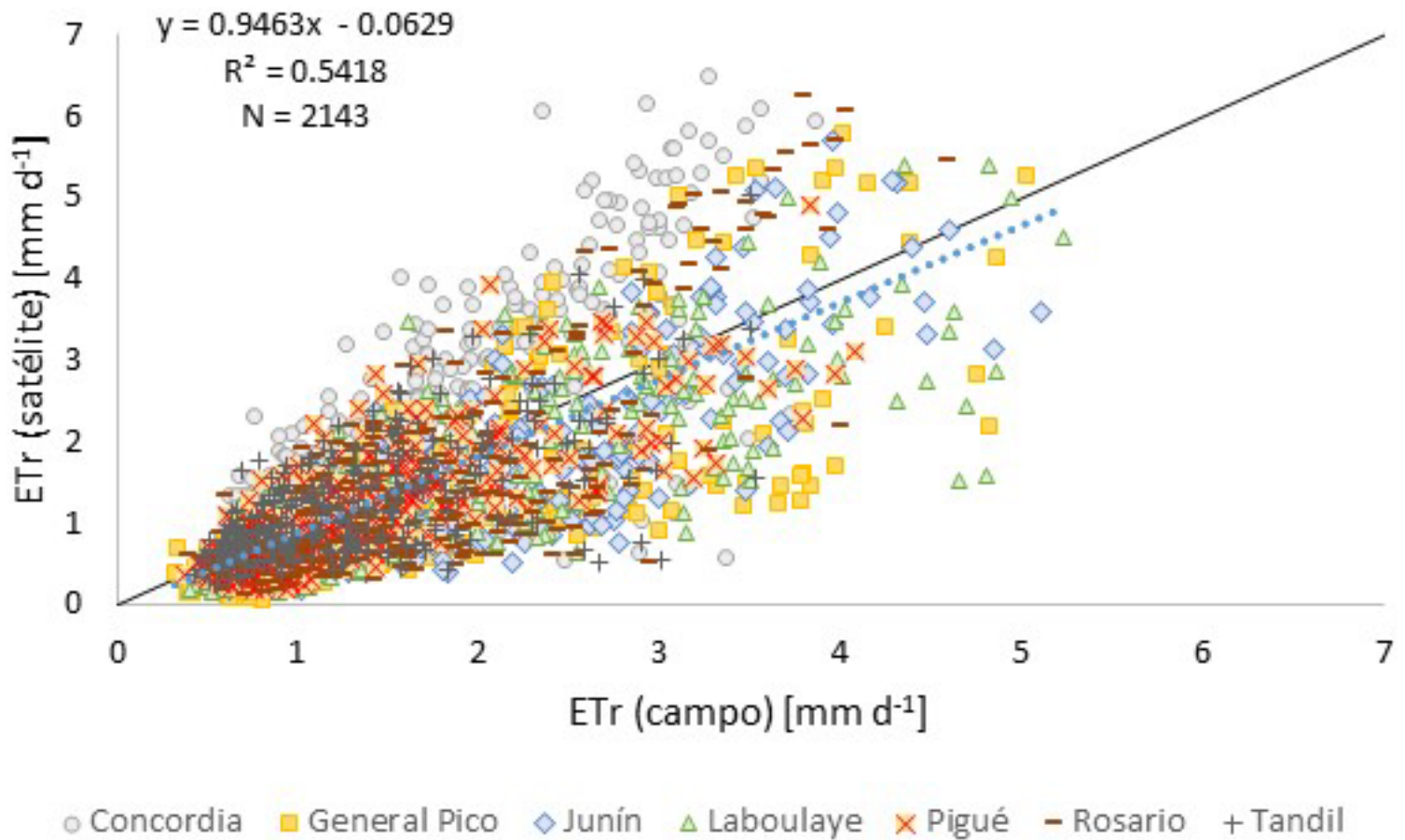


Figura 7. Comparación entre datos de ETr calculados con balance hidrológico (ORA) y los de satélite. Línea negra: relación 1:1. Línea punteada: línea de tendencia.

Tabla 7. Estadísticos que relacionan la ETr modelada con los datos puntuales.

