

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 52 • 2025 • ISSN 2422-5703 • <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revista-asagai>
Diez J.F., Carmona F., Rivas R., Holzman M., Beninato S., Osés S. y J. Houspanossian
Dos décadas de observaciones satelitales: lecciones sobre los extremos hidrológicos en el Oeste de la región Pampeana
e024, <https://doi.org/10.59069/24225703e024>

Dos décadas de observaciones satelitales: lecciones sobre los extremos hidrológicos en el Oeste de la región Pampeana

Two decades of satellite observations: lessons on hydrological extremes in the Western Pampas region

 Jorge Francisco Diez^{1,2*} 

 Facundo Carmona^{1,2} 

 Raúl Rivas^{1,3} 

 Mauro Holzman^{4,2} 

 Sabrina Beninato^{1,2} 

 Simón Osés^{3,2} 

 Javier Houspanossian^{1,2,5} 

*Contacto

Recibido: 9 de octubre de 2024 ▪ Aceptado: 17 de enero de 2025 ▪ Publicado: xx de febrero de 2025

Resumen

El oeste de la región Pampeana es conocido por su alternancia entre ciclos de inundación y sequías, enfrentando importantes desafíos relacionados a la gestión del agua. En este sentido, comprender la relación entre los fenómenos hidrológicos extremos y los excesos y déficits de precipitación acumulados resulta relevante para la planificación y gestión territorial. En este estudio se analizó la relación entre la variabilidad hidrológica y la variabilidad climática en el Oeste de la región Pampeana, desde el año 2000 hasta el 2023. Para este análisis se construyeron series temporales mensuales de anomalías de almacenamiento de agua terrestre (GRACE/GRACE-FO), de cobertura superficial de agua (Landsat) y del índice estandarizado de precipitación-evapotranspiración (SPEI) a múltiples escalas temporales (1 a 48 meses). A partir del método

de nivel de umbral se identificaron tres episodios de inundación (2000/2004, 2012/2013 y 2016/2017) y dos de sequías (2008/2012 y 2023). Se evidenció que las condiciones acumuladas extremadamente húmedas conjuntamente con niveles altos de almacenamiento de agua terrestre pueden generar inundaciones severas. Por otra parte, las altas correlaciones entre SPEI de 36 y 48 meses con el almacenamiento de agua terrestre ($r = 0,85$; $p < 0,01$) demostraron la importancia de los excesos y déficits de precipitación acumulados en el tiempo para comprender la sucesión de episodios de inundaciones y sequías, así como también la alta capacidad de los índices para monitorear el estado hidrológico de la región. Estos hallazgos resaltan la relevancia de las observaciones satelitales para mejorar la gestión y reducción de los

1 Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA), Tandil, Argentina

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

3 Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires, Tandil, Argentina

4 Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA), Azul, Argentina

5 Departamento de Geología, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina

Artículo publicado en el marco del Dossier Temático "Celebración del 40 aniversario de la creación del Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo Jorge Usunoff" (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires - Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires).

riesgos asociados a las inundaciones y sequías.

Palabras clave: gestión del agua; GRACE y SPEI; inundaciones y sequías; variabilidad hidrológica.

Abstract

The Western Pampas region is known for its alternating cycles of floods and droughts, facing important challenges related to water management. In this sense, understanding the relationship between extreme hydrological phenomena and accumulated precipitation excesses and deficits is relevant for territorial planning and management. This study analyzed the relationship between hydrological variability and climate variability in the Western Pampas region, from 2000 to 2023. For this analysis we built a monthly time series of terrestrial water storage anomalies (GRACE/GRACE-FO), surface water cover (Landsat) and standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI) at multiple time scales (1 to 48 months). From the threshold level method, three floods (2000/2004, 2012/2013 & 2016/2017) and two droughts (2008/2011 & 2023) episodes were identified. It was evident that extremely wet cumulative conditions in conjunction with high levels of terrestrial water storage can give rise to severe floods. Moreover, the high correlations between SPEI 36 and 48 with terrestrial water storage ($r = 0.85$; $p < 0.01$) proved the importance of cumulative precipitation excesses and deficits over time to understand the succession of flood and drought episodes, as well as the high capacity of climatic indices to monitor the hydrological state of the region. These findings highlight the relevance of satellite observations to improve the management and reduction of risks associated with floods and droughts.

Keywords: floods and droughts; GRACE & SPEI; hydrology variability; water management.

INTRODUCCIÓN

Las inundaciones y sequías son extremos hidrológicos que ponen en riesgo la disponibilidad de agua y la seguridad alimentaria a nivel global, donde su monitoreo y análisis requieren especial atención en el contexto actual de cambio climático y global (Famiglietti & Rodell, 2013). En este sentido, la proliferación de datos satelitales durante las dos últimas décadas ha resultado clave para comprender, evaluar y mejorar la gestión de los recursos hídricos (Famiglietti et al., 2015; Rodell et al., 2018).

Durante estos últimos 20 años, las observaciones satelitales han revolucionado nuestra comprensión sobre la capacidad de almacenamiento de agua de los ecosistemas terrestres, conjuntamente con los cambios en la superficie de agua, y sus relaciones con la variabilidad climática (Vicente-Serrano et al., 2010; Pekel et al., 2016; Scanlon et al., 2023). La misión Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE/GRACE-FO) ha brindado contribuciones únicas para comprender y monitorear el almacenamiento de agua terrestre, desde su lanzamiento en 2002 (Tapley et al., 2019). Por otra parte, el procesamiento de imágenes satelitales ópticas, como las del programa Landsat, han posibilitado mapear y analizar los cambios en la superficie de agua a diferentes escalas temporales y espaciales (Donchyts et al., 2016; Pekel et al., 2016). A su vez, la integración con índices estandarizados como el SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010) mejora las posibilidades de comprender la respuesta de los diferentes compartimentos del sistema hidrológico frente a la variabilidad climática, permitiendo una caracterización

más precisa de fenómenos como las inundaciones y las sequías (López-Moreno et al., 2013; Van Loon, 2015). En este sentido, a escala de grandes cuencas, la capacidad de almacenamiento de agua terrestre tiene un rol importante en la ocurrencia de extremos hidrológicos en comparación con los excesos o déficits de precipitaciones puntuales (Van Loon y Laaha, 2015; Sun et al., 2024). De manera similar, en grandes planicies sedimentarias del mundo, los tiempos de respuesta y la memoria de los diferentes compartimentos hidrológicos en el almacenamiento de agua cobran especial importancia para comprender su sensibilidad hidrológica.

