

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-03-05

Artículos

Evaluación de un modelo de estimación de evapotranspiración en una cuenca seca

Evaluation of an evapotranspiration estimation model in a dryland basin

Aluminé Morón-Ibáñez¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1892-5355>

Ana Casado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4480-3756>

Natalia C. López³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9907-8726>

¹Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, alumine.moron@uns.edu.ar

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet)-CEDETS, Universidad Provincial del Sudoeste, Bahía Blanca, Argentina / Departamento de Geografía y Turismo, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, ana.casado@uns.edu.ar

³Área 1-Hidráulica, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina / Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur-CIC, Bahía Blanca, Argentina, nclopez@uns.edu.ar

Autora para correspondencia: Natalia C. López, nclopez@uns.edu.ar



Resumen

Las componentes del balance hídrico, precipitación, evapotranspiración, intercepción, escorrentía superficial e infiltración requieren del registro continuo de datos hidrológicos. Los datos climáticos globales son una alternativa muy útil frente a la deficiencia de registros en cuencas pobremente instrumentadas, aunque con distinto grado de confiabilidad. Este estudio evalúa y compara dos conjuntos de datos populares, CPC y CFSR, factibles de utilizarse para el completamiento de otras series y establecer una expresión de la evapotranspiración, componente de mayor incidencia en el balance hídrico, que represente adecuadamente la respuesta del sistema. Se toma como caso de estudio el arroyo Napostá Grande, Argentina, una cuenca mediana que muestra un desarrollo mayormente agropecuario en un clima seco subhúmedo. Se analizaron estadísticamente precipitación y temperaturas máxima y mínima diarias para ambos conjuntos y registros meteorológicos para 1979-2013. Se estimó la evapotranspiración real y potencial mediante los métodos de Turc, Papadakis y Thornthwaite, y se validó el balance hídrico anual resultante para 2012 y 2013, comparando las abstracciones iniciales obtenidas con las determinadas por el método del SCS. Los resultados recomiendan el uso de Papadakis y Turc para la estimación de la ET y las series de datos del CPC, pues reproducen de modo adecuado la tendencia climatológica observada. La validación del modelo corroboró tanto la componente de intercepción como el número de curva de la cuenca. Dicho modelo constituye una herramienta vital para la simulación del comportamiento hidrológico y permitiría planificar el abastecimiento humano e industrial, y el desarrollo agroalimentario de la cuenca, propendiendo a la autonomía regional.

Palabras clave: evapotranspiración, balance hídrico, cuenca hidrográfica, recopilación de datos, datos climáticos, arroyo Napostá Grande, Argentina.

Abstract

The components of the water balance: precipitation, real evapotranspiration, interception, surface runoff and infiltration, require the continuous recording of hydroclimatic data. Global climate data are a very useful alternative to the deficiency of records in poorly instrumented basins, although with different degrees of reliability. This study evaluates and compares two popular data sets, CPC and CFSR, which could be used to complete other series and establish an expression of evapotranspiration, the most important component of the water balance that adequately represents the response of the system. The Napostá Grande stream, Argentina, a medium-sized watershed that shows a mostly agricultural development in a dry sub-humid climate, is taken as a case study. Precipitation and daily maximum and minimum temperatures were statistically analyzed for both sets and meteorological records for 1979-2013. Actual and potential evapotranspiration were estimated using the Turc, Papadakis and Thornthwaite methods and the resulting annual water balance for 2012 and 2013 was validated by comparing the initial abstractions obtained with those determined by the NRCS method. The results recommend the use of Papadakis and Turc for the estimation of ET and the CPC data series, as they adequately reproduce the observed climatological trend. The validation of the model corroborated both the interception component and the basin curve number. This model is a vital tool for the simulation of hydrological behavior and would make it possible to plan human and industrial supply

and agri-food development in the basin, thus promoting regional autonomy.

Keywords: evapotranspiration, water balance, drainage basins, data collection, climatic data, Napostá Grande stream, Argentina.

Recibido: 06/02/2025

Aceptado: 23/07/2025

Publicado *ahead of print*: 28/08/2025

Versión final: 01/05/2026

Introducción

En las cuencas de origen pluvial, el escurrimiento superficial, el escurrimiento subterráneo y la humedad del suelo se sustentan de las precipitaciones ocurridas dentro de sus confines. El volumen de agua superficial y subterráneo generado por eventos de precipitación (P) resulta de la diferencia entre lo precipitado y las abstracciones iniciales, evapotranspiración (ET) e intercepción (Int), donde esta última suele contabilizarse como una proporción de P (Chow, Maidment, & Mays, 2000; Penman, 1948; Sánchez-San-Román, 2018; Thornthwaite, 1948).

La evapotranspiración representa la componente del balance hídrico que incluye la evaporación y la transpiración; es decir, la pérdida de agua desde la superficie terrestre y por parte de los organismos vivos, respectivamente. Las magnitud máxima y real de la pérdida total de agua desde la superficie de una cuenca, evapotranspiración potencial (ETP) y evapotranspiración real (ETR), respectivamente, dependen de diversos parámetros meteorológicos en un lugar y tiempo determinados. Estos

incluyen la temperatura media, mínima y máxima; la precipitación anual; la presión de vapor; la radiación solar; la humedad, y la velocidad del viento, entre otros (Chow *et al.*, 2000; Custodio, & Llamas, 1983; FAO, 2006; Guevara-Díaz, 2006; Sánchez-San-Román, 2018).

La adecuada determinación de *ETP* y *ETR* permite estimar el déficit hídrico (*D*) en cuencas agrícolas, definido como la diferencia entre ambas magnitudes. Así, *D* constituye un indicador del agua necesaria para el desarrollo óptimo de la vegetación y del contenido de humedad del suelo y, por ende, se interpreta como el requerimiento de riego de cultivos. Diversos estudios llevados a cabo en cuencas áridas y semiáridas abordan la materialización de alternativas estructurales y la implementación del aprovechamiento de recursos hídricos no convencionales para compensar las situaciones deficitarias, en especial en cuencas con producción agroalimentaria (Conagua, 2011; Herrera-Franco *et al.*, 2020; ONUAA, 2000; Redondo-Orts, López-Ortiz, Melgarejo-Moreno, & Fernández-Aracil, 2023).

La dificultad de la determinación empírica de *ETP* y *ETR* radica en la necesidad de contar con registros climatológicos completos y continuos, obtenidos con frecuencia diaria durante periodos extensos de tiempo y para sitios geográficos representativos. Ello constituye un desafío para aquellos países en los que el monitoreo de cuencas hídricas no se efectúa de forma sistemática y sostenida en el tiempo a causa de los costos de equipamiento, y de la dificultad en la continuidad de los programas de planificación y gestión del agua regionales (WMO, 2021). En este contexto, los datos climáticos globales emergen como una alternativa muy útil frente a la deficiencia espacio-temporal de registros (Sun *et al.*, 2018). Los conjuntos disponibles en la actualidad son numerosos y se distribuyen en una variedad de resoluciones espaciales y periodos de

tiempo, lo que permite resolver los problemas de continuidad y calidad de los registros climáticos históricos (Casado & Picone, 2018; Casado, Berón-de-la-Puente, & Gil, 2024; Shelton, 2009). Sin embargo, se han reconocido grandes discrepancias entre las series disponibles que dependen tanto de la fuente como de los procedimientos para derivar estimaciones (Lawal *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2018). En tal sentido, estos conjuntos no quedan exentos de errores o faltantes ocasionales, por lo que es mandatorio la revisión de los datos recibidos, a fin de analizar el grado de confiabilidad e incertidumbre que resulta de su uso para diversas aplicaciones.

En el presente trabajo se utilizan, de forma comparativa, dos conjuntos de datos climáticos globales a paso diario popularmente empleados en hidrología y climatología. Estos incluyen las series de precipitación y temperatura del *Climate Prediction Center* (CPC, NOAA) y las series de datos meteorológicos derivados del *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR, NCAR) para modelado hidrológico. El objetivo del estudio es múltiple e implica:

1. Evaluar el potencial de aplicabilidad de las series de datos climáticos globales, en función de su correspondencia con los registros disponibles en la cuenca para distintos periodos de tiempo.
2. Definir pautas de completamiento de series climatológicas incompletas.
3. Establecer cuáles, de entre todos los registros disponibles, resultan más recomendables para la alimentación de los modelos de balance hidrológico de la cuenca del arroyo Napostá Grande, Argentina.

4. Evaluar una expresión para la estimación de la componente de evapotranspiración que represente de manera adecuada la respuesta hídrica del sistema.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del arroyo Napostá Grande abarca 1 237 km² de los partidos de Bahía Blanca y Tornquist en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. El arroyo nace en las vertientes suroccidentales del Cordón Ventana, Sistema de Ventania, y discurre de norte a sur a lo largo de 107 km. Atraviesa en su cuenca inferior a la ciudad de Bahía Blanca y desemboca en el estuario homónimo, con un módulo anual de 0.9 m³/s (Figura 1). En la cuenca superior se observan afloramientos rocosos y sedimentos loésicos cementados por carbonato de calcio, mientras que en la cuenca media se encuentran suelos francos con aparición de médanos de hasta 15 m de espesor. El uso del suelo combina la cría de ganado bovino y ovino de baja y alta carga sobre suelo con el cultivo de trigo y cebada (cultivos de invierno), maíz, sorgo y girasol (cultivos de verano). La importante erosión hídrica y eólica en la cuenca se traduce en el uso de prácticas agronómicas específicas para su control, como el cultivo en terrazas y/o curvas de nivel (Carrica, 1998; Carrica, & Lexow, 2004; Gaspari *et al.*, 2006; Manis, Rosa, De-Negri, & Gaspari, 2024).

