

Variabilidad espacio-temporal de la humedad superficial del suelo en el sur de la llanura pampeana argentina

Spatio-temporal variability of the surface soil wetness in the southern Argentinean Pampean plain

AUTORÍA

Vanesa Yael Bohn 

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).
Departamento de Geografía y Turismo,
Universidad Nacional del Sur (UNS), 12 de octubre y San Juan, 4to. Piso (8000) Bahía Blanca, Argentina.

DOI

<https://doi.org/10.14198/INGEO.25373>

CITACIÓN

Bohn, V. Y. (2024). Variabilidad espacio-temporal de la humedad superficial del suelo en el sur de la llanura pampeana argentina. *Investigaciones Geográficas*. Advance online publication. <https://doi.org/10.14198/INGEO.25373>

CORRESPONDENCIA

Vanesa Yael Bohn (vanesa.bohn@uns.edu.ar)

HISTORIA

Recibido: 13 junio 2023
Aceptado: 29 enero 2024
Publicación anticipada: 22 marzo 2024

TÉRMINOS

© Vanesa Yael Bohn

 Este trabajo se publica bajo una licencia Creative Commons de Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Resumen

El conocimiento de la dinámica de la humedad del suelo es de gran relevancia para su aplicación en estudios hidrológicos y climáticos, así como también es un parámetro que permite analizar procesos relacionados a usos y coberturas del suelo. Debido a esta importancia, se analizó la dinámica espacio-temporal de la humedad superficial del suelo (HSS) en el sur de la llanura pampeana argentina a partir de datos correspondientes a 6 localidades argentinas y en relación a un índice climático que involucra las variables de precipitación y evapotranspiración. La metodología incluyó análisis estadístico de correlación y estadística multivariada sobre bases de datos modelados y de reanálisis. Los resultados obtenidos muestran diferentes respuestas espaciales de la HSS, con máximos valores en el sector de mayor pluviometría del área de estudio, disminuyendo hacia el de mayor aridez y permitiendo inferir la influencia de la homogeneidad topográfica del área y el predominio de procesos verticales en el balance hídrico. A escala espacial, así como también a escala temporal, la dinámica de la HSS mostró una tendencia similar a la del índice climático, comprobada a través del cálculo del coeficiente de Pearson así como también se demostró que la respuesta de la HSS a los parámetros climáticos obtuvo mayor ajuste a una escala temporal de 3 meses. Dicha respuesta, de la HSS a los parámetros climáticos, se observó a nivel interanual así como también a nivel anual, con valores máximos y mínimos durante los años húmedo y seco, respectivamente y disminuciones de la HSS en las épocas de mayor temperatura (estación de verano). Espacialmente, la HSS mostró la misma tendencia de la precipitación, de NE a SO, es decir, con máximos en la región de mayor pluviometría y mínimos en la región más árida. El manuscrito, a partir del análisis de datos de diversas fuentes, clasificación de períodos sobre la base de su pluviometría y aplicación de métodos estadísticos, constituye un aporte acerca de la dinámica de la variable edáfica en un área en la que las actividades agrícola y ganadera constituyen el principal uso del suelo y en la que la alternancia entre períodos húmedos y secos influye sobre el riesgo de inundación o sobre las pérdidas económicas por desarrollo de intensas sequías, respectivamente.

Palabras clave: datos de reanálisis; análisis espacio-temporal; índice climático; inundación; sequía; uso del suelo.

Abstract

Knowledge regarding soil wetness dynamics is relevant for its application in hydrological and climatological studies. It is also a parameter that allows the analysis of processes related to land cover and land use. Due to this importance, the spatio-temporal dynamics of the surface soil humidity (SSH) in the southern of the Argentinean Pampean Plains have been analyzed, based on data corresponding to six Argentine localities and in relation to a climatological index that incorporates rainfall and evapotranspiration variables. The methodology includes statistical correlation and multivariate analysis based on modeled and reanalysis data. The results obtained reveal a different response of the SSH at a spatial level, with maximum values in the highest rainfall region, diminishing towards the most arid zone. This allows us to infer the influence of the topographic homogeneity of the area and the predominance of vertical processes in the hydrological balance. At both a spatial and temporal scale, the SSH dynamics concur with the climatological index pattern, confirmed by a Pearson coefficient. It has also been shown that the SSH responds to the climatological parameters and that the highest correlation occurs at a three-month temporal scale. This response may be observed at an interannual and annual level, with maximum and minimum values during the wet and dry years, respectively and a decrease in the SSH during the warmest seasons (summer). The SSH displays the same tendency as the climatological index, from NE to SW, reaching a maximum in the rainiest area and minimum in the arid region. The manuscript, based on diverse sources analysis, pluviometric periods classification and statistical methods application, is a contribution related to the edaphic variable dynamics in a region in which farming activity constitutes the main land use and where the droughts and floods alternance has effects on the flooding risks and the economic losses as a consequence of intensive droughts, respectively.