La llanura Pampeana, es una planicie sedimentaria de clima húmedo-subhúmedo a semiárido, de baja pendiente y escurrimiento lento, lo cual favorece niveles freáticos someros y la acumulación de agua en zonas bajas (Jobbagy et al., 2008; Aragón et al., 2011). La dinámica de las inundaciones es variable, presentando diferentes características en cada subregión (Kuppel et al., 2015). Particularmente en el sector oeste, predominan inundaciones de larga duración, ya que la región presenta suelos de textura gruesa y ausencia de horizontes impermeables, lo cual facilita la conexión entre aguas subterráneas y superficiales. Esto favorece los procesos de inundación por ascensos del nivel freático en respuesta a sucesivos eventos húmedos (Aragón et al., 2011; Kuppel et al., 2015). En contrapartida, durante los ciclos secos la situación se invierte, disminuyendo en primer lugar la superficie de agua seguido del descenso del nivel freático, debido a las pérdidas por procesos de evaporación (Aragón et al., 2011). Por otra parte, durante estos ciclos también se manifiestan retracciones significativas en el almacenamiento de agua terrestre (Chen et al., 2010). En los últimos 50 años, la región

pampeana ha experimentado diferentes ciclos de inundaciones y sequías que produjeron grandes impactos negativos en las economías regionales y locales (Fuschini Mejía, 1994; Viglizzo y Frank, 2006; Viglizzo et al., 2009; Mercáu et al., 2013; Bert et al., 2021). Por ello, comprender la relación entre los fenómenos hidrológicos extremos y los excesos y déficits de precipitación resulta relevante para la planificación y gestión territorial del Oeste de la región Pampeana.

Diferentes estudios abordaron la relación espacio-temporal entre la superficie de agua, el nivel freático, anomalías de precipitación e índices climáticos, mostrando, por ejemplo, que el Índice Estandarizado de Precipitación-Evapotranspiración (SPEI) es útil para monitorear el estado hidrológico de ciertas subregiones de la llanura pampeana (Bohn et al., 2016; Bohn et al., 2020; Rainhart et al., 2024). Sin embargo, en el oeste de la región Pampeana no se ha estudiado la relación entre las inundaciones y sequías, en términos de superficie de agua, conjuntamente con el almacenamiento de agua terrestre y los excesos y déficits de precipitaciones acumulados a diferentes escalas temporales. En este estudio, analizamos la relación entre la variabilidad hidrológica y la variabilidad climática en el oeste de la región Pampeana, mediante la elaboración y combinación de series temporales mensuales de superficie de agua, anomalías de almacenamiento de agua terrestre y SPEI a diferentes escalas temporales, aprovechando el desarrollo satelital de los últimos 20 años. Las principales preguntas a responder son:

¿Cuáles son los principales episodios de inundación y sequía identificados, y que relación guardan con los niveles de almacenamiento de agua terrestre y los SPEI a diferentes escalas temporales?

¿Cuál es la escala temporal de SPEI que mejor captura la variabilidad hidrológica de la región, y que permite un monitoreo más efectivo de los extremos hidrológicos?

¿Cómo es la sensibilidad de las variables hidrológicas ante la variabilidad climática de la región, durante los diferentes episodios de inundación y sequía?

METODOLOGÍA

1. Zona de estudio

La región de estudio se extiende sobre 49.761 km² en la llanura pampeana, abarcando parte de lo que se conoce como el oeste este de la región Pampeana o Pampa Interior (Soriano et al. 1991) (Figura 1A). En el sustrato y parcialmente aflorantes se encuentran sedimentos limosos de tipo loésico. Por otra parte, el paisaje está dominado por sedimentos arenosos de origen eólico que dan lugar a las dunas que caracterizan la región. Esto, conjuntamente con la topografía extremadamente plana y las condiciones climáticas de la región, favorecen el bajo escurrimiento superficial regional. Por ello, la región posee una red de drenaje escasamente integrada, un sistema de aguas subterráneas activo que se encuentra a una profundidad somera y una alta den-

sidad de cuerpos de agua (Iriondo, 1999; Aradas et al., 2002). Los excesos y déficits de precipitaciones pueden ocasionar episodios de inundaciones y sequías respectivamente, ocasionando expansiones y retracciones de la superficie de agua (Figura 1B). A su vez, en las últimas décadas el paisaje se ha visto modificado debido al reemplazo de pastizales nativos por cultivos anuales y pasturas, convirtiéndose en una de las zonas más productivas de la Argentina (Viglizzo y Frank, 2006; Baldi y Paruelo, 2008). El clima de la región es templado, húmedo a subhúmedo, con una temperatura media anual de 16°C y una precipitación media anual de 980 mm (Díaz Zorita et al., 1998; Viglizzo et al., 2009). Los regímenes de precipitación disminuyen de este a oeste y se concentran en las estaciones de primavera, verano y principios de otoño (León, 1992). Las precipitaciones se producen a partir del choque de masas de aire húmedo que ingresan desde el norte y noreste con masas de aire más seco y frío provenientes del suroeste.

2. Superficie de agua

La superficie de agua se calculó mediante la aplicación del índice Modificado de Diferencia Normalizada de Agua (MNDWI) (Xu, 2005). Para esto, se utilizaron imágenes de la serie Landsat 7 ETM + y 8 OLI a una resolución espacial de 30 metros, para el periodo del mes de enero del 2000 hasta diciembre del 2023. El MNDWI se computó utilizando la ecuación (1):

$$MNDWI = \frac{(Banda\ Verde - Banda\ Infrarrojo\ de\ onda\ corto\ 1)}{(Banda\ Verde + Banda\ Infrarrojo\ de\ onda\ corto\ 1)} \quad (1)$$

Dónde la Banda Verde corresponde a reflectancias en la región espectral entre 0,52 y 0,60 µm, y la Banda Infrarroja de onda corta a reflectancias en la región espectral entre 1,55 y 1,75 µm. El índice varía entre -1 y 1, siendo los valores más cercanos a 1 los que indican una mayor probabilidad de presencia de agua pura. Se estableció un umbral superior a 0,2 para detectar superficie de agua, basándose en que valores superiores a este umbral suelen corresponder a cuerpos de agua más definidos (El-Asmar et al., 2013). Por otra parte, a cada mosaico mensual obtenido se le calculó el porcentaje de superficie sin datos, debido a nubosidad, y se descartaron los meses con más del 10% sin datos. Para rellenar los datos mensuales faltantes de superficie de agua se realizó una interpolación lineal. La serie temporal mensual obtenida de superficie de agua fue contrastada con el producto JRC Monthly Water History v1.2, desarrollado por el Joint Research Center (Pekel et al., 2016). La correlación hallada entre los dos conjuntos de datos fue fuerte y significativa ($r = 0,89$; $p < 0,01$). Esto confirma la fiabilidad del producto elaborado y su capacidad para capturar la dinámica de la superficie de agua en la región de estudio.