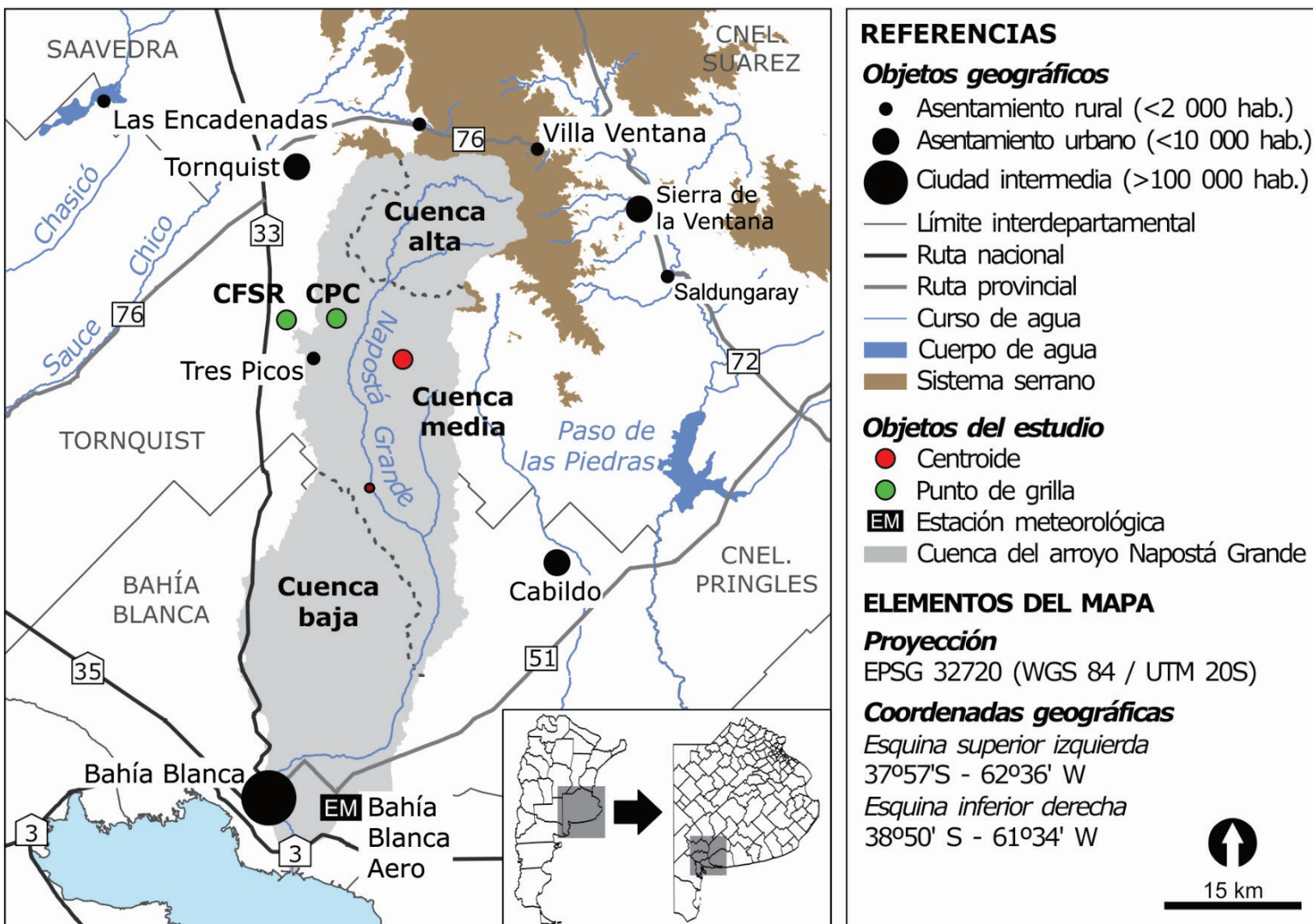


Figura 1. Cuenca del arroyo Napostá Grande y configuración regional.

El clima es seco subhúmedo. El régimen de precipitaciones exhibe una estacionalidad entre octubre y marzo, junto con una marcada variabilidad interanual (Casado, & Campo, 2019). Los eventos de precipitación extrema representan los más severos de todo el sur de la región pampeana argentina (Aliaga, Ferrelli, & Píccolo, 2017; Ferrelli, Brendel, Aliaga, Píccolo, & Perillo, 2019). La intercepción vegetal fue

estimada por Iguacel, Aguinaga-Martínez, Rango y López (2021) para la cuenca superior del arroyo Napostá Grande como el 10 % de P anual.

Metodología

Datos utilizados

En la región coexisten múltiples redes de monitoreo climático pertenecientes tanto a organismos públicos como a instituciones académicas y asociaciones civiles, al igual que hay diversos registros en cascos de estancia y estaciones de ferrocarril. Sin embargo, el alcance temporal de las series disponibles y la densidad espacial de las estaciones de registro son muy variables y dentro de la cuenca su número es limitado. Además, es usual que los registros muestren cierto grado de discontinuidad, producto de numerosas causas: roturas o fallas de los sensores; ocurrencia de eventos cuya magnitud sobrepasa la capacidad de lectura de los equipos, que afecta asimismo los sistemas de transmisión de datos; dificultad de mantenimiento de los equipos instalados, o interrupción de los programas de financiamiento que originaron y posibilitaron por primera vez la instalación de las estaciones de monitoreo. Ello, en definitiva, exacerba la deficiencia de registros continuos en espacio y tiempo.

En este contexto se utilizaron, comparativamente, dos conjuntos de datos globales de precipitación (P), temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$) y mínima ($T_{\text{mín}}$) producidos por el *Climate Prediction Center* (CPC, NOAA) y por el *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR, NCAR). El periodo concurrente para ambos conjuntos de datos se extiende desde el 1° de enero de 1979 hasta el 31 de julio de 2014. A los efectos del presente

estudio, se delimita un periodo de análisis de 35 años entre 1979 y 2013. Se extrajeron series diarias de P , $T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$ para cada conjunto, seleccionando el punto de la grilla más próximo al centroide de la cuenca de estudio (Figura 1). Se obtuvieron también series equivalentes de registros a partir de la estación meteorológica Bahía Blanca Aero (Servicio Meteorológico Nacional, SMN Argentina). La Figura 2 ilustra las curvas anuales de las series de datos utilizadas en el análisis.

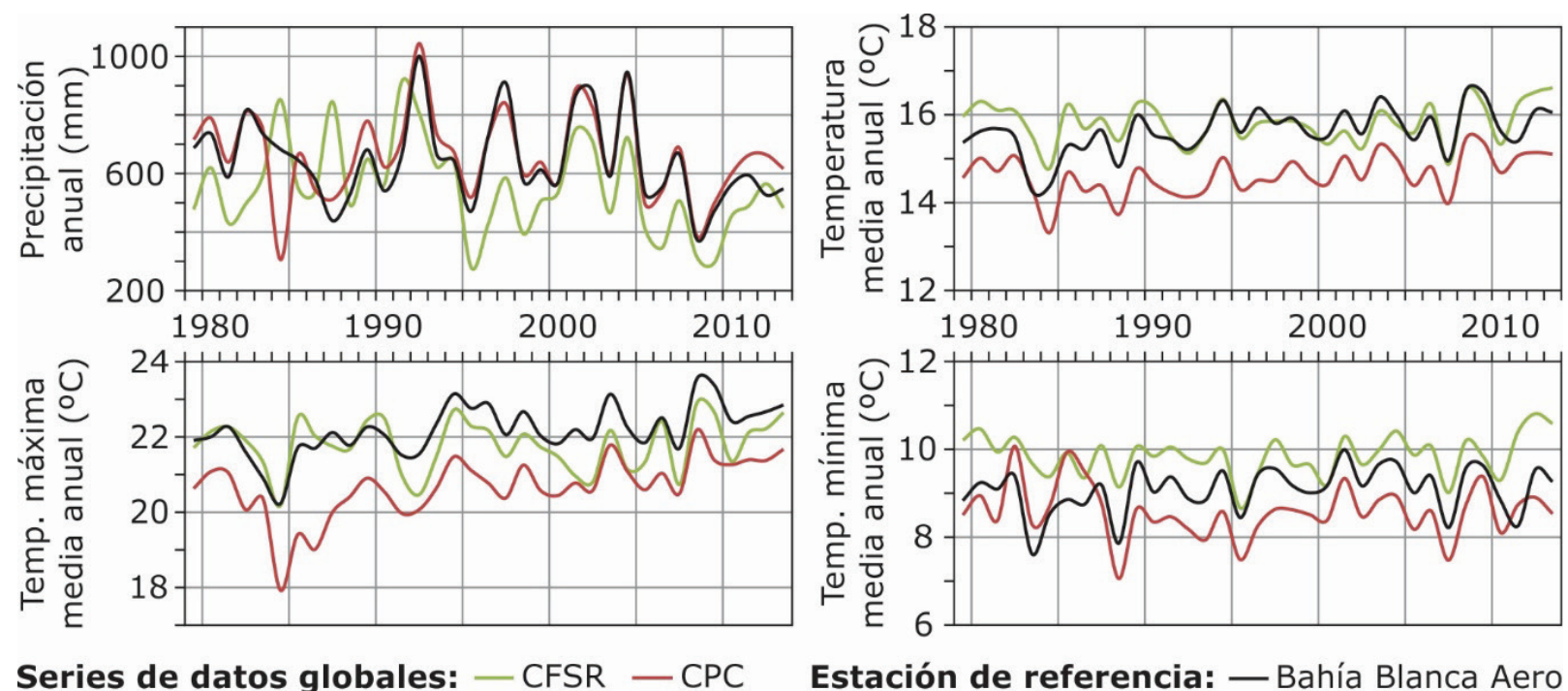


Figura 2. Series anuales de precipitación, temperatura máxima temperatura mínima y temperatura media utilizadas en el estudio. Periodo 1979-2013.