Keywords: reanalysis data; spatio-temporal analysis; climatological index; flood; drought; land use.

1. Introducción

El agua es un recurso cuyo monitoreo se prioriza en estudios de diversas disciplinas. Constituye un factor determinante en la fertilidad del suelo, además de influir en el desarrollo de los cultivos y por su rol fundamental en los procesos biológicos y la regulación de la temperatura del suelo (Caicedo-Rosero et al., 2021). Además, su almacenamiento en el suelo es de gran relevancia para los estudios hidrológicos. Condiciona el funcionamiento del balance de agua en una cuenca a escala de crecida (Llorens et al., 2003). Su disponibilidad condiciona el desarrollo de actividades agrícolas y forrajeras (Gusmerotti & Mercáu, 2022) y tiene gran influencia en la escorrentía superficial y en la interacción superficie-atmósfera. Cuando la humedad del suelo es analizada a mayor profundidad, este conocimiento es útil para la comprensión de los procesos suelo-planta-atmósfera y de recarga de acuíferos (Holzman & Rivas, 2013). Es relevante, entonces, en un contexto de cambio climático, conocer la dinámica de la humedad superficial del suelo (HSS) con fines de prevención y asesoramiento para la planificación del territorio y las actividades económicas.

En la llanura pampeana Argentina y regiones circundantes, se han realizado diversos estudios relacionados al comportamiento de la precipitación y sus impactos. Por ejemplo, en Uruguay, se realizó un estudio de la frecuencia, tendencia e intensidad de las sequías agronómicas para una zona de clima templado cuyos suelos dominantes presentan baja capacidad de retención de agua. Allí, las sequías agronómicas son un problema histórico y en aumento, constituyendo un inconveniente para las actividades ganaderas de dicho país (Cruz et al., 2014). Se analizaron balances hídricos del suelo, sobre la base de datos de precipitación y evapotranspiración potencial. Como resultado se obtuvo que los veranos fueron la estación climática de mayor déficit mientras que los inviernos representaron el período de recarga hídrica. El agotamiento de la humedad de los suelos durante los veranos, trajo como consecuencia que, durante los otoños, se dependiera exclusivamente de las precipitaciones ocurridas en dicha estación (Cruz et al., 2014). Chen et al. (2023) realizaron un estudio acerca de la variación espacio-temporal de las características de la sequía en pastizales templados, durante los últimos 61 años, con el objetivo de determinar la evolución de la sequía y de proveer bases teóricas para el entendimiento de la variabilidad climática en las estepas templadas de China. Utilizaron datos climáticos (precipitación, temperatura media diaria, velocidad media del viento, humedad relativa, duración de la luz solar, etc.) provenientes de 88 estaciones meteorológicas y los procesaron mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y lenguajes de programación. Sobre la base de estos datos, calcularon el Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI) y utilizaron la escala temporal del SPEI de 3 meses para el análisis de las sequías estacionales mientras que utilizaron el SPEI a escala temporal de 12 meses para el análisis de las sequías interanuales. Como resultado hallaron una tendencia al incremento de la ocurrencia de sequías durante el período de estudio, con una duración mínima de 2 meses. Determi-

naron, también, que las sequías fueron más frecuentes durante el invierno y que su distribución espacial fue mayormente en el SO, en zonas semiáridas y áridas.

La dinámica de la humedad del suelo en procesos hidrológicos y la respuesta del parámetro a la precipitación, fueron estudiadas en el área montañosa de la cuenca del río Heihe, al NO de China (Tian et al., 2019). Los mismos incluyeron análisis de índices para la descripción cualitativa de la dinámica de la humedad del suelo durante estaciones de crecimiento de cultivos. Se realizaron simulaciones para evaluar los efectos de las coberturas de la tierra sobre la dinámica de la humedad del suelo. Como resultado se obtuvo que la respuesta fue diferente entre las coberturas de la tierra siendo similar entre las clases de suelo desnudo y cobertura media de pastizal y diferente entre las categorías de monte y alta cobertura de pastizal. Los autores enfatizaron sobre la importancia de realizar estudios de la dinámica de la humedad del suelo teniendo en cuenta diferentes coberturas de la tierra y la respuesta a la precipitación en zonas áridas y semiáridas.