3. Almacenamiento de agua terrestre

Se emplearon tres soluciones provenientes de la misión

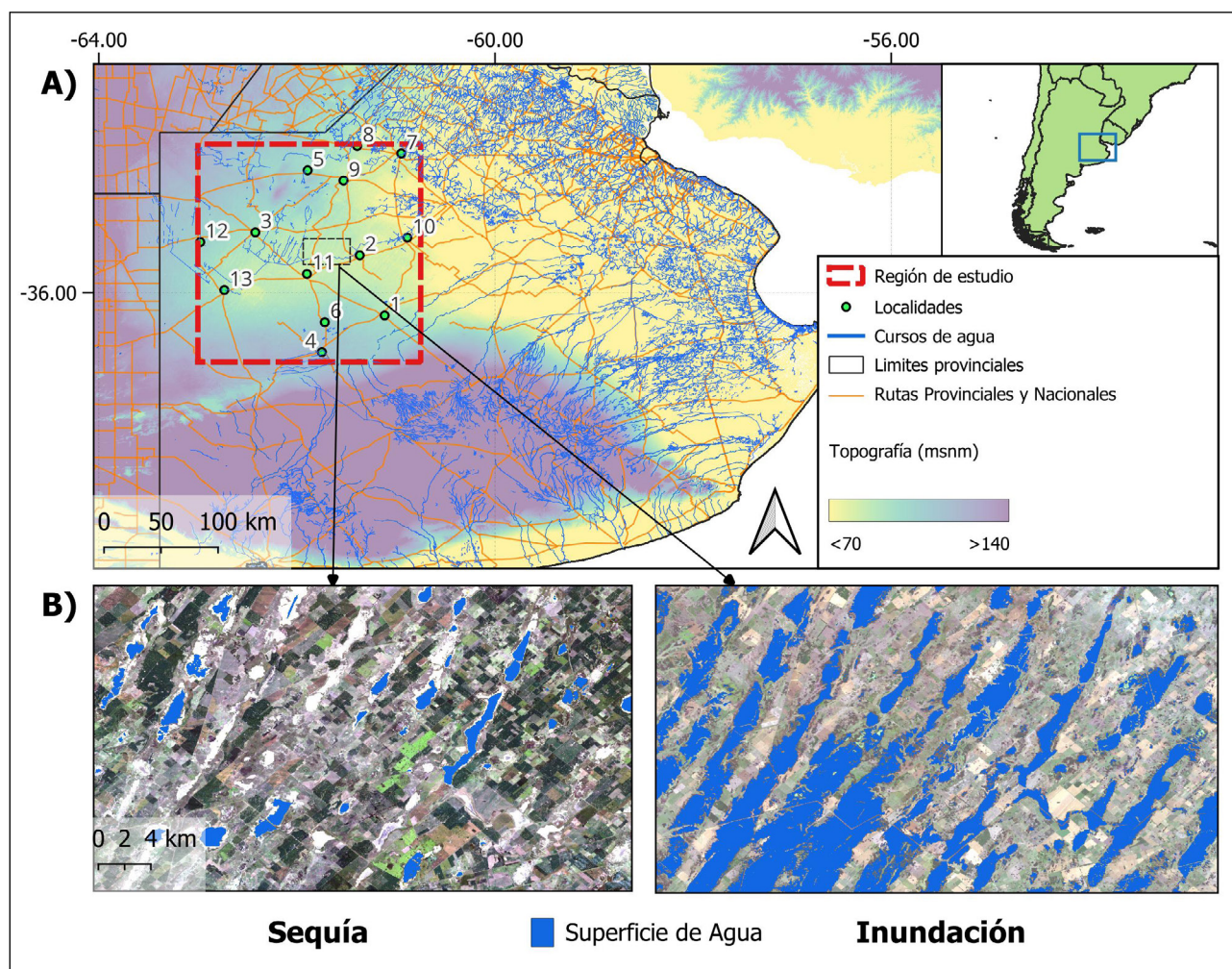


Figura 1. A) Mapa topográfico de la región de estudio, generado a partir del modelo de elevación digital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), con una resolución espacial de 90 metros. El mapa incluye la delimitación de la región de estudio y las principales localidades pertenecientes a la misma, numeradas para su identificación: 1- Bolívar, 2- Carlos Casares, 3- Carlos Tejedor, 4- Daireaux, 5- Gral. Pinto, 6- Henderson, 7- Junín, 8- Leandro N. Alem, 9- Lincoln, 10- 9 de julio, 11- Pehuajó, 12- América, 13- Trenque Lauquen. B) Fracción del paisaje de la región de estudio, mostrando composiciones color verdadero de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ y 8 OLI, conjuntamente con la superficie de agua, en condiciones de sequías (febrero 2023) e inundación (noviembre 2001).

GRACE/GRACE-FO para cubrir las series temporales de anomalías de almacenamiento de agua terrestre desde abril de 2002 hasta diciembre de 2023. Estas soluciones expresan el total de agua integrada verticalmente tanto por encima como por debajo de la superficie, en unidades de espesor de agua equivalente (cm). Se utilizaron las soluciones proporcionadas por el Centro de Investigación Espacial de la Universidad de Texas en Austin (CSR) (Save et al., 2016), el Laboratorio de Propulsión a Chorro del Instituto Tecnológico de California (JPL) (Watkins et al., 2015) y el Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (GSFC; NASA) (Loomis et al., 2019). Se promediaron espacialmente las tres fuentes de datos para obtener un registro medio del almacenamiento de agua terrestre en la región de estudio. Los datos faltantes en la serie temporal fueron imputados utilizando la técnica de aprendizaje automático conocida como Gradient Boosting Machine (GBM)

(Friedman, 2001). Este método se aplicó tomando en cuenta los datos de superficie de agua y los del SPEI de diferentes escalas temporales (1, 3, 6, 9, 12, 18, 24, 36 y 48 meses).

4. Variables climáticas

El SPEI (Vicente-Serrano et al., 2010) es un índice de sequía climática multiescalar, por lo cual puede analizarse y calcularse a diferentes escalas temporales, permitiendo evaluar la variabilidad climática temporalmente. El SPEI se calcula a partir de la diferencia mensual entre los datos de precipitación y de evapotranspiración potencial, representando un balance hídrico simple. El valor medio del SPEI es 0, mientras que su desviación típica es 1 (Tabla 1). El SPEI es una variable estandarizada, por lo cual puede compararse con otros valores de SPEI a lo largo del tiempo y del espacio. Los valores promediados espacialmente y a múltiples escalas

temporales (1 a 48 meses) se obtuvieron mediante la página web del Drought Monitor Center (<http://sac.csic.es/spei/home.html>).

Tabla 1. Clases de SPEI definidos por Vicente Serrano et al. (2010).