Se realizó un análisis exploratorio comparativo de (1) las precipitaciones anuales, y (2) las medias anuales de temperatura máxima y mínima ($T_{\text{máx}}$ y $T_{\text{mín}}$, respectivamente). En cada caso, se calcularon

los valores medio, máximo y mínimo del periodo (1979-2023), y la media móvil para cada serie de análisis. Según el resultado del análisis exploratorio, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) simple con factores fijos entre los registros de P anual de cada registro en cada periodo de interés y se evaluaron las diferencias mínimas significativas (DMS) entre pares de valores medios de P anual en los casos en que el ANOVA fue significativo.

Determinación de ETP y ETR

Se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) con frecuencia mensual y la evapotranspiración real (ETR) con frecuencia anual para la zona de estudio mediante las expresiones de Papadakis (1966), Thornthwaite (1948) y Turc (Custodio, & Llamas, 1983). Se compararon los resultados obtenidos para cada expresión y para cada conjunto de datos CFSR y CPC. Asimismo, se determinó el déficit hídrico en cada caso.

La expresión de Papadakis (ETP_p) (Ecuación (1)) permite estimar la evapotranspiración potencial mensual (mm) con base en la presión de vapor de saturación (e) a determinada temperatura del aire (T), considerando la media de las temperaturas máximas del mes ($e(T_{\max})$) y la media de las mínimas ($e(T_{\min})$):

$$ETP_p = 5.625(e(T_{\max}) - e(T_{\min} - 2)) \text{ donde } e = 6.108 \exp(17.27 T / (T + 237.3)) \quad (1)$$

La expresión de evapotranspiración potencial de Thornthwaite (ETP_{th}) (Ecuación (2)) depende de la temperatura media mensual (T) y del índice de calor (I) para una determinada latitud, representada por un

factor de corrección (k), que depende de la duración máxima de la insolación. Se expresa en mm por mes, como sigue:

$$ETP_{th} = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a k, \text{ con } I = \sum_{i=1}^{j=12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}, a = 6.8E^{-07}I^3 - 7.7E^{-05}I^2 + 0.018I + 0.4924 \quad (2)$$

Por último, la expresión de Turc (ETR_t) (Ecuación (3)) permite estimar la evapotranspiración real anual (mm/año) en función de la precipitación (P) y la demanda atmosférica (L), con base en la temperatura media anual (T):

$$ETR_t = \frac{P}{\sqrt{0.9 + P^2/L^2}}, \text{ con } L = 300 + 25T + 0.05T^3 \quad (3)$$

En concordancia con los resultados del ANOVA efectuado sobre los valores medios de P anual, se llevó a cabo un ANOVA simple con factores fijos a partir de los valores medios de la evapotranspiración potencial, obtenida por método de Papadakis y Thornthwaite (ETP_p y ETP_{th}), y de la evapotranspiración real obtenida por el método de Turc (ETR_t). En todos los casos se compararon los resultados logrados a partir de las series de CPC y CFSR.

Validación de resultados

Las estimaciones de las abstracciones iniciales anuales, compuestas por la suma de ETR e intercepción vegetal (Int), se validaron a través de balances hídricos efectuados para los años 2012 y 2013. Se utilizó el método del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos

(SCS, hoy *National Resources Conservation Service*, NRCS) a partir de datos diarios de escorrentía y con un valor de retención potencial máxima del suelo equivalente a $S = 192$ mm para la cuenca superior y media del arroyo Napostá Grande (López, Casado, Revollo, & Gil, 2023; NRCS, 2004). Para ello, se consideró que existe escorrentía (E) e infiltración (Inf) solo si P supera las abstracciones iniciales, determinadas en $0.2S$ (ecuaciones (4) a (6)):

$$P - ETR_t - Int = E + Inf \quad (4)$$

$$E = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (5)$$

$$ETR_t + Int = 0.2S \quad (6)$$

Resultados

Los vacíos detectados en los conjuntos de datos globales fueron escasos (0.07 y 0.32 % del total de días entre 1979 y 2013 para CFSR y CPC, respectivamente). Los vacíos se completaron mediante interpolaciones dobles siguiendo el comportamiento de la serie. El análisis exploratorio de las precipitaciones anuales indicó cambios en las medias móviles a partir de 1994 para CFSR, y 2004 para CPC y Bahía Blanca Aero (Figura 3). Los valores medios de P anual de todas las series analizadas para los periodos 1979-1993, 1994-2003 y 2004-2013 fueron 659.6, 634.2 y 548.9 mm, respectivamente, mostrando una disminución del 4 y 16 % en promedio en los 15 y 10 años que abarca cada intervalo, respectivamente. Por su

parte, el test de homogeneidad de Pettitt para las series registradas (Bahía Blanca Aero, BBA) indica un cambio negativo significativo de la media de precipitación anual en 2004 de 148 mm (para $\alpha = 0.05$). Dicho cambio es detectado también por las series de CPC, aunque no es significativo; mientras que las series del CFSR indican un cambio negativo significativo en 1994 (145 mm).

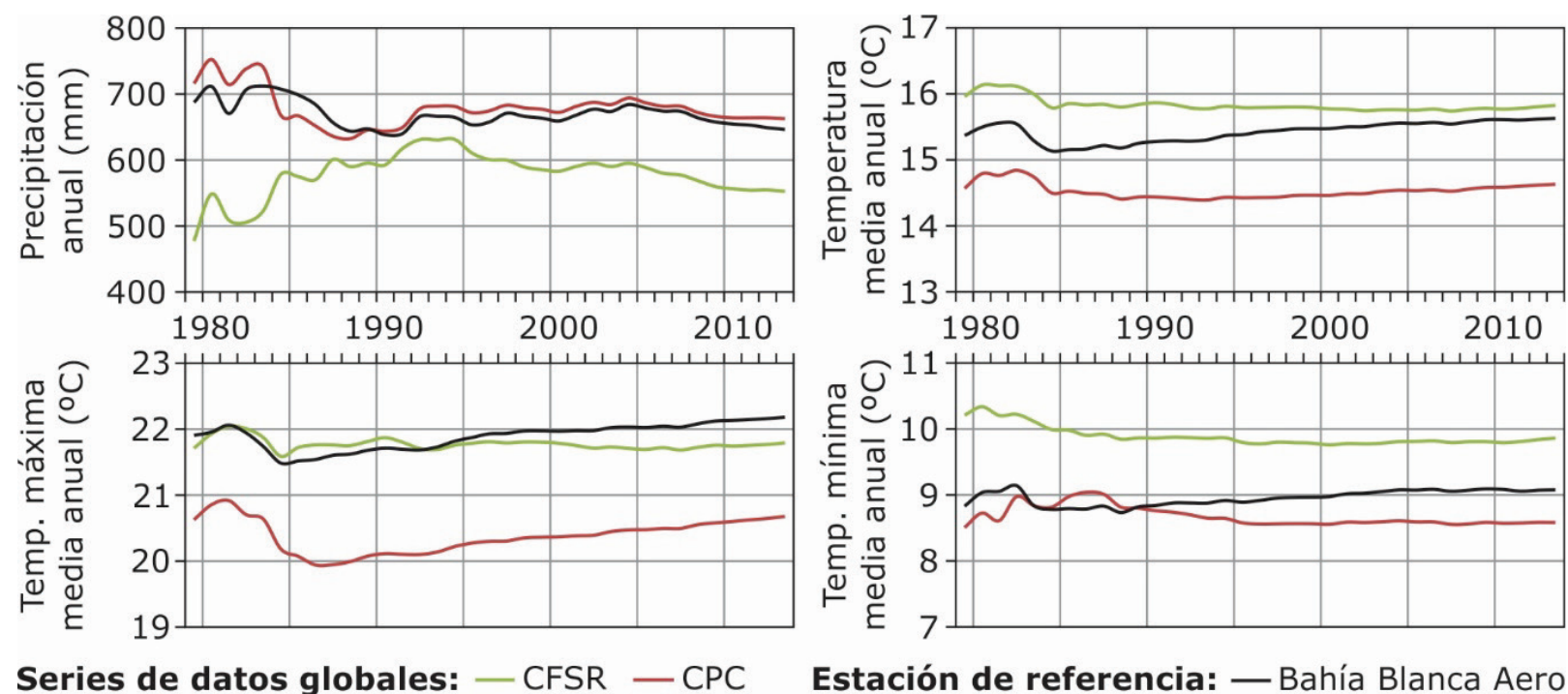


Figura 3. Media móvil para las series anuales de P, Tmed, Tmáx y Tmín. Periodo 1979-2013.