ETr	RPA	Concordia	General Pico	Junín	Laboulaye	Pigüé	Rosario	Tandil
Mediana (mm d ⁻¹)	-0.2	0.6	-0.5	-0.4	-0.4	-0.2	-0.3	0.0
RSD (mm d ⁻¹)	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.5	0.4
R-RMSE (mm d ⁻¹)	0.6	0.8	0.6	0.6	0.5	0.4	0.6	0.4
a	0.95	1.31	0.87	0.97	0.81	0.86	1.18	0.73
b (mm d ⁻¹)	-0.06	0.05	-0.21	-0.36	-0.01	0.03	-0.53	0.29
R ²	0.54	0.54	0.6	0.69	0.64	0.63	0.61	0.44

El error sistemático, representado por la mediana, muestra un valor negativo (para el total de los datos de la RPA), determinando una leve subestimación por parte del producto de satélite. Esto sucede en la mayoría de las estaciones, excepto en Tandil, que es cero, mostrando la nube de datos sobre la línea 1:1, y en Concordia, que obtiene un valor positivo.

El RSD, al igual que en la ETp, toma un valor de 0.5 mm d⁻¹ en general; en particular, este error aleatorio varía entre 0.3 y 0.5 mm d⁻¹. Por otro lado, el R-RMSE alcanza valores de 0.6 mm d⁻¹ para toda la RPA, siendo mayor en zonas con climas más húmedos (Concordia).

En el contexto de la ETr, diferentes autores obtuvieron este parámetro integrando las propiedades del suelo, así como la Hs. En su

trabajo, Walker y Venturini (2019b) calcularon ETr, siguiendo la metodología de Walker, García, Venturini y Carrasco (2019a), tomando como datos de entrada variables de reanálisis disponibles en GEE (*Global Land Data Assimilation System version 2.1*-GLDAS y *National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System version 2*-NCEP). Analizaron su método tomando distintas estaciones de la red FLUXNET alrededor del mundo. La valoración del método otorgó errores del orden de los 3 mm d⁻¹.

Por su parte, Degano *et al.* (2021c) evaluaron el producto MOD16A2 en la RPA para distintos ciclos de cultivo de soja (entre 2009-2010 a 2017-2018). Para la ETr determinaron que los valores de los errores resultan entre 0.7 mm d⁻¹ y 2 mm d⁻¹ en la zona subhúmeda/húmeda, mientras que en la zona semiárida los valores disminuyen a 0.5 mm d⁻¹. El promedio general del error en la zona es de 1.1 mm d⁻¹.

Este análisis indica que el producto desarrollado en este trabajo muestra errores competentes en relación con los obtenidos por otros autores, variando entre 0.4 y 0.8 mm d⁻¹.

La Figura 8 muestra la variabilidad de la ETr en la RPA en los diferentes años (2016-2021), donde la variación espacial está controlada por la disponibilidad de humedad en el perfil de suelo. El comportamiento espacio-temporal de la ETr está influenciada por la distribución de las precipitaciones anuales con un fuerte control del tipo de suelo (dependiente de sus características texturales y estructurales).