SPEI	Clases
Mayor o igual a 2	Extremadamente húmedo
De 1,5 a 1,99	Muy húmedo
De 1 a 1,49	Moderadamente húmedo
De -0,99 a 0,99	Condiciones normales
De -1 a -1,49	Moderadamente seco
De -1,5 a -1,99	Muy seco
Menor o igual a -2	Extremadamente seco

Para una evaluación más completa, se incorporaron al análisis la precipitación y evapotranspiración potencial acumulada mensual. Los datos de precipitación se obtuvieron a partir del producto CHIRPS (Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data; Funk et al., 2015) a una escala temporal diaria. Para obtener la serie temporal mensual de precipitación, los valores diarios se promediaron espacialmente sobre la región de estudio y posteriormente se acumularon a una escala mensual. Por otra parte, los datos de evapotranspiración potencial se obtuvieron a partir de las bases de datos TerraClimate a escala temporal mensual (Abatzoglou et al., 2018). Posteriormente, los datos se promediaron espacialmente para la región de estudio, para obtener un registro medio de dicha variable.

5. Identificación de episodios extremos y análisis de datos

Se identificaron episodios de inundación y sequía aplicando el método de nivel de umbral y utilizando la superficie de agua como principal indicador (Van Loon, 2015). Siguiendo los lineamientos de Whitworth-Hulse et al. (2023), se definieron los episodios de inundaciones como aquellos meses con valores de cobertura superficial de agua superiores al percentil 80 de la distribución, mientras que los episodios de sequías se definieron a partir de aquellos meses que presentan valores de cobertura superficial de agua inferiores al percentil 20 de la distribución.

Para explorar la relación entre la variabilidad hidrológica y climática se elaboró una matriz de correlación de Spearman, combinando las diferentes series temporales mensuales de superficie de agua, anomalías de almacenamiento de agua terrestre y SPEI a diferentes escalas temporales. Además, se realizó un gráfico de dispersión para comprender la

sensibilidad de las variables hidrológicas ante la variabilidad climática.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Análisis de series temporales

En la región se identificaron, desde comienzos de los 2000, tres episodios de inundación y dos de sequía (Figura 2A). Los episodios presentaron una significativa variabilidad en términos de duración y extensión de la superficie de agua. En relación a las inundaciones, el primer episodio (EI1) es el de más larga duración, transcurriendo entre el año 2000 y comienzos del 2004. La superficie de agua alcanzó su máximo valor en el año 2001 (11,91%; 5.998 km²) (Figura 2A). El segundo episodio (EI2) transcurrió entre los años 2012 y 2013, siendo el de menor duración y el que menor extensión de superficie de agua presentó de los tres (4,79%; 2.415 km²). Sin embargo, el EI2 presentó la máxima variación de superficie de agua de todo el registro, evidenciando un incremento de 1932 Km² en 6 meses (Figura 2A). Dicha variabilidad hace referencia a un episodio de inundación de corta duración (Kuppel et al., 2015). El tercer episodio (EI3) se extendió desde finales del 2016 hasta finales del 2017, alcanzando una máxima extensión de superficie de agua durante el mes de septiembre de 2017 (7,58%; 3816 km²) (Figura 2A).

Por otra parte, en relación a los episodios de sequía, el primero (ES1) transcurrió desde finales del 2008 hasta comienzos del 2012, siendo el de más larga duración registrado en el periodo de estudio. La superficie de agua experimentó una reducción drástica de su área durante los años 2009 y 2011, alcanzando valores de cobertura superficial del agua de 0,54% (276 km²) y 0,56% (282 km²) respectivamente (Figura 2A). El segundo episodio (ES2) ocurrió durante el 2023, siendo el de menor duración, y se observaron valores de superficie de agua incluso menores que los observados en el primer episodio (0,5%; 256 km²) (Figura 2A). Si bien existen otros meses en los cuales la cobertura superficial de agua alcanzó valores mínimos al percentil 20, dichos episodios no fueron constantes en el tiempo como los dos mencionados anteriormente.

Los cambios en el almacenamiento de agua terrestre mostraron una dinámica similar a la ocurrencia de los episodios de inundación y sequías (Figura 2A y 2B). Durante EI1, se observaron anomalías de almacenamiento de agua terrestre por encima de lo normal, cercanas o mayores a 10 cm. El pico máximo de anomalía se registró en 2002, alcanzando los 20,32 cm (Figura 2B). En EI2, el almacenamiento de agua varió entre -14,85 cm (enero de 2012) y 4,09 cm (diciembre de 2012), representando un incremento del almacenamiento de 18,94 cm en solo un año (Figura 2B). Para el EI3, se observó que las anomalías de agua terrestre variaron entre 5,73 cm (febrero 2016) y 14,72 cm (junio de 2017), representando un incremento de 8,99 cm en 16 meses. Dado que el almacenamiento de agua terrestre en dicho episodio se encontraba en valores positivos, el incremento representó