Los valores de P anual resultaron normales según el *Normal Probability Plot* y homocedásticos según el test de Levene ($p = 0.97$). El resultado del ANOVA efectuado con factores fijos desbalanceado permite afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas en los valores promedio de P anual ($p < 0.003$). El análisis de DMS con $\alpha = 0.05$ indicó que existen diferencias mínimas significativas entre P promedio

anual del periodo 1979-1993 y la del periodo 2004-2013 de CFSR. Por otro lado, no existe evidencia de diferencias mínimas estadísticamente significativas en P anual promedio de CPC y BBA en la totalidad del periodo analizado (Tabla 1).

Tabla 1. Valores medios de P anual por periodo y resultados del análisis de diferencias mínimas significativas.

P anual	CFSR 2004-2013	CFSR 1994-2003	Aero 2004-2013	CPC 2004-2013	CFSR 1979-1993	Aero 1979-1993	CPC 1979-1993	Aero 1994-2003	CPC 1994-2003
Medias	459.2	529.5	577.8	609.5	630.6	666.2	681.8	685.2	687.8
DMS	a	ab	abc	bc	bc	c	c	c	c

De acuerdo con el test de homogeneidad de Pettitt ($\alpha = 0.05$), las series anuales de temperatura máxima media indican un cambio positivo significativo en 1992 tanto para las series registradas (BBA, 0.8 °C), como para los datos globales del CPC (1.0 °C); en el caso de las series CFSR, no se detectan cambios significativos para $T_{\text{máx}}$. En relación con la temperatura mínima media anual, no se encuentran cambios estadísticamente significativos para el periodo analizado.

Cálculo de evapotranspiración

En la Figura 4 se muestran los valores de precipitación y ETP anuales obtenidos con las expresiones de Papadakis (Ecuación (1)) y Thornthwaite (Ecuación (2)), y los valores de ETR anuales calculados por el método de Turc. Se comparan asimismo las series derivadas de los registros disponibles en Bahía Blanca (BBA) y a partir de las series globales del CPC y CFSR.

Evapotranspiración potencial (ETP)

La ETP estimada por método de Thornthwaite resultó menor que la estimada por Papadakis en todo momento para ambos conjuntos de datos, CPC y CFSR, con diferencias anuales entre ambas expresiones de 47 y 406 mm para CPC (5 y 78 % de P para 1984 y 2008, respectivamente), y entre 223 y 463 mm para CFSR (28 y 166 % de P para 1992 y 1995, respectivamente).

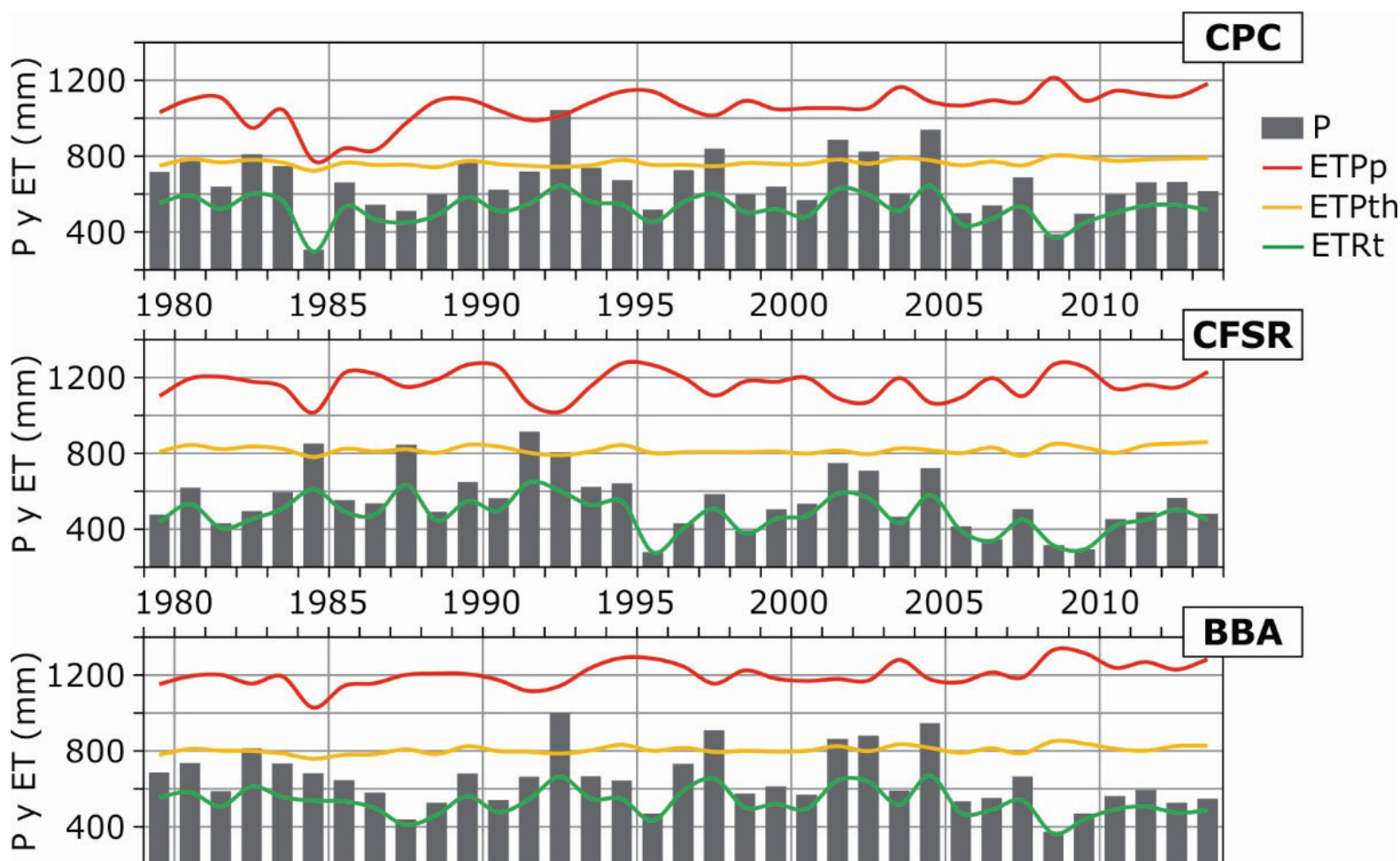


Figura 4. Lámina anual precipitada y ET anual calculada por métodos de Papadakis ($ETPp$), Thornthwaite ($ETPth$) y Turc ($ETRt$) a partir de datos climáticos globales de CFSR y CPC en mm.

Los valores de *ETP* anuales resultaron normales según el *Normal Probability Plot*, pero no homocedásticos. El ANOVA con factores fijos desbalanceado en los periodos 1979-1993, 1994-2003 y 2004-2013 para CPC y CFSR permite afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas en los valores promedio de *ETP* anual ($p < 0.0001$). El análisis de DMS con $\alpha = 0.05$ indicó que existen diferencias significativas entre las estimaciones obtenidas por el método de Papadakis (*ETPp*) respecto al método de Thornthwaite (*ETPth*) para ambas series de datos CPC y CFSR, y para todo el periodo analizado. De igual manera, se observan diferencias mínimas significativas entre las estimaciones de *ETPp* promedio para CPC en el periodo 1979-1993 respecto al periodo 1994-2013; mientras que no se encontraron evidencias de diferencias mínimas estadísticamente significativas en la estimación de *ETPth* promedio a lo largo de todo el periodo analizado para CPC y CFSR, individualmente, y de *ETPp* para CFSR (Tabla 2).

Tabla 2. Valores medios de *ETP* anual por periodo y expresión y resultados del análisis de diferencias mínimas significativas.

<i>ETP</i> anual	CPc _{th} 1979-1993	CPc _{th} 1994-2003	CPc _{th} 2004-2013	CFSR _{th} 1994-2003	CFSR _{th} 1979-1993	CFSR _{th} 2004-2013	CPC _p 1979-1993	CPC _p 1994-2003	CPC _p 2004-2013	CFSR _p 1979-1993	CFSR _p 2004-2013	CFSR _p 1994-2003
Medias	760.3	767.2	780.9	814.0	820.4	830.6	999.0	1082.9	1121.8	1160.3	1167.7	1176.9
DMS	a	a	ab	bc	bc	c	d	e	ef	fg	g	g

Evapotranspiración real (*ETR*)

Los valores de *ETR* anual estimada por método de Turc (*ETRt*) para CPC y CFSR resultaron normales según el *Normal Probability Plot* y homocedásticos según el test de Levene ($p = 0.84$); el resultado del

ANOVA efectuado con factores fijos desbalanceado en los periodos 1979-1993, 1994-2003 y 2004-2013 para CPC y CFSR permite afirmar que existen diferencias estadísticamente significativas en los valores promedio de $ETRt$ anual ($p = 0.0056$). El análisis de DMS con $\alpha = 0.05$ indicó que existen diferencias significativas entre las estimaciones de $ETRt$ promedio del periodo 1979-1993 respecto al periodo 2004-2013 para CFSR, así como también entre CFSR y CPC en los periodos 1994-2003 y 2004-2013. No se encontraron evidencias de diferencias mínimas estadísticamente significativas en la estimación de $ETRt$ promedio para CPC en la totalidad del periodo analizado (Tabla 3).