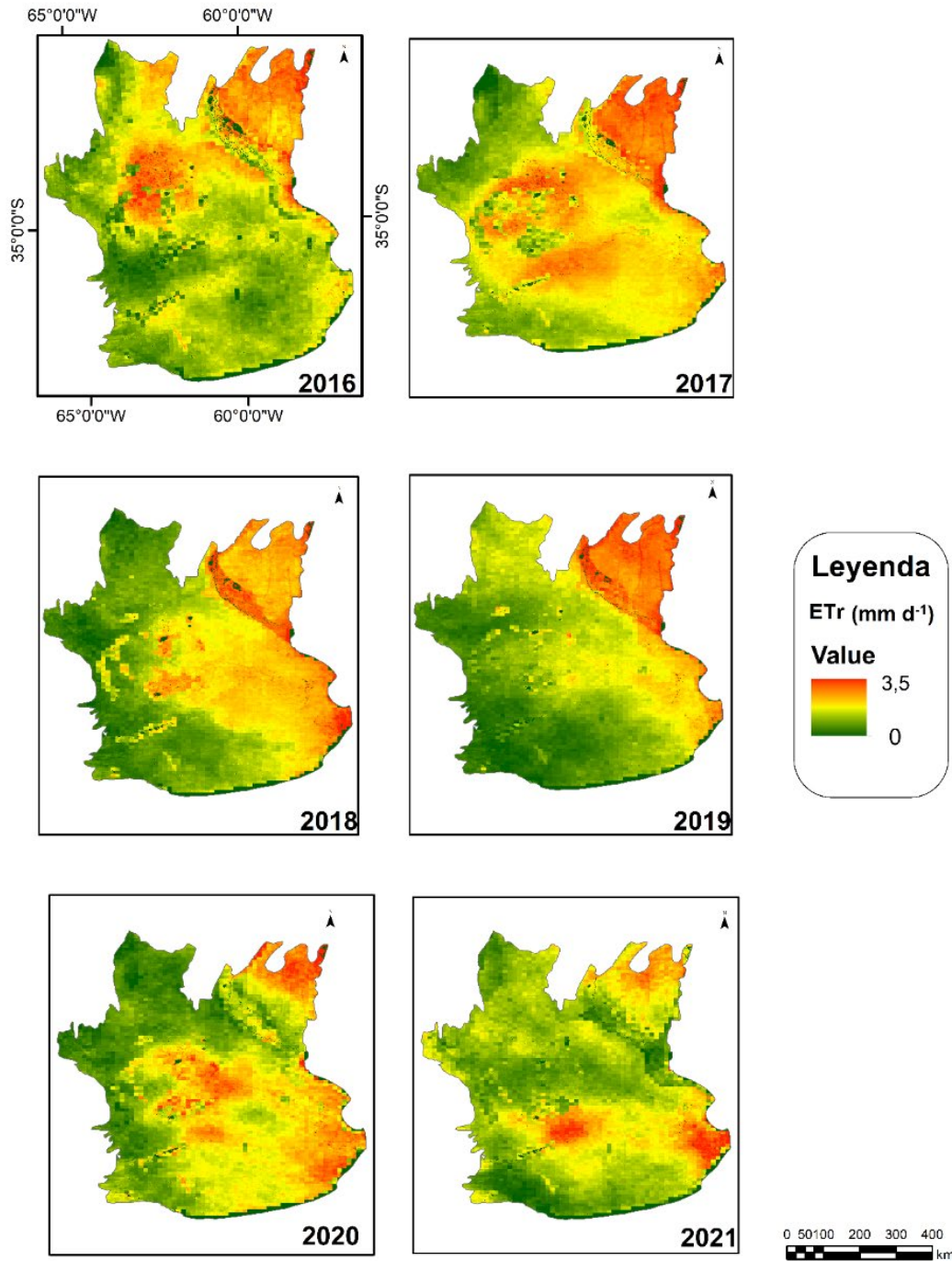


Figura 8. Variabilidad espacial de la ETr en la RPA.

En particular, cuando se trata de años más húmedos, la tendencia equivale a una menor variación espacial de la ETr (en general, valores más altos para el conjunto de estaciones). En cuanto a los años con déficit hídrico, en general se presenta una mayor variación espacial y con mayor impacto en zonas de suelos con menor capacidad de retención de agua.

Analizando el cambio multitemporal de la ETr en la zona del río Paraná (noreste), se puede observar con claridad una disminución del proceso de pérdida de agua del sistema a través de los años. Esta variación puede atribuirse a las sequías observadas por los efectos sobre las precipitaciones de los eventos de La Niña sobre la región.

En concordancia con la ETp, y haciendo uso del producto de ETr, esta herramienta puede ser de gran ayuda para los productores agrícolas a la hora de planificar la siembra, así como la distribución de los cultivos en la RPA. Teniendo en cuenta la disponibilidad de agua tanto a nivel atmósfera como a nivel del suelo, y dependiendo de las predicciones a futuro (año Niña-seco o Niño-húmedo), puede influir en la toma de decisiones para el sector agropecuario.

Conclusiones

En este trabajo se propone un método para determinar evapotranspiración potencial y evapotranspiración real a nivel regional con datos de satélite y de reanálisis con la herramienta *Google Earth Engine* (GEE), con una resolución temporal de ocho días y espacial de 250 x 250 m, utilizando el método de Priestley-Taylor. Este producto fue valorado con datos de campo, provistos por la Oficina de Riesgo Agropecuario, en la región pampeana argentina.