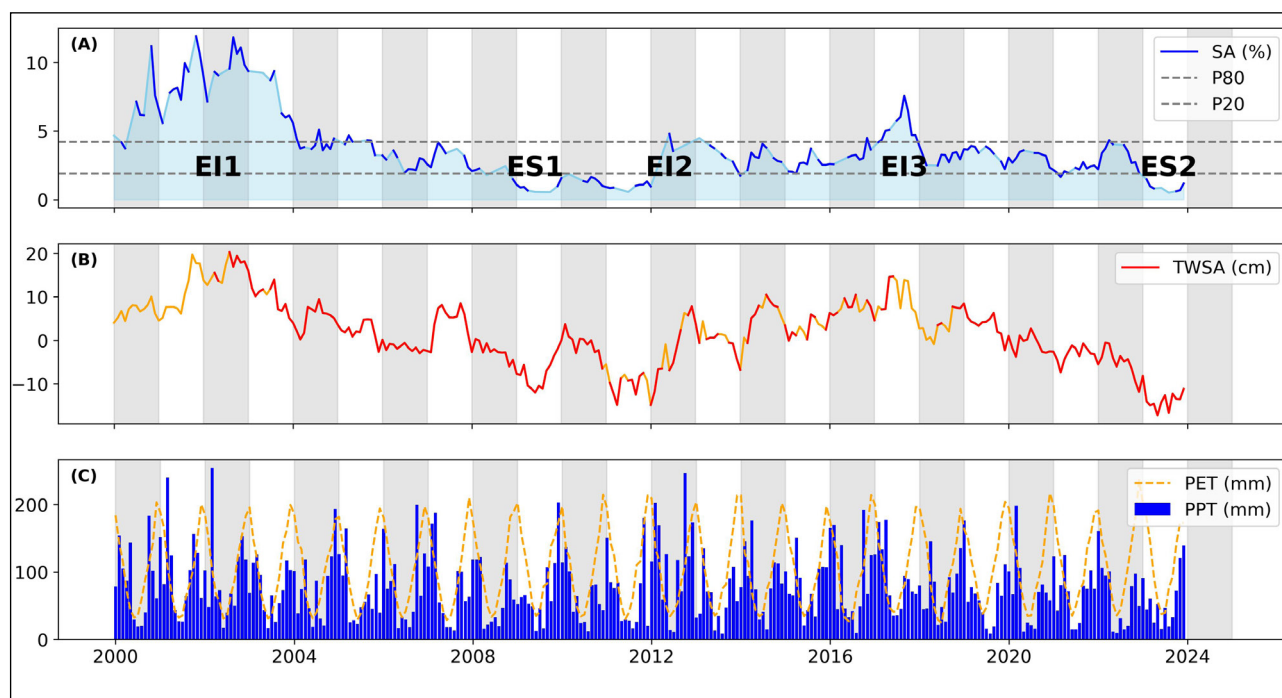


Figura 2. A) Serie mensual de superficie de agua (SA (%)). La línea azul corresponde a los datos originales, mientras que la línea celeste corresponde a los datos interpolados. B) Serie mensual de anomalías de almacenamiento de agua terrestre (TWSA (cm)). La línea roja corresponde a los datos originales de TWSA, mientras que la línea naranja corresponde a los datos faltantes obtenidos mediante la técnica GBM. C) Serie mensual de precipitación (PPT (mm)) y evapotranspiración potencial (PET (mm)).

una inundación de mayor duración y extensión que EI2. Por otra parte, ES1 evidenció una disminución del almacenamiento de agua, pasando de -0,66 cm a -14,88 cm, al final del episodio. A su vez, durante el transcurso del episodio, el almacenamiento de agua terrestre presentó una mayor variabilidad en comparación de la superficie de agua, lo cual sugiere una respuesta más retardada del almacenamiento de agua terrestre a los procesos de secado. Durante ES2, el almacenamiento de agua terrestre osciló entre valores por debajo de -8,19 cm, alcanzando un mínimo de -17,27 cm en mayo de 2023 (Figura 2B).

La precipitación acumulada mensual registró valores extremadamente altos para los años 2001, 2002 y 2012, siendo coincidente con la ocurrencia de los EI1 y EI2. Por otra parte, la máxima diferencia entre la PPT y la PET acumulada mensualmente se observó durante los veranos del 2008-2009 y 2022-2023, coincidente con la ocurrencia de ES1 y ES2 (Figura 2A y 2C).

Las series temporales de SPEI a diferentes escalas temporales reflejaron que la región ha experimentado diferentes condiciones húmedas y secas a diferentes escalas temporales (Figura 3). Los repetidos excesos y déficits hídricos de diferente magnitud, a escalas anuales y multianuales, son aquellos que mejor explican la sucesión de ciclos de inundaciones y sequías (Figuras 2 y 3).

2. Respuesta del sistema hidrológico

Las relaciones entre la superficie de agua, las anomalías de almacenamiento de agua terrestre y los SPEI reflejaron que las variables hidrológicas se correlacionan de buena forma con los índices, a medida que estos últimos incrementan su escala temporal. Se observó que la superficie de agua y las anomalías de almacenamiento de agua terrestre se asociaron de forma positiva y fuerte con los SPEI 36 y 48 (Figuras 2, 3 y 4). Estos resultados sugieren que el sistema hidrológico tiene una respuesta retardada o acumulativa a los excesos o déficits de precipitación. Este tipo de respuesta es típica de sistemas en los cuales el agua subterránea posee un rol hidrológico importante (Aragón et al., 2011; Lopez-Moreno et al., 2013). Por otra parte, dejan en evidencia la fuerte conexión entre niveles altos de almacenamiento con periodos de inundaciones severas (Kuppel et al., 2015). Además, se observó que las variaciones de almacenamiento de agua terrestre presentaron una mayor correlación con los SPEI, en comparación con la dinámica superficial de agua de la región (Figura 4). Estos resultados demuestran la posibilidad de monitorear el estado y la variabilidad hidrológica de la región mediante el SPEI de escalas temporales acumuladas de 36 y 48 meses (3 y 4 años).

3. Sensibilidad hidrológica y variabilidad climática

La superficie de agua y la anomalía de almacenamiento de agua terrestre presentaron una correlación fuerte y significativa ($r = 0,8$; $p < 0,01$; Figura 4). Dicho resultado sugiere que la dinámica superficial del agua está estrechamente