Tabla 3. Valores medios de $ETRt$ anual por periodo y resultados del análisis de diferencias mínimas significativas.

$ETRt$	CFSR 2004-2013	CFSR 1994-2003	CPC 2004-2013	CFSR 1979-1993	CPC 1979-1993	CPC 1994-2003
Medias	419.0	463.0	500.8	522.2	528.4	539.7
DMS	a	ab	bc	bc	c	c

La $ETRt$ anual estimada a partir de CPC para el periodo 1979-2013 resultó un 81 % de P anual con una desviación estándar igual a 7.4. Para CFSR, la $ETRt$ anual estimada en los periodos 1979-1993 y 1994-2013 resultó 85 y 91 % de P anual, respectivamente, con una desviación estándar igual a 7.8 y 6.5 en cada caso. Las abstracciones iniciales podrían estimarse, en cada caso, como el 91 % de P anual para CPC, y 95 y 101 % para CFSR, lo que indicaría según CFSR una pérdida de agua contenida en el horizonte edáfico del 1 % de P anual para esta cuenca a partir de 1994 a 2013, límite del análisis del presente trabajo.

Cálculo del déficit hídrico

La evolución de la evapotranspiración real anual (ETR_t), y el déficit hídrico anual que resulta por método de determinación de la ETP, Papadakis (D_p) y Thornthwaite (D_{th}), se ilustran en la Figura 5. Se comparan asimismo las curvas obtenidas a partir de las series de registro (BBA) y las series de datos globales, CPC y CFSR. En las tres series de datos se observa una tendencia general estable de la ETR_t móvil a lo largo del tiempo, reflejando el efecto moderador de la evolución temporal de la temperatura media por sobre la de precipitación anual. Por otro lado, la estimación del déficit hídrico resultó mayor según el método de Papadakis en todos los casos respecto al método de Thornthwaite. También el déficit resultó para ambos métodos mayor para las series de CFSR respecto a las de CPC y BBA, que resultaron comparables entre sí. Ello se asocia con valores mayores de ETP y valores menores de ETR en dichas series.

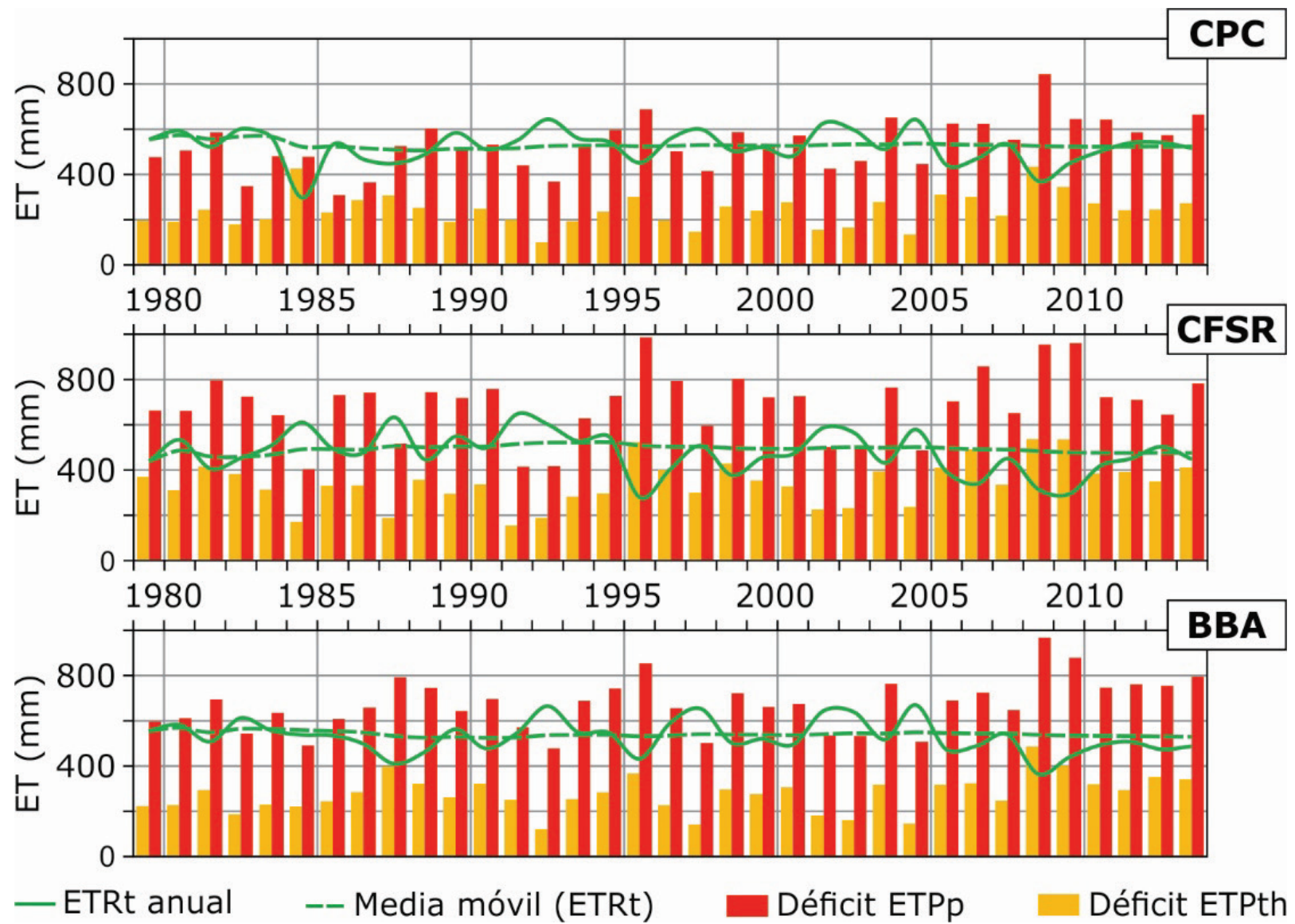


Figura 5. Evapotranspiración real de Turc (ETR_t) y déficit hídrico resultante por método de determinación de ETP , Papadakis (ETP_p) y Thornthwaite (ETP_{th}) a partir de los conjuntos de datos del CFSR y CPC. Periodo 1979-2023.

Validación por balance hídrico

El balance hídrico anual estimado a partir de CPC y CFSR para los años 2012 y 2013 se muestra en la Tabla 4. La evaluación de las abstracciones iniciales indicó, por un lado, que un número de curva $CN = 56$ representa el comportamiento hidrológico del sistema. Por otro lado, la estimación más adecuada para la interceptación vegetal (Int) sería entre 10 y 5 % de la precipitación para CPC y CFSR, respectivamente, a fin de obtener valores de lámina interceptada e infiltración compatibles con los procesos hídricos de la cuenca. Los errores porcentuales entre las abstracciones iniciales obtenidas por la estimación de ETR e Int respecto al método del SCS (hoy NRCS) alcanzaron 16 y 47 % en promedio para CPC y CFSR, respectivamente. La metodología de cálculo de balance hídrico se extrapolaron al periodo 1979-2013, estimándose los excesos hídricos en los años incluidos (Figura 6).

Tabla 4. Componentes del balance hídrico anual en CPC y CFSR, en mm. CFSR entre paréntesis.

Año	<i>P</i>	<i>ETR</i>	<i>Int</i>	<i>E</i>	<i>Inf</i>	<i>0.2 S</i>
2012	664 (565)	541 (503)	66.4 (28.2)	3.9	52.7 (29.8)	738 (937)
2013	616 (482)	517 (448)	61.6 (24.1)	8.1	29.3 (2.2)	676 (957)