En primera instancia, se evaluaron los datos de entrada de satélite con datos NASA Power y con valores medidos localmente. En este sentido, se concluye que tanto los datos de NOAA/CFSV2 como los de MODIS (ambos obtenidos de GEE) muestran una gran potencialidad para realizar el cálculo de ETp con el método de PT debido a su concordancia con los datos de referencia.

Respecto de la evapotranspiración potencial, en general, el producto arrojó errores de 0.5 mm d⁻¹, mostrando una leve sobreestimación, determinado por la mediana. En el análisis multitemporal realizado se observa una distribución de esta variable, que aumenta en sentido sudeste-noroeste en toda la región pampeana argentina.

El análisis estadístico relacionado con la evapotranspiración real mostró errores del orden de 0.6 mm d⁻¹ y una breve subestimación del producto de satélite. Por su parte, el análisis temporal de este parámetro en la región muestra una variabilidad, aumentando de sudoeste a noreste.

En general, debido a que los errores que presenta el producto están dentro del error asociado con el método, se puede concluir que este

producto puede utilizarse de manera directa para obtener los valores de evapotranspiración potencial y real en una zona de llanuras con características subhúmedas/húmedas a semiáridas, y que puede emplearse para analizar la variabilidad espacio-temporal de la ETp y ETr en diferentes condiciones extremas (año Niño/ año Niña), así como realizar estudios ambientales aplicados.

Además, el uso de la herramienta *Google Earth Engine* logra un avance importante en el procesamiento y análisis de las variables ambientales/hidrológicas de satélite y reanálisis, pues tiene una amplia variedad de catálogos de datos disponibles, con buena precisión e integración de los datos para lograr un producto aplicable, con técnicas sencillas de programación, lo cual agiliza el procesamiento de los datos de entrada y la obtención de resultados.

Agradecimientos

Los autores del presente trabajo quieren agradecer a la Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires (UNCPBA), en el marco del programa de Fortalecimiento de la Ciencia y la Tecnología proyecto Jóvenes Investigadores (03-JOVIN-71I), a la UNCPBA, a la Oficina de Riesgo Agropecuario por proporcionar los datos de ET de campo y al Lic. Christian Mancino por la modificación de la Figura 2.

Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, 300(9), D05109.
- Allen, R., Pereira, L., Howell, T., & Jensen, M. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, 98(6), 899-920. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015
- Barré, H. M., Duesmann, B., & Kerr, Y. H. (2008). SMOS: The mission and the system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(3), 587-593.
- Basualdo, A. (2011). Capítulo 5. Balance hídrico como herramienta de decisión. En: Occhiuzzi, S., Mercuri, P., & Pascale, C. (eds.). *Herramientas para la evaluación y gestión del riesgo climático en el sector agropecuario* (130 pp.). Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.
- Brutsaert, W. (1984). *Evaporation into the atmosphere, theory, history, and applications*. Dordrecht, Holland: Cornell University, Reidel Publishing Company.

- Chandrasekar, K., Misra, N., Mohammed-Ahamed, J., Mishra, A., Madhavi, P., Abdul-Hakeem, K., Raju, P. V., Rao, V. V., & Jha, C. S. (2022). Satellite-based terrestrial evapotranspiration product for India. In: *Geospatial technologies for resources planning and management* (pp. 381-407). Cham, Germany: Springer International Publishing.
- Davies, J. A., & Allen, C. D. (1973). Equilibrium, potential, and actual evaporation from cropped surfaces in southern Ontario. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 12, 649-657.
- Degano, M. F. (2021a). *Desarrollo de un modelo de evapotranspiración global con datos de satélite y de reanálisis* (doctoral dissertation), Universitat de València, España.
- Degano, M. F., Carmona, F., Rodríguez, P. O., Faramiñán, A., Rivas, R., Bayala, M., & Corts, R. N. (2021b). Analysis of Priestley-Taylor method in different environments and coverages. In: *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-6). San Juan, Argentina: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Degano, M. F., Rivas, R. E., Carmona, F., Niclòs, R., & Sánchez, J. M. (2021c). Evaluation of the MOD16A2 evapotranspiration product in an agricultural area of Argentina, the Pampas region. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(2), 319-328.

- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Tsang, L., & Van Zyl, J. (2010). The soil moisture active passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- Faramiñán, A. M. G., Carmona, F., Rivas, R. E., Degano, M. F., & Olivera-Rodríguez, P. (2021a). Monitoreo de la evapotranspiración real horaria por medio del balance energético y un lisímetro de pesada. *Boletín Geológico y Minero*, 132 (1-2), 47-56. DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.005
- Faramiñán, A. M., Degano, M. F., Carmona, F., & Rodriguez, P. O. (2021b). Estimation of actual evapotranspiration using NASA-POWER data and Support Vector Machine. In: *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/RPIC53795.2021.9648425
- Faramiñán, A., Rodriguez, P. O., Carmona, F., Holzman, M., Rivas, R., & Mancino, C. (2022). Estimation of actual evapotranspiration in barley crop through a generalized linear model. *MethodsX*, 9, 101665.
- Fisher, J. B., Tu, K. P., & Baldocchi, D. D. (2008). Global estimates of the land–Atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 901-919. DOI: 10.1016/j.rse.2007.06.025

- Gao, X., Sun, M., Luan, Q., Zhao, X., Wang, J., He, G., & Zhao, Y. (2020). The spatial and temporal evolution of the actual evapotranspiration based on the remote sensing method in the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 708. 135111. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135111
- García-Bu-Bucogen, G., Piccolo, M. C., & Bohn, V. Y. (2022). Implementación de datos meteorológicos modelados en el norte patagónico argentino (1982-2017). *Investigaciones Geográficas*, (78), 67-87. DOI: 10.14198/INGEO.21449
- Garg, K. K., Bharati, L., Gaur, A., George, B., Acharya, S., Jella, K., & Narasimhan, B. (2012). Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*, 61(1), 60-79. DOI: 10.1002/ird.618
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., Da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G-K., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M., & Zhao, B. (2017). The Modern-Era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419-5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1
- Giraldez, A. E. (2004). SAOCOM-1 Argentina L-band SAR mission overview. *ESA Special Publication*, 565, 27.

- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Wan, Z., Huete, A. R., Van Leeuwen, W., Wolfe, R. E., Giglio, L., Muller, J. P., Lewis, P., & Barnsley, M. J. (1998). The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249.
- INA, Instituto Nacional del Agua. (2002). *Atlas digital de los recursos hídricos superficiales de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional del Agua
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K. C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-470.
- Kobayashi, S., & National Center for Atmospheric Research Staff (eds). (2015). *The climate data guide: JRA-55*. Recuperado de <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/jra-55>
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130

- Laipelt, L., Kayser, R. H. B., Fleischmann, A. S., Ruhoff, A., Bastiaanssen, W., Erickson, T. A., & Melton, F. (2021). Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 178, 81-96.
- Liu, Z., Yao, Z., & Wang, R. (2019). Simulation and evaluation of actual evapotranspiration based on inverse hydrological modeling at a basin scale. *Catena*, 180, 160-168. DOI: 10.1016/j.catena.2019.03.039
- Liu, J., Zehnder, A., & Yang, H. (2009). Global consumptive water use for crop production: The importance of green water and virtual water. *Water Resources Research*, 45(5). DOI: 10.1029/2007WR006051
- Liu, J., & Yang, H. (2010). Spatially explicit assessment of global consumptive water uses in cropland: Green and blue water. *Journal of Hydrology*, 384(3-4), 187-197. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.024
- Marshall, M., Tu, K., & Andreo, V. (2020). On parameterizing soil evaporation in a direct remote sensing model of ET: PT-JPL. *Water Resources Research*, 56(5), e2019WR026290. DOI: 10.1029/2019WR026290
- McMahon, T., Peel, M., Lowe, L., Srikanthan, R., & McVicar, T. (2013). Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Science*, 17, 1331-1363. DOI: 10.5194/hess-17-1331-2013