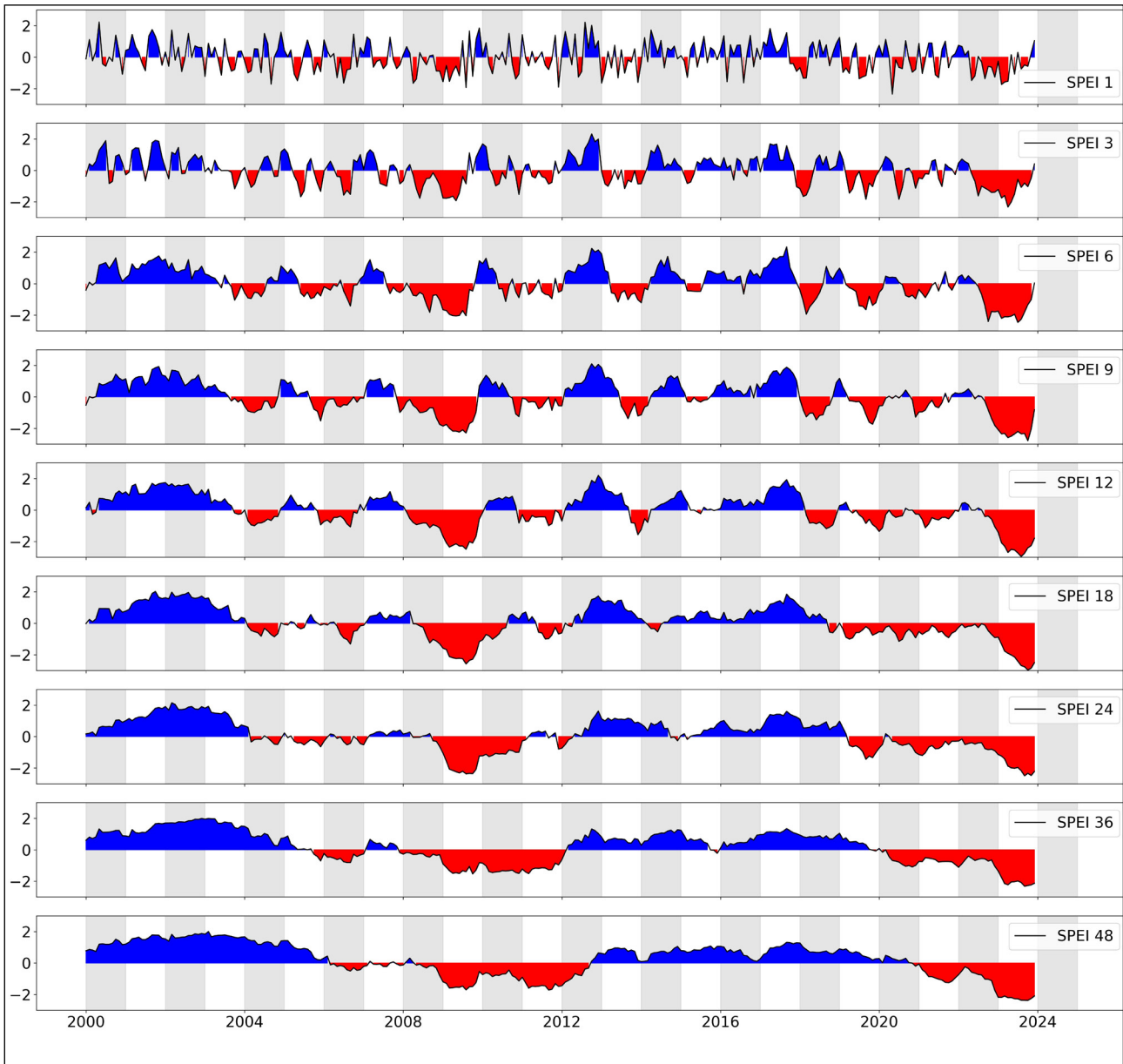


Figura 3. Series temporales de SPEI a diferentes escalas temporales (1 mes, 3 meses, 6 meses, 9 meses, 12 meses, 18 meses, 24 meses, 36 meses y 48 meses).

vinculada con la variabilidad del almacenamiento de agua terrestre de la región (Figura 4 y 5). A su vez respalda la hipótesis de que la evolución de los cuerpos de agua superficiales está fuertemente ligados a la profundidad del agua subterránea, componente principal del almacenamiento terrestre de agua (Aragón et al., 2011; Kuppel et al., 2015; Scanlon et al., 2023). Por otra parte, deja en evidencia la capacidad de la misión GRACE/GRACE-FO para capturar la variabilidad hidrológica de regiones subhúmedas, donde las aguas subterráneas y superficiales están estrechamente vinculadas (Chen et al., 2010; Aragón et al., 2011; Tapley et al., 2019).

Las condiciones extremadamente húmedas y secas en la región, para el periodo analizado, son relativamente inusuales (Figura 3). Sin embargo, dichas condiciones acumuladas en el largo plazo pueden desencadenar episodios de inundaciones y sequías (Figura 5). Durante los episodios

de sequía la superficie de agua evidencia una mayor sensibilidad ante las distintas condiciones secas acumuladas, en comparación con el almacenamiento de agua terrestre (Figuras 2 y 5). Esto responde al hecho que durante los ciclos de secado, primeramente se ve reducida la superficie de agua seguido del nivel freático, debido a las pérdidas evaporativas (Aragón et al., 2011). En cambio, durante las inundaciones la superficie de agua presenta una mayor dispersión, conjuntamente con el almacenamiento de agua terrestre. Particularmente, se evidenció que condiciones acumuladas extremadamente húmedas, conjuntamente con niveles altos de almacenamiento de agua terrestre ($TWSA > 10$ cm) dan origen o muestran condiciones de inundación severa (Figura 5) (Kuppel et al., 2015; Rainhart et al., 2024; Sun et al., 2024).

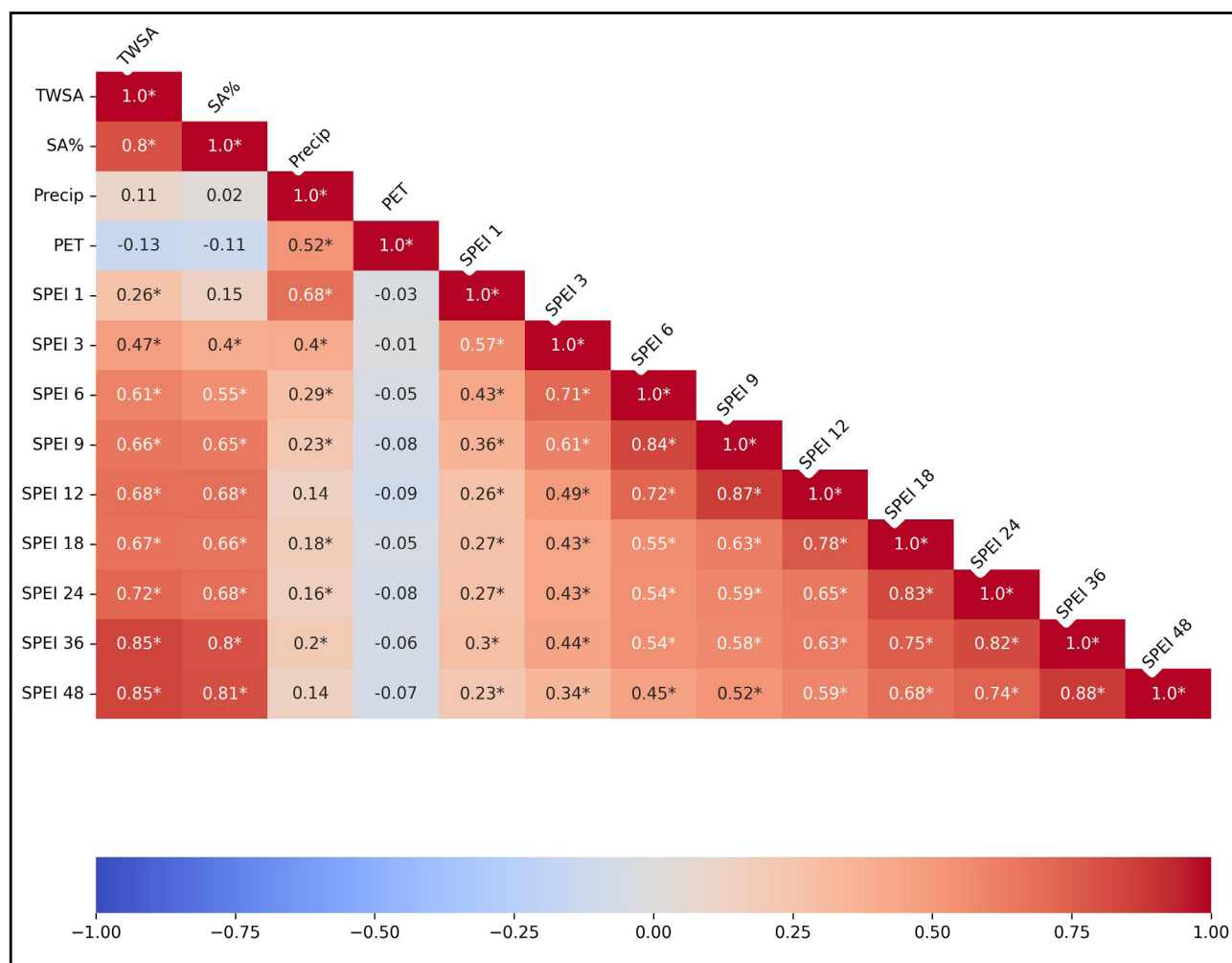


Figura 4. Matriz de correlación de Spearman entre las distintas variables, con resolución temporal mensual. Los valores con asteriscos hacen referencia a correlaciones significativas (p -valor $< 0,01$).