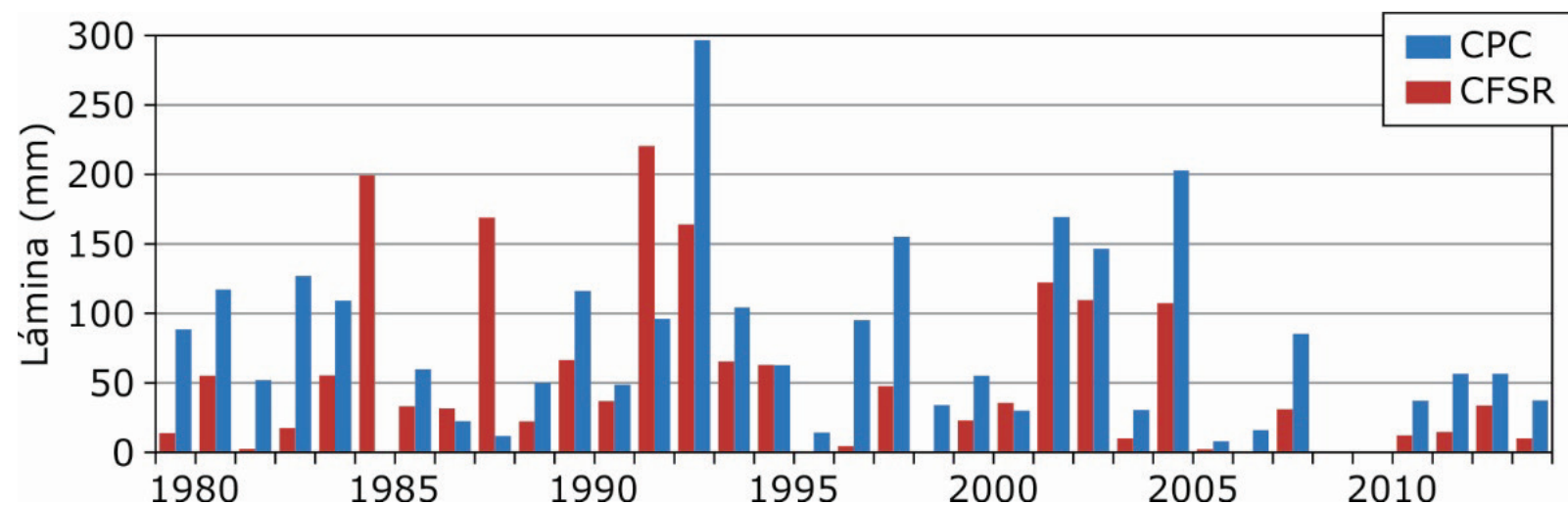


Figura 6. Excesos hídricos resultantes del balance hídrico calculado a partir de las series de CFSR y CPC.

Discusión

Variables de entrada: precipitación y temperatura

En aquellas regiones geográficas en las que el régimen hídrico muestra alternancia de ciclos secos y húmedos, la media móvil de P anual debería disminuir en los primeros y aumentar en los segundos. Se observa en el presente estudio que los datos de CFSR indicarían un periodo húmedo desde 1982 a 1994 (ΔP anual móvil = 24 %), seguido de una serie seca hasta 2013 (ΔP anual móvil = -8 %). Para CPC se observa un periodo seco entre 1983 y 1991 (ΔP anual móvil = -12 %), seguido de uno levemente húmedo hasta 2004 (ΔP anual móvil = 3 %) y otro levemente seco hasta 2013 (ΔP anual móvil = -3 %). De manera comparativa, la precipitación media anual a lo largo del ciclo seco 1994-2013 fue menor para CFSR que para CPC, mientras que CPC indicó mejor correspondencia con las series registradas, *BBA*. Entre 1979 y 1993, los valores de precipitación anual

de CFSR resultan estadísticamente similares a CPC y BBA, lo que contradice lo observado por Zhu, Xuan, Liu y Xu (2016); Tang *et al.* (2019), y Sánchez, García, Adame, Macedo y Excebio (2023) acerca de la sobreestimación de la precipitación en periodos húmedos. Las series de precipitación anual para CPC son, en todo el periodo estudiado, similares estadísticamente a la estación de control BBA.

Ello justifica recomendar, por un lado, el empleo de los datos de precipitación anual de CPC, permitiendo igualmente el completamiento de las series de registro y viceversa. Por otro lado, se desprende que las series de CFSR muestran una tendencia actual decreciente coherente con una sequía prolongada; mientras que CPC indica ciclos secos-húmedos de 10 años, en promedio, con una marcada disminución de los montos de precipitación anual entre los últimos dos ciclos y una reducción del 30 % en la media móvil de P anual para el último ciclo seco. Estas tendencias guardan mayor coherencia con las observaciones a escala regional (CIMA, 2015), con medias anuales de precipitación por debajo de la media para una buena parte de la región pampeana (Maenza, Agosta, & Bettolli, 2017; Pérez, Sierra, Momo, & Massobrio, 2015).

Los aumentos en la amplitud térmica que resulta del incremento de la temperatura máxima observados en la cuenca son coherentes con los signos de calentamiento global detectados por Ferrelli *et al.* (2019) para la zona centro-sur de la Pampa argentina. Estos resultados acompañan la tendencia de la región húmeda argentina (CIMA, 2015), así como de otras zonas geográficas del globo terrestre (Abatan, Abiodun, Lawal, & Gutowski, 2015; Shahid, 2010). El cambio positivo de las series de temperatura advierte sobre la probabilidad de migración de las isothermas hacia el sur bajo distintos escenarios de cambio climático (Ferrelli *et al.*, 2019). Sumado a la tendencia negativa de la precipitación anual, esta

situación ejercería un efecto sobre la producción agroalimentaria de la zona (Maenza *et al.*, 2017), requiriendo adaptaciones y modificaciones del manejo agronómico en lo referido a los tipos de cultivos a producir, combinación y rotación de los mismos, y época de siembra y cosecha, lo que se traduciría en un aumento en los costos de producción y una disminución en los rendimientos (CEPAL, 2011; IFPRI, 2009).

Evapotranspiración, déficit y balance hídrico

Los valores de evapotranspiración potencial (*ETP*) calculados en función de las series de CFSR resultan mayores respecto a CPC para ambos métodos y en todo el lapso temporal analizado. En paralelo, la estimación de *ETP* mediante la expresión propuesta por Papadakis (1966) indica, en promedio, resultados 27 y 29 % mayores para CPC y CFSR, respectivamente, respecto a los obtenidos mediante la expresión de Thornthwaite (1948). La estimación de *ETP* con el método de Thornthwaite resulta diferente entre ambos registros para cada intervalo temporal analizado y, para ambos, no resulta representativa de las variaciones climáticas observadas. Por su parte, la estimación mediante el método de Papadakis no es comparable entre ambas series y para CPC difiere también entre los periodos 1979-1993 y 1994-2013, reflejando de forma oportuna la variación en la amplitud térmica observada en la cuenca en dichos periodos. Ello demuestra tener mayor relevancia en la estimación de *ETP* que las variaciones de la temperatura media, cuyo valor medio móvil difiere 1.25 °C entre CPC y CFSR en los 35 años que abarca este estudio.

La evapotranspiración real (*ETR*) anual estimada acompaña la tendencia de las precipitaciones globales tanto para CPC como para CFSR,

reproduciendo de manera adecuada en ambos casos el efecto de la evolución pluviométrica observada en la cuenca a lo largo del tiempo. La estimación de *ETR* para CPC muestra valores superiores respecto a CFSR en cada intervalo de tiempo analizado, en coincidencia con valores superiores de precipitación. Respecto al déficit hídrico, los valores anuales estimados para CPC son menores a los obtenidos para CFSR, mientras que para cada serie de registros, el déficit calculado con la expresión de Papadakis (1966) resulta mayor que el correspondiente a Thornthwaite (1948). Si bien la magnitud de la diferencia entre *ETP* y *P* comparada con la reserva hídrica del suelo permite determinar situaciones de déficit o exceso hídrico, en tanto si es menor o mayor que ésta, es imprescindible verificar el comportamiento hidrológico real del sistema a través de balances hídricos efectuados a partir de registros existentes. La permanencia del déficit hídrico afecta el balance hídrico de las cuencas, provocando sequías hidrológicas, factibles de detectarse en series climatológicas históricas (Carbone, Fornerón, & Píccolo, 2015; MOPU, 1992).

El déficit hídrico estimado a partir de la evapotranspiración de Turc (Custodio, & Llamas, 1983) y Papadakis (1966) resulta comparable para CPC y BBA, y permite establecer dichos métodos como los más recomendables para la evaluación del déficit hídrico en la cuenca en estudio. Sin embargo, se requerirían análisis mensuales a fin de evaluar la necesidad de agua de los diferentes cultivos desarrollados en la zona, dado que la disminución del rendimiento debida al déficit hídrico durante el periodo vegetativo y de maduración resulta, en general, relativamente pequeña, mientras que durante los periodos de floración y de formación del rendimiento resulta de mayor importancia (FAO, 2006). De esta manera, se podrían estudiar diversas estrategias de irrigación bajo déficit

hídrico para cada cultivo, suelo y ciclo de crecimiento, al igual que evaluar la incidencia de dichas prácticas sobre el rendimiento, pudiendo combinarlas con prácticas de manejo de suelo (Cleves-Leguizamo, Calderón, & Martínez-Bernal, 2016).

Los balances hídricos efectuados en la cuenca en años con registro simultáneo de escorrentía y datos climáticos globales permitieron establecer estimaciones de intercepción vegetal representativas del sistema, evidenciando que para CFSR debería aplicarse la mitad del porcentaje de precipitación anual respecto al considerado para CPC, que coincide con el recomendado por Iguacel *et al.* (2021) para esta cuenca. Ello obedece a las diferencias entre los datos de ambas series que influyen en la determinación de *ETR*. La extrapolación de la metodología de cálculo del balance hídrico para CPC y CFSR en 2012 y 2013 permitió estimar, en cada caso, los excesos hídricos ($E + Inf$) para el periodo 1979-2013. Los mismos acompañaron la tendencia de las precipitaciones, resultando menores para CFSR, excepto en los años con precipitaciones, que superaron a las de CPC, por lo que el uso de los excesos hídricos estimados para CPC nos pondría del lado de la seguridad en la planificación de obras de control en la cuenca. Asimismo, las estimaciones de los excesos de agua son mayores en general para CPC, por lo que estarían sobreestimándose los volúmenes factibles de generar escorrentía superficial o infiltrarse. Ello representa, en definitiva, los volúmenes de agua disponibles en la cuenca. En particular, en 2009, ambos registros indicarían excesos hídricos nulos, en coincidencia con la sequía extrema detectada por Carbone *et al.* (2015) para la provincia de Buenos Aires, Argentina, para el periodo 1971-2010.