- Miralles, D., Holmes, T., De Jeu, R., Gash, J., Meesters, A., & Dolman, A. (2011). Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. *Hydrological Earth System Science*, 15(2), 453-469. DOI: 10.5194/hess-15-453-2011
- Monteith, J., & Unsworth, M. (1990). *Principles of environmental physics* (4th ed.). London, UK: Edward Arnold.
- Mu, Q., Heinsch, F., Zhao, M., & Running, S. (2007). Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 111, 519-536. DOI: 10.1016/j.rse.2007.04.015
- Muñoz-Sabater, J. (2019). *ERA5-Land hourly data from 1981 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.e2161bac
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google Earth Engine applications. *Remote Sensing*, 11(5), 591.
- O'Neill, P. E., Chan, S., Njoku, E. G., Jackson, T., & Bindlish, R. (2016). *SMAP L3 Radiometer Global Daily 36 km EASE-Grid Soil Moisture, Version 4*. Boulder, USA: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. DOI: 10.5067/ZX7YX2Y2LHEB
- Ocampo, D., & Rivas, R. (2013). Estimación de la radiación neta diaria a partir de Modelos de Regresión Lineal Múltiple. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 263-271. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2012.04.031

- Olivera-Rodríguez, P., Holzman, M. E., Degano, M. F., Faramiñán A. M. G., Rivas, R. E., & Bayala, M. I. (2020). Spatial variability of the green water footprint using a medium- resolution remote sensing technique: The case of soybean production in the Southeast Argentine Pampas. *Science of the Total Environment*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142963
- Orte, F., Lusi, A., Carmona, F., D'Elia, R., Faramiñán, A., & Wolfram, E. (2021). Comparison of NASA-POWER solar radiation data with ground-based measurements in the south of South America. In: *2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC)* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/RPIC53795.2021.9648428
- Pendiuk, J. E. (2022). *Modelado y análisis de problemas hidrogravimétricos* (tesis de doctorado). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
- Peng, L., Zeng, Z., Wei, Z., Chen, A., Wood, E., & Sheffield, J. (2019). Determinants of the ratio of actual to potential evapotranspiration. *Global Change Biology*, 25, 1326-1343. DOI: 10.1111/gcb.14577
- Pereyra, F. (2003). *Ecorregiones de la Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Servicio Geológico Minero Argentino.
- Poli, P., Hersbach, H., Dee, D. P., Berrisford, P., Simmons, A. J., Vitart, F., Laloyaux, P., Tan, D. G. H., Peubey, C., Thépaut, J-N., Trémolet, Y., Hólm, E. V., Bonavita, M., Isaksen, L., & Fisher, M. (2016). ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, 29(11). 4083-4097. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0556.1

- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92.
- Rienecker, M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., Bosilovich, M. G., Schubert, S. D., Takacs, L., Kim, G-K., 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. (2011). MERRA: NASA's modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications. *Journal of Climate*, 24(14), 3624–3648. DOI: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1
- Rivas, R., & Carmona, F. (2010). La ecuación de Priestley-Taylor aplicada a nivel de píxel: una alternativa para estudios detallados de cuencas. *Boletín Geológico y Minero*, 121(4), 401-412.
- Rivas, R., & Ocampo, D. (2009). Comportamiento del balance de energía en un cultivo de *Avena sativa* L. En: Silva-Rojas, O., & Carrera-Ramírez, J. (eds.). *IX Jornadas sobre Investigación de la Zona no Saturada del Suelo-ZNS'09* (pp. 336-343). Barcelona, España: CIMNE. Recuperado de <http://congress.cimne.com/zns09/frontal/papers.asp>
- Running, S., Mu, Q., & Zhao, M. (2017). *MOD16A2 MODIS/Terra Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500 m SIN Grid V006. Data set*. Sioux Falls, USA: NASA EOSDIS Land Processes DAAC. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A2.006

- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y-T., Chuang, H-Y., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2011). Updated daily. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. *Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory*. DOI: 10.5065/D61C1TXF
- Salas-Aguilar, V. M., & Paz-Pellat, F. (2018). Desarrollo de una base de datos climática nacional anual, 1989-2012: resolución 250 m. *Elementos para Políticas Públicas*, 2(2), 19-32. Ciclo del carbono y sus interacciones. Programa Mexicano del Carbono. Vol. 2. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Victor-Salas-3/publication/330005537_Desarrollo_de_una_Base_Climatica_Nacional_1989-2012_Escala_250_m/links/5c290c4492851c22a3506363/Desarrollo-de-una-Base-Climatica-Nacional-1989-2012-Escala-250-m.pdf
- Silicani, M. (2015). *Diseño, construcción y operación de un lisímetro de bajo costo* (tesis de especialización). Universidad de Cuyo, Argentina.
- Smith, P. (1981). Bilinear interpolation of digital images. *Ultramicroscopy*, 6(2), 201-204.
- Smith, G., Priestley, K., Loeb, N., Wielicki, B., Charlock, T., Minnis, P., Doelling, D., & Rutan, D. (2011). Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES), a review: Past, present and future. *Advances in Space Research*, 48(2), 254-263. DOI: 10.1016/j.asr.2011.03.009

- Stannard, D. (1993). Comparison of Penman-Monteith, Shuttleworth-Wallace, and modified Priestley-Taylor evapotranspiration models for wildland vegetation in semiarid rangeland. *Water Resources Research*, 29(5), 1379-1392.
- Strahler, A. H., Muller, J., Lucht, W., Schaaf, C., Tsang, T., Gao, F., Li, X., Lewis, P., & Barnsley, M. J. (1999). MODIS BRDF/albedo product: Algorithm theoretical basis document version 5.0. *MODIS Documentation*, 23(4), 42-47. DOI: 10.5067/MODIS/MCD43A3.006
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152-170.
- Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agricultural Water Management*, 226, 105805. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105805
- Tatem, A. J., Goetz, S. J., & Hay, S. I. (2008). Fifty years of earth-observation satellites. *American Scientist*, 96(5), 390-398. DOI: 10.1511/2008.74.390
- Van der Griend, A. A., & Owe, M. (1993). Determination of microwave vegetation optical depth and single scattering albedo from large scale moisture and Nimbus/SMMR satellite observations. *International Journal of Remote Sensing*, 14(10), 1975-1996.
- Wan, Z. (2019). *Collection-6 MODIS land surface temperature products users' guide*. Santa Barbara, USA: ICES, University of California.

- Vermote, E. F., Roger, J. C., & Ray, J. P. (2015). *MODIS Surface Reflectance User's Guide, Collection 6. MODIS Land Surface Reflectance Science Computing Facility. Version 1.4*. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09Q1.061
- Walker, E., García, G., Venturini, V., & Carrasco, A. (2019a). Regional evapotranspiration estimates using the relative soil moisture ratio derived from SMAP products. *Agricultural Water Management*, 216, 254-263. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.02.009
- Walker, E., & Venturini, V. (2019b). Land surface evapotranspiration estimation combining soil texture information and global reanalysis datasets in Google Earth Engine. *Remote Sensing Letters*, 10(10), 929-938. DOI: 10.1080/2150704X.2019.1633487
- Weinzettel, P., & Usunoff, E. (2001). Cálculo de la recarga mediante aplicación de la ecuación de Darcy en la zona no saturada. En: Medina, A., Carrera, J., & Vives, L. (eds.). *Las caras del agua subterránea, serie hidrogeológica y aguas subterráneas*. Tomo I (pp. 225-232). Madrid, España: Instituto Geológico y Minero.
- Wielicki, B. A., Barkstrom, B. R., Harrison, E. F., Lee III, R. B., Smith, G. L., & Cooper, J. E. (1996). Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(5), 853-868.
- Wilrich, P. T. (2007). Robust estimates of the theoretical standard deviation to be used in interlaboratory precision experiments. *Accreditation and Quality Assurance*, 12(5), 231-240.

- WMO, World Meteorological Organization. (1994). *Guía de prácticas hidrológicas. Adquisición de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. WMO-N_168*. (5a ed.). Ginebra, Suiza: World Meteorological Organization.
- Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration—A review. *Agricultural Water Management*, 232, 106043. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106043
- Yao, Y., Liang, S., Yu, J., Zhao, S., Lin, Y., Jia, K., Zhang, X., Cheng, J., Xie, X., Sun, L., Wang, X., & Zhang, L. (2017). Differences in estimating terrestrial water flux from three satellite-based Priestley-Taylor algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 56, 1-12.