CONCLUSIONES

A partir de dos décadas de observaciones satelitales y haciendo uso del método de nivel de umbrales sobre la superficie de agua, se identificaron tres episodios de inundación y dos de sequías en el Oeste de la región Pampeana. Por otra parte, se observó que las condiciones acumuladas extremadamente húmedas conjuntamente con niveles altos de almacenamiento de agua terrestre, pueden generar grandes extensiones de superficie de agua asociadas a fenómenos de inundaciones severas. En cuanto a la respuesta del sistema hidrológico ante los excesos y déficits de precipitaciones acumulados, se evidenció que tanto las inundaciones como las sequías no son eventos singulares individuales en el tiempo, sino ciclos que se explican a partir de la conjunción de sucesivos excesos o déficits de precipitaciones acumulados. La alta correlación entre SPEI de 36 y 48 meses con el almacenamiento de agua terrestre resalta la importancia de estas variaciones acumuladas para entender la dinámica de estos episodios. Además, evidencia el valor de los índices climáticos para monitorear el estado hidrológico regional, subrayando el papel de las observaciones satelitales en la

mejora de la gestión y mitigación de los riesgos asociados a inundaciones y sequías.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Arte y Tecnología (SECAT) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNICEN) por los fondos asignados a los proyectos 03-PIO-119I, "Caracterización integral de sequías de largo plazo en la región Pampeana Occidental", y I03/I044-Dispo/085, "Desarrollo de indicadores de disponibilidad de agua en el sistema suelo-planta a partir de datos de terreno y satélite (DISPOAGUA-Satélite)". Asimismo, agradecen a la Autoridad del Agua (ADA) de la provincia de Buenos Aires por su colaboración y por la información proporcionada.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Conceptualización: Jorge Francisco Diez y Javier Houspanossian; Metodología: Jorge Francisco Diez, Javier Hous-

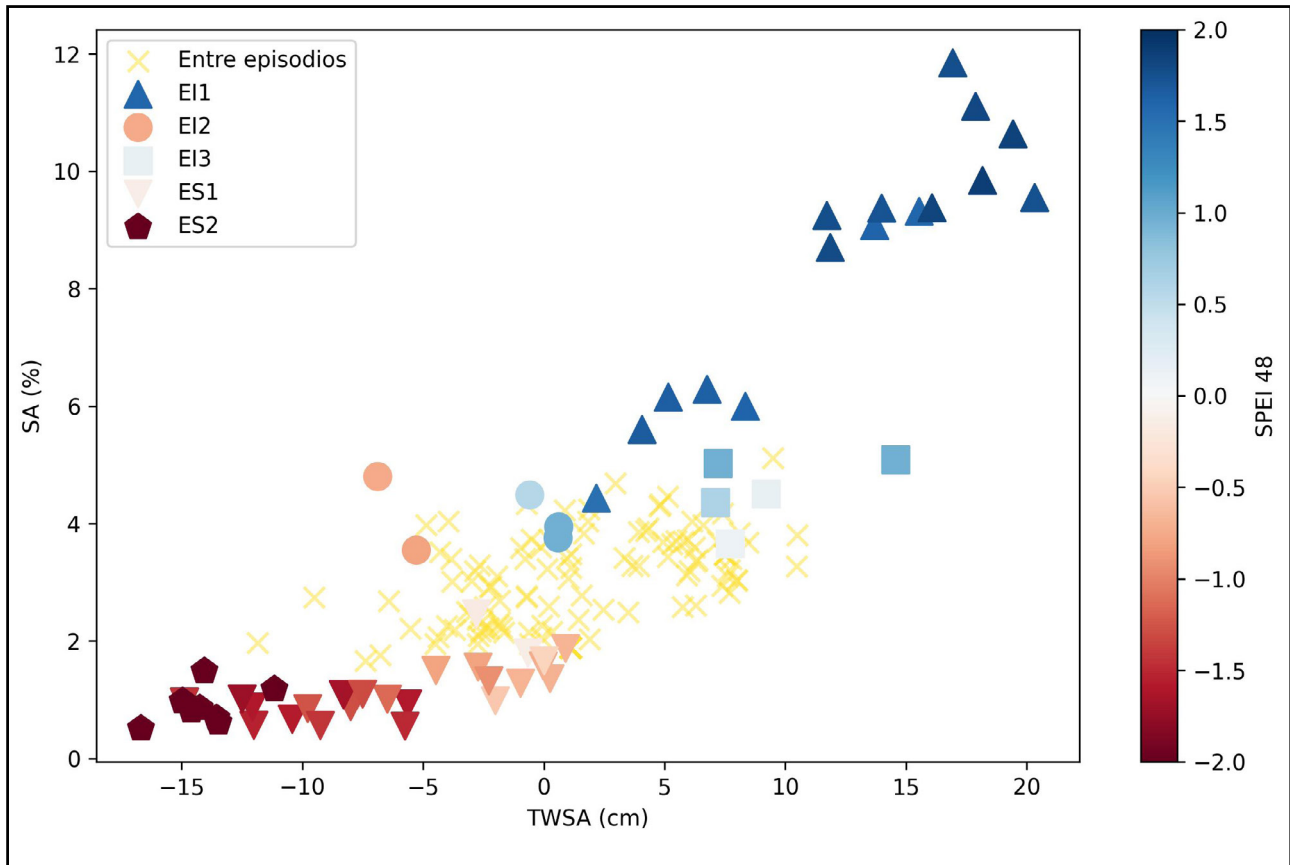


Figura 5. Gráfico de dispersión entre superficie de agua (SA (%)) y anomalías de almacenamiento de agua terrestre (TWSA (cm)), diferenciando cada episodio de inundación y sequía, y con los correspondientes valores de SPEI 48 para dichos sucesos. En esta gráfica no se tuvieron en cuenta aquellos valores modelados.

panossian y Facundo Carmona; Análisis de datos: Jorge Francisco Díez, Javier Houspanossian, Facundo Carmona y Raúl Rivas; Redacción - preparación del borrador original: Jorge Francisco Díez y Javier Houspanossian; Redacción - revisión y edición: Jorge Francisco Díez, Javier Houspanossian, Facundo Carmona, Raúl Rivas, Mauro Holzman, Sabrina Beninato y Simon Oses. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), 170191. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Aradas, R. D., Lloyd, J., Wicks, J., & Palmer, J. (2002). Groundwater problems in low elevations regional plains: The Buenos Aires province example. In *Groundwater and Human Development* (pp. 613-623).
- Aragón, R., Jobbágy, E. G., & Viglizzo, E. F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), 433-447. <https://doi.org/10.1002/eco.149>
- Baldi, G., & Paruelo, J. M. (2008). Land-Use and Land Cover Dynamics in South American Temperate Grasslands. *Ecology and Society*, 13(2). <https://www.jstor.org/stable/26267957>
- Bert, F., de Estrada, M., Naumann, G., Negri, R., & Podestá, G. (s. f.). The 2017-18 drought in the Argentine Pampas – Impacts