Implicancias para la planificación hídrica

El análisis climatológico expuesto en los párrafos precedentes resulta coherente con indicios de cambio climático y con la intensificación de eventos extremos de sequía, los cuales implicarían una reducción de los volúmenes de agua disponibles en el caso de cuencas de climas secos (Cedex, 2017; Dai, & Zhao, 2017; González-Hidalgo *et al.*, 2018; Huo-Po, Jian-Qi, & Xiao-Li, 2013; IPCC, 2014; IPCC, 2021; Marcos-García, & Pulido-Velázquez, 2017; Wang *et al.*, 2018). En el sur de la región pampeana argentina y en Bahía Blanca, en particular, ello proyecta un aumento del riesgo climatológico y de la vulnerabilidad de la población a futuro (Brendel, 2023; Ferrelli *et al.*, 2019).

La planificación del aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos representa una de las medidas fundamentales para reducir la vulnerabilidad frente a los eventos climatológicos a devenir, pues permitiría potenciar el desarrollo socio-económico de la cuenca y prever las adaptaciones necesarias frente a los cambios esperados en las condiciones regionales. En este sentido, en los partidos por los que escurre el arroyo Napostá Grande, Tornquist y Bahía Blanca, existen actualmente casi 1 100 ha bajo riego, en las cuales el 75 % se realiza por aspersión (INDEC, 2018). Dado que la disponibilidad de agua es la mayor limitante para los cultivos de secano regionales, el manejo de caudales excedentes captados durante eventos de crecida permitiría incrementar el rendimiento por hectárea, siempre que no se ejerza una presión sobre los recursos agua y suelo que resulten incompatibles con la sustentabilidad de la cuenca (Conagua, 2011; Marini, 2015; Marinissen, 2009; Steduto, Hsiao, Fereres, & Raes, 2012).

La fiabilidad en la cuantificación de los volúmenes de agua disponibles en la cuenca, que dependen de la capacidad de ésta de captar el agua, de los procesos hidrológicos propios de ella y los periodos en los que ellos ocurren, se torna primordial (Santillán-Gutiérrez, Dávila-Vázquez, De-Anda-Sánchez, & Díaz-Torres, 2013). En concreto, la ponderación de la componente de evapotranspiración, que en cuencas áridas y semiáridas resulta de mayor incidencia, junto con el déficit hídrico, permitirían llevar a cabo la planificación sustentable de la gestión hídrica de la región; ello, en conjunto con la oportuna evaluación de recursos alternativos y/o no convencionales, como el trasvase de otros cursos de agua y/o el reúso de aguas provenientes de las plantas de tratamiento de efluentes cloacales de poblaciones establecidas en la cuenca, respectivamente (Gil-Meseguer, Martínez-Medina, & Gómez-Espín, 2018; Morote, Olcina, & Hernández, 2019). En este sentido, los registros de CPC acompañan y complementan los resultados previos obtenidos para la cuenca del arroyo Napostá Grande respecto a porcentajes de intercepción vegetal y número de curva para cálculo de abstracciones calibrado a partir de un periodo de siete años de registros continuos (Iguacel *et al.*, 2021; López *et al.*, 2023).

Conclusiones

A lo largo de los 20 años transcurridos desde fines del siglo XX hasta la primera década del siglo XXI, el SO de la provincia de Buenos Aires, Argentina, y en particular la cuenca del arroyo Napostá Grande, vienen sobrellevando un ciclo de sequía prolongado con valores medios móviles de precipitaciones anuales cada vez más bajos. Esto ocurre en simultáneo con valores medios móviles de temperaturas máximas cada vez más altos

y de temperaturas mínimas quasi constantes, lo que implica una propensión al desarrollo de un clima regional más seco y caluroso con mayor amplitud térmica. El análisis realizado resalta la importancia de realizar evaluaciones de la evolución climatológica y la respuesta hídrica real de la cuenca en estudio, a fin de tomar decisiones respecto al empleo de expresiones empíricas que han sido históricamente de universal aplicación en multiplicidad de escenarios, y que pueden derivar en estimaciones e interpretaciones erróneas del comportamiento del sistema. De igual manera, el estudio actual demuestra que las series de datos climáticos globales del CPC resultan adecuadas para el análisis de variables climatológicas y el completamiento de series discontinuas en la cuenca de estudio para el periodo 1979-2013, pudiéndose extender dicha práctica a periodos temporales posteriores.

El presente estudio logra establecer metodologías de estimación de evapotranspiración potencial y real representativas del comportamiento hidrológico de la cuenca del arroyo Napostá Grande, recomendándose los métodos de determinación de Papadakis y Turc, respectivamente. Asimismo, el modelo propuesto fue validado con errores de 16 % en promedio, verificándose tanto la componente de intercepción vegetal como el número de curva de la cuenca. Ello representa una herramienta de gran importancia para la simulación del comportamiento hidrológico de la misma y la predicción de las distintas componentes del balance hídrico. Se podría entonces alcanzar un reconocimiento acertado de la dinámica del sistema, que permita la planificación del abastecimiento humano e industrial, y el desarrollo agroalimentario de la cuenca, propendiendo a la autonomía regional.

Para potenciar la eficiencia en la explotación y conservación de los recursos naturales de la cuenca, se podría plantear la ejecución de obras

que permitan un mejor aprovechamiento de los volúmenes de agua disponibles en la misma y que compensen el déficit hídrico observado, evaluando de igual manera la posibilidad de movilizar nuevos recursos hídricos, convencionales o no convencionales; lo anterior contribuiría a potenciar la gestión sostenible del agua, mejorar la gerencia de la producción de alimentos y contribuir al crecimiento económico, como establece el objetivo 6 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030 a nivel mundial.

Agradecimientos

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto de investigación de la Universidad Nacional del Sur: PGI 24/ZJ44 "Estudio de Balances Hídricos e Hidrológicos en Cuencas Mediante Modelos Computacionales con Ajuste a Series de Datos Históricas", dirigido por la Mg. Ing. Natalia C. López.

Referencias

- Abatan, A. A., Abiodun, B. J., Lawal, K. A., & Gutowski, W. J. (2015). Trends in extreme temperature over Nigeria from percentile-based threshold indices. *International Journal of Climatology*, 6(6), 2527-2540. <https://doi.org/10.1002/joc.4510>
- Aliaga, V. S., Ferrelli, F., & Píccolo, M. C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37, 1237-1247. <https://doi.org/10.1002/joc.5079>

- Brendel, A. S. (2023). Impacto del cambio climático: un análisis espacial del riesgo en el sur de la región pampeana (Argentina). *Papeles de Geografía*, 69, 155-168. <https://doi.org/10.6018/geografia.563951>
- Carbone, M. E., Fornerón, C. F., & Pícolo, M. C. (2015). Impacto de los eventos de sequía en la región de la cuenca hidrográfica de la laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 63, 131-142. <https://doi.org/10.14198/INGEO2015.63.09>
- Carrica, J. C. (1998). *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires* (tesis doctoral). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- Carrica, J. C., & Lexow, C. (2004). Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59(2), 281-290. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1411>
- Casado, A., Berón-de-la-Puente, F. J., & Gil, V. (2024). Series de precipitación global: implicancias para el estudio de eventos extremos en áreas serranas. *FACENA*, 34(2), 82-103. <https://doi.org/10.30972/fac.3427735>
- Casado, A., & Campo, A. M. (2019). Extremos hidroclimáticos y recursos hídricos: estado de conocimiento en el suroeste bonaerense, Argentina. *Cuadernos Geográficos*, 58(1), 6-26. <https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v58i1.6751>

- Casado, A., & Picone, N. (2018). Aplicabilidad de los datos grillados para el análisis espaciotemporal de las precipitaciones, Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Párrafos Geográficos*, 17(1), 46-62. <https://www.revistas.unp.edu.ar/index.php/parrafosgeograficos/article/view/505>
- Cedex, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2017). *Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos y sequías en España*. Madrid, España: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/3B08CCC1-C252-4AC0-BAF7-1BC27266534B/145732/2017_07_424150001_Evaluaci%C3%B3n_cambio_clim%C3%A1tico_recu.pdf
- CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2011). *Agricultura y cambio climático: instituciones políticas e innovación*. Santiago de Chile, Chile: Naciones Unidas. <https://www.uncclearn.org/resources/library/agricultura-y-cambio-climatico-instituciones-politicas-e-innovacion/>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (2000). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- CIMA, Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. (2015). *Cambio climático en Argentina: tendencias y proyecciones*. 3ra Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Buenos Aires, Argentina: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera. <https://www.cima.fcen.uba.ar/wp-content/uploads/2025/08/CCenArg-Tendencias-y-proyecciones.pdf>