La disponibilidad de agua en el suelo se vincula también con este tipo de análisis, debido a que condiciona la producción de cultivos agrícolas y forrajeros. Desde esta perspectiva, se realizaron mapas de capacidad de retención de agua (CRA) en la región Chaco-Pampeana argentina (Gusmerotti & Mercau, 2022) a partir de datos de suelos. Se tuvo en cuenta la textura obtenida de las cartas de suelos elaboradas por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Como resultado se obtuvieron mapas que permiten visualizar la variabilidad espacial de la CRA de los suelos en el área de estudio, con gran utilidad para diversas aplicaciones agronómicas y ambientales. Vinculado a este tema, en la mayoría de los trabajos consultados, se menciona la escasez de investigaciones y datos referidos a la humedad del suelo o la dificultad de contar con una serie extensa o a determinadas escalas geográficas y temporales (Tian et al., 2019). En este sentido, se consideran relevantes aquellos estudios de validación y análisis de fuentes de datos de satélite que puedan proporcionar este dato con amplia cobertura espacial y continuidad temporal.

Los productos satelitales o modelos referidos a las variables de humedad del suelo y almacenamiento de agua son de relevancia para el mapeo y el pronóstico de sequías e inundaciones. En torno a este tema, la humedad del suelo obtenida del modelo hidrológico global WaterGAP (WGHM) y de los satélites AMSR-E y ASCAT fue relacionada con las variaciones de almacenamiento de agua, obtenidas de la misión satelital GRACE (Experimento de Clima y Recuperación Gravitatoria, por sus siglas en inglés) (Tapley, 2001) en la cuenca hidrográfica del río de La Plata (Argentina) (Abelen et al., 2015). Como resultado se halló una concordancia entre las anomalías de la humedad del suelo con respecto a períodos de El Niño y La Niña y desastres asociados a peligros naturales. En un área más extensa de Argentina, Rivas et al. (2013) validaron para la región pampeana el producto de humedad del suelo de SMOS para su utilización en estudios hidrológicos de grandes cuencas. SMOS (Humedad del Suelo y Salinidad del Océano, por sus siglas en inglés) es un satélite abocado al estudio de la humedad del suelo que utiliza la banda L (sensor MIRAS) para estimar la humedad edáfica con una frecuencia de 3 días y una resolución espacial de 40 km, con cobertura global. Fue relevante, para la obtención de la mencionada validación, contar con datos de campo (sondas portátiles) en parcelas con diferentes cultivos y correspondientes a una región representativa de la llanura pampeana argentina (Rivas et al., 2013).

La relación del parámetro también se establece con tendencias a la sequía, déficit hídrico e interés de su aplicación en la planificación de los cultivos. En Argentina, en el sur de la provincia de Córdoba, Del Valle Rivarola (2009) utilizó factores bio-físicos del área de estudio, definidos en las siguientes tres variables: precipitación de septiembre a marzo; capacidad de almacenaje de agua del suelo y el déficit hídrico. Estas variables fueron sometidas a distintos niveles de análisis (ej. estadísticos) para la obtención de mapas de distribución regional de las mismas y para la posterior identificación de zonas con distintos grados de vulnerabilidad a la sequía. Esto último se logró mediante la combinación de los factores en un SIG (Del Valle Rivarola, 2009). La utilización de datos de reanálisis se plantea como una alternativa para el complemento de estos estudios, en los que los datos relevados en campo constituyen la principal fuente. Los datos de reanálisis se plantean como complementos del trabajo de campo y viceversa por la posibilidad de validarlos y extrapolar su uso a una región más extensa dado que brindan una resolución espacial homogénea y de gran detalle, facilitando la interpolación de las variables y la consecuente cartografía. Se trata de sets de datos consistentes desde el punto de vista físico que unen simulaciones de datos con aquellos de origen observacional e histórico. Surgen como resultado de procesos computacionales complejos (Baatz et al., 2021). Las series de datos de reanálisis, de diversas fuentes, han sido testeadas en relación con el análisis de tendencias climáticas (Bengtsson et al., 2004), al estudio de las variaciones de presión media del nivel del mar (Liu et al., 2012), humedad relativa (Viggiano et al., 2021), así como también han sido analizadas a diferentes escalas geográficas (Liu et al., 2014) y ambientes naturales (Yang et al., 2020). Específicamente en

cuanto al parámetro de humedad del suelo, las aplicaciones de datos de reanálisis también son numerosas, dada su importancia e influencia en el clima a través de la modificación del albedo, la capacidad térmica, el calor latente y sensible. Asimismo, es un factor importante para la interpretación y estudio de las anomalías climáticas (Liu et al., 2014) y una conexión crítica entre la atmósfera y la superficie terrestre (Yang et al., 2020). La aplicación de datos de reanálisis de temperatura y humedad del suelo contribuyeron al entendimiento del régimen hidrotermal en regiones de permafrost en la meseta Qinghai-Tibetana (Yang et al., 2020). Dichos datos fueron previamente contrastados con mediciones in situ correspondientes a diferentes coberturas de suelo y fueron obtenidos a partir del Sistema de Pronóstico climático v2 (CFSv2, por sus siglas en inglés), del Centro Europeo para el pronóstico meteorológico a medio plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) y el modelo Noah conducido por el Sistema de Asimilación de datos globales (GLDAS-Noah) así como también los más recientes productos de reanálisis de la quinta generación de productos de reanálisis de ECMWF (ERA5). La totalidad de los productos evaluados mostraron buenos resultados y ajustes con respecto a los datos in situ, a excepción del período de descongelamiento, durante el cual los modelos mostraron una subestimación y sobrestimación en la temperatura y humedad del suelo, respectivamente (Yang et al., 2020). Los sets de datos ERA-Interim, MERRA (por sus siglas en inglés, Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications), reanálisis japonés de 25 años, sistema de reanálisis de pronóstico climático y reanálisis 1 del Centro Nacional de Predicción Medioambiental y el Centro Nacional para la Investigación Atmosférica (NCEP/NCAR-R1, por sus siglas en inglés) permitieron, con éxito, hallar similitudes y diferencias de la humedad del suelo durante la primavera en diversas localizaciones de China (Liu et al., 2014). Se halló una variabilidad interanual con variaciones opuestas según las latitudes y también se observaron diferencias en las capacidades de cada uno de los sets de datos. Por ejemplo, todos los sets a excepción de NCEP/NCAR-R1, reprodujeron el incremento gradual de la humedad climatológica del suelo en China en dirección NO-NE y SE. Las razones de las diferencias halladas entre sets de datos para la determinación de la humedad del suelo, también fueron investigadas teniendo en cuenta que existen dos factores que afectan al mencionado parámetro: la precipitación y la evaporación. En el caso del set de datos de ERA-Interim, éste pudo reproducir correctamente la precipitación y la evaporación desde las observaciones, así como también sus relaciones con la humedad del suelo. Los restantes sets de datos reprodujeron correctamente a la precipitación, aunque mostraron inconvenientes en la estimación de la evaporación y, por tanto, de la humedad del suelo (Liu et al., 2014). El set de datos de precipitación anual, temperatura del aire mínima y máxima en frecuencias diaria, mensual y anual del repositorio NASA POWER fue comparado con datos in situ en la cuenca del río Éufrates (Irak), obteniendo coeficientes de determinación (R^2) > 0,72 (Tayyeh & Mohammed, 2023). La exactitud de la precipitación obtenida del set de datos de reanálisis NASA POWER fue buena en regiones húmedas siendo menor en zonas áridas y semi-áridas. Los resultados mostraron que NASA POWER es efectivo en el desarrollo de datos climáticos ante la falta de datos medidos in situ. El mencionado set de datos, en conjunto con la quinta generación de reanálisis europeo del componente tierra (ERA5-Land, por sus siglas en inglés), también fueron analizados para un período extenso (1981-2020) en 19 sitios de la cuenca del río Kelantan (Tan et al., 2023). Como resultado se obtuvo que ambos sets de datos estiman adecuadamente los parámetros de precipitación y de temperaturas máximas y mínimas, así como también que, ambos productos tienen mayor correlación con pluviómetros a lo largo de las costas que con aquellos situados en regiones montañosas. No obstante, estos tienden a subestimar la precipitación y la temperatura máxima y sobreestimar la temperatura mínima. Los hallazgos mostraron que NASA POWER y ERA5-Land proveen información climatológica muy valiosa para localidades en la que no se cuenta con mediciones in situ.

El objetivo del trabajo fue analizar la dinámica espacio-temporal de la humedad superficial del suelo (HSS) en 6 localidades de la región pampeana argentina en relación a las variables climáticas de la precipitación (P) y la evapotranspiración (EVTP), para un período de ~ 4 décadas (1981-2021), complementando datos modelados y de reanálisis. El objetivo secundario fue definir años secos, húmedos y normales, a partir de diversas fuentes de datos, a fin de evaluar la dinámica de la HSS a nivel temporal. Se espera que el presente trabajo provea información para el asesoramiento a la planificación de las actividades productivas de la región.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

2.1.1. Localización y caracterización geográfica y geomorfológica del área de estudio

Las 6 localidades estudiadas corresponden a las ecorregiones de Pampa (Bahía Blanca, BB; Tres Arroyos, TA; Benito Juárez, BJ) y Espinal (SR, RC e HA), según la clasificación de ecorregiones y