- on Agriculture. https://www.preventionweb.net/files/78456_cs1.14laplataargentinafinal20210215.pdf
- Bohn, V. Y., Delgado, A. L., Piccolo, M. C., & Perillo, G. M. E. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75(9), 818. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>
- Bohn, V. Y., Rivas, R., Varni, M., & Piccolo, M. C. (2020). Using SPEI in predicting water table dynamics in Argentinian plains. *Environmental Earth Sciences*, 79(19), 469. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09210-0>
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Longuevergne, L., Yang, Z. L., & Scanlon, B. R. (2010). Recent La Plata basin drought conditions observed by satellite gravimetry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D22). <https://doi.org/10.1029/2010JD014689>
- Díaz Zorita, M., Pepi, M. L., & Grosso, G. A. (1998). *Estudio de las precipitaciones en el oeste bonaerense*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Centro Regional Buenos Aires Norte, Estación Experimental Agropecuaria General Villegas.
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & van de Giesen, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6(9), 810-813. <https://doi.org/10.1038/nclimate3111>
- El-Asmar, H. M., Hereher, M. E., & El Kafrawy, S. B. (2013). Surface area change detection of the Burullus Lagoon, North of the Nile Delta, Egypt, using water indices: A remote sensing approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 16(1), 119-123. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2013.04.004>
- Famiglietti, J. S., Cazenave, A., Eicker, A., Reager, J. T., Rodell, M., & Velicogna, I. (2015). Satellites provide the big picture. *Science*, 349(6249), 684-685. <https://doi.org/10.1126/science.aac9238>
- Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2013). Water in the Balance. *Science*, 340 (6138), 1300-1301. <https://doi.org/10.1126/science.1236460>
- Friedman, J. H. (2001). Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232. <https://www.jstor.org/stable/2699986>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Fuschini Mejía, M. C. (1994). El agua en las llanuras.
- Iriondo, M. (1999). Climatic changes in the South American plains: Records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International*, 57-58, 93-112. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(98\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(98)00053-6)
- Jobbágy, E. G., Noretto, M. D., Santoni, C. S., & Baldi, G. (2008). El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología austral*, 18(3), 305-322. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1667-782X2008000300005&script=sci_arttext
- Kuppel, S., Houspanossian, J., Noretto, M. D., & Jobbágy, E. G. (2015). What does it take to flood the Pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research*, 51(4), 2937-2950. <https://doi.org/10.1002/2015WR016966>
- León, R. J. C. (1992). Río de la Plata grasslands: Regional sub-divisions. In R. T. Coupland (Ed.), *Ecosystems of the World 8A: Natural Grasslands* (pp. 376-407). Elsevier.
- Loomis, B. D., Luthcke, S. B., & Sabaka, T. J. (2019). Regularization and error characterization of GRACE mascons. *Journal of Geodesy*, 93(9), 1381-1398. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477, 175-188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.028>
- Mercau, J. L., Jobbágy, E. G., Viglizzo, E., Menendez, A., Bella, C. D., Bert, F., Portela, S., Schiebbber, E. F., Florio, E., Gimenez, R., & García, P. (2013). *SEQUÍA E INUNDACIÓN EN LA HIPERLLANURA PAMPEANA. UNA MIRADA DESDE EL LOTE AL MUNICIPIO*. <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/viewFile/18/15>
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633), 418-422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Rainhart, L., Peinetti, H. R., & Noellemeyer, E. J. (2024). Las inundaciones de las últimas tres décadas en la Pampa Interior y su

- relación con la pluviometría regional. *Ecología Austral*, 34(1), Article 1. <https://doi.org/10.25260/EA.24.34.1.0.2374>
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M.-H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651-659. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>
- Save, H., Bettadpur, S., & Tapley, B. D. (2016). High-resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(10), 7547-7569. <https://doi.org/10.1002/2016JB013007>
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., De Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., Grafton, R. Q., Jobbagy, E., Kebede, S., Kolusu, S. R., Konikow, L. F., Long, D., Mekonnen, M., Schmied, H. M., Mukherjee, A., MacDonald, A., Reedy, R. C., Shamsudduha, M., Simmons, C. T., ... Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87-101. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00378-6>
- Sun, A. Y., Save, H., Rateb, A., Jiang, P., & Scanlon, B. R. (2024). Deciphering the Role of Total Water Storage Anomalies in Mediating Regional Flooding. *Geophysical Research Letters*, 51(16), e2023GL108126. <https://doi.org/10.1029/2023GL108126>
- Soriano, A., Leon, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R. S., Deregibus, V. A., Cahuepe, M., Scaglia, O. A., Velazquez, C. A., & Lemcoff, J. H. (1991). Río de la Plata Grasslands. In R. T. Coupland (Ed.), *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere. Ecosystems of the World* (pp. 367-407). Elsevier.
- Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., Sasgen, I., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Chambers, D. P., Reager, J. T., Gardner, A. S., Save, H., Ivins, E. R., Swenson, S. C., Boening, C., Dahle, C., Wiese, D. N., Dobslaw, H., ... Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nature Climate Change*, 9(5), 358-369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>
- Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *WIREs Water*, 2(4), 359-392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>
- Van Loon, A. F., & Laaha, G. (2015). Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3-14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., & El Kenawy, A. (2010). A new global 0.5 gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *Journal of Hydrometeorology*, 11(4), 1033-1043. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>
- Viglizzo, E. F., & Frank, F. C. (2006). Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International*, 158(1), 122-126. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.022>
- Viglizzo, E. F., Jobbágy, E. G., Carreño, L., Frank, F. C., Aragón, R., De Oro, L., & Salvador, V. (2009). The dynamics of cultivation and floods in arable lands of Central Argentina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(4), 491-502. <https://doi.org/10.5194/hess-13-491-2009>
- Watkins, M. M., Wiese, D. N., Yuan, D.-N., Boening, C., & Landerer, F. W. (2015). Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), 2648-2671. <https://doi.org/10.1002/2014JB011547>
- Whitworth-Hulse, J. I., Jobbágy, E. G., Borrás, L., Alsina, S. E., Houspanossian, J., & Nasetto, M. D. (2023). The expansion of rainfed grain production can generate spontaneous hydrological changes that reduce climate sensitivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349, 108440. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108440>
- Xu, H. (2005). A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *JOURNAL OF REMOTE SENSING-BEIJING-*, 9(5), 595. <https://www.ygxb.ac.cn/zh/article/doi/10.11834/jrs.20050586/>