- Cleves-Leguizamo, J. A., Calderón, J., & Martínez-Bernal, L. F. (2016). Los balances hídricos agrícolas en modelos de simulación agroclimáticos. Una revisión analítica. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(1), 149-163. <https://doi.org/10.17584/rcch.2016v10i1.4460>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2011). *Manual para el control de inundaciones*. Tlalpan, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.snieg.mx/Documentos/IIN/Acuerdo_10_IX/manual-para-el-control-de-inundaciones.pdf
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomo I (2ª ed.). Barcelona, España: Ediciones Omega S. A.
- Dai, A., & Zhao, T. (2017). Uncertainties in historical changes and future projections of drought. Part I: Estimates of historical drought changes. *Climate Change*, 144, 519-533. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1705-2>
- FAO, Food and Agriculture Organization. (ed). (2006). *Cuaderno 56: evapotranspiración del cultivo*. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Ferrelli, F., Brendel, A. S., Aliaga, V. S., Píccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2019). Climate regionalization and trends based on daily temperature and precipitation extremes in the south of the Pampas (Argentina). *Cuadernos de Investigación Geográfica-Geographical Research Letters*, 45(1), 93-416. <https://doi.org/10.18172/cig.3707>

- Gaspari, F. J., Bruno, J. E., Rickfelder, R. M., Hauri, B. A., Cornely, I. O., Oroná, C. R., & Leonart, M. G. (2006). *Manejo integral de cuencas hidrográficas serranas del Partido de Tornquist-Estudio de prefactibilidad*. La Plata, Argentina: Grupo de Manejo de Cuencas Hidrográficas, Universidad Nacional de La Plata.
- Gil-Meseguer, E., Martínez-Medina, R., & Gómez-Espín, J. M. (2018). El trasvase Tajo-Segura (1979-2017): actuaciones para su futuro en España. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(2), 192-209. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-02-08>
- González-Hidalgo, J. C., Vicente-Serrano, S. M., Peña-Angulo, D., Salinas, C., Tomas-Burguera, M., & Beguería, S. (2018). High-resolution spatio-temporal analyses of drought episodes in the western Mediterranean basin (Spanish mainland, Iberian Peninsula). *Acta Geophysica*, 66, 381-392. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0138-x>
- Guevara-Díaz, J. M. (2006). La fórmula de Penman-Monteith FAO 1998 para determinar la evapotranspiración de referencia, ETo. *Terra Nueva Etapa: XXII*, 22(31), 31-72. https://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_terr/article/view/1296
- Herrera-Franco, G., Martos-Rosillo, S., Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Briones-Bitar, J., Durán, A., Vélez-Upegui, J., Castro-Lucic, M., Mateos, L., Bardales, J. D., Peña, F., & Gutiérrez-Ojeda, C. (2020). Siembra y cosecha de agua (SyCA), técnicas ancestrales que solucionan problemas del siglo XXI. *18 th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.299>

- Huo-Po, C., Jian-Qi, S., & Xiao-Li, C. (2013). Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(1), 8-13. <https://doi.org/10.1080/16742834.2013.11447051>
- IFPRI, International Food Policy Research Institute. (ed). (2009). *Cambio climático: el impacto en la agricultura y los costos de adaptación*. Washington, UA: International Food Policy Research Institute. https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/AGRO_Noticias/docs/costo%20adaptacion.pdf
- Iguacel, N. A., Aguinaga-Martínez, M., Rango, B. J., & López N. C. (2021). Balance hídrico aplicado al cálculo de evapotranspiración normal en una subcuenca serrana. *Revista Estudios Ambientales*, 9(2), 193-211. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1290>
- INDEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (ed). (2018). *Censo nacional agropecuario*. Buenos Aires, Argentina: INDEC. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-Tema-3-8-87>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014-Impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects: Working group II Contribution to the IPCC fifth assessment report, 2*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386>
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

- Lawal, I. M., Bertram, D., White, C. J., Jagaba, A. H., Hassan, I., & Shuaibu, A. (2021). Multi-criteria performance evaluation of gridded precipitation and temperature products in data-sparse regions. *Atmosphere*, 12(12), 1597. <https://doi.org/10.3390/atmos12121597>
- López, N. C., Casado, A., Revollo, N. V., & Gil, V. (2023). Potencial de escorrentía en función del número de curva en una cuenca serrana, Napostá Grande (Argentina). *Geociências*, 42(3), 403-418. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i3.17188>
- Maenza, R. A., Agosta, E. A., & Bettolli, M. L. (2017). Climate change and precipitation variability over the western 'Pampas' in Argentina. *International Journal of Climatology*, 37, 445-463. <https://doi.org/10.1002/joc.5014>
- Manis, E. S., Rosa, R. J., De-Negri, G. A., & Gaspari, F. J. (2024). Estimación del coeficiente de cultivo Kc para los cultivos de invierno y pastizales en la cuenca alta del río Sauce Chico de la Provincia de Buenos Aires a partir de sensores remotos. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 123, 1-13. <https://doi.org/10.24215/16699513e136>
- Marcos-García, P., & Pulido-Velázquez, M. (2017). Cambio climático y planificación hidrológica: ¿es adecuado asumir un porcentaje único de reducción de aportaciones para toda la demarcación? *Ingeniería del Agua*, 21(1), 35-52. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6361>

Marini, M. F. (2015). Determinación de la superficie bajo riego con pivot central en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina) utilizando imágenes satelitales. *Agronomía & Ambiente*, 35(2), 109-119.

<https://agronomiayambiente.agro.uba.ar/?journal=AyA&page=article&op=view&path%5B%5D=41>

Marinissen, A. (2009). *Impacto económico del riego complementario en el sudoeste Bonaerense* (tesis magíster). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

MOPU, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (1992). *Impacto económico del riego complementario en el sudoeste Bonaerense*. Madrid, España: Ministerio del Medio Ambiente, Secretaría General de Medio Ambiente.

Morote, A. F., Olcina, J., & Hernández, M. (2019). The use of non-conventional water resources as a means of adaptation to drought and climate change in semi-arid regions: South-Eastern Spain. *Water*, 11(1), 1-19. <https://doi.org/10.3390/w11010093>

NRCS, Natural Resources Conservation Service. (2004). Chapter 10. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: *National engineering handbook*. Washington, USA: United States Department of Agriculture.

- ONUAA, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2000). *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. Experiencias en América Latina*. Serie Zonas Áridas y Semiáridas (Núm. 13). Santiago de Chile, Chile: Food and Agriculture Organization. <https://agua.org.mx/biblioteca/manual-de-captacion-y-aprovechamiento-del-agua-de-lluvia-experiencias-en-america-latina/>
- Papadakis, J. (ed). (1966). *Climates of the world and their agricultural potentialities*. Buenos Aires, Argentina: Papadakis, J.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London A.*, 1993 (pp. 120-145). <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Pérez, S., Sierra, E., Momo, F., & Massobrio, M. (2015). Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa region and their possible causes. *Climate*, 3(1), 150-167. <https://doi.org/10.3390/cli3010150>
- Redondo-Orts, J. A., López-Ortiz, M. I., Melgarejo-Moreno, J., & Fernández-Aracil, P. (2023). Análisis y alternativas para paliar el déficit hídrico en la demarcación hidrográfica del Segura (2022-2027), sureste de España. *Investigaciones Geográficas*, 79, 179-206. <https://doi.org/10.14198/INGEO.23607>
- Sánchez, M., García, J. L., Adame, S., Macedo, A., & Excebio, A. A. (2023). Evaluación de la precipitación y temperatura del CFSR (*Climate Forecast System Reanalysis*) en la cuenca del río Mayo. *Tecnología y ciencias del agua*, 15(5), 241-293. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2024-05-05>

- Sánchez-San-Román, F. J. (2018). *Evapotranspiración*. Salamanca, España: Departamento de Geología Universidad de Salamanca.
- Santillán-Gutiérrez, E., Dávila-Vázquez, G., De-Anda-Sánchez, J., & Díaz-Torres, J. J. (2013). Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas en la cuenca del río Cazonas, Veracruz, México. *Revista Ambiente & Agua*, 8(3), 104-117. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1147>
- Shahid, S. (2010). Recent trends in the climate of Bangladesh. *Climate Research*, 42(3), 185-193. <https://doi.org/10.3354/cr00889>
- Shelton, M. L. (2009). *Hydroclimatology: Perspectives and applications*. Cambridge, UK: University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754746>
- Steduto, P., Hsiao, T., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua (Estudio FAO 66: Riego y Drenaje)*. Roma, Italia: Food and Agriculture Organization. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i2800s>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Tang, X., Zhang, J., Wang, G., Yang, Q., Guan, T., Liu, C., Jin, J., Liu, Y., & Bao, Z. (2019). Evaluating suitability of multiple precipitation products for the Lancang River Basin. *Chinese Geographical Science*, 29(1), 37-57. <https://doi.org/10.1007/s11769-019-1015-5>

- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55-94.
<https://doi.org/10.2307/210739>
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Zeng, Z., Lian, Y., & Bai, X. (2018). Climate change enhances the severity and variability of drought in the Pearl River Basin in South China in the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 149-162.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.077>
- WMO, World Meteorological Organization. (2021). *2021 State of climate Services: Water* (WMO-No. 1278).
<https://library.wmo.int/idurl/4/57630>
- Zhu, Q., Xuan, W., Liu, L., & Xu, Y. P. (2016). Evaluation and hydrological application of precipitation estimates derived from PERSIANN-CDR, TRMM 3B42V7, and NCEP-CFSR over humid regions in China. *Hydrological Processes*, 30(17), 3061-3083.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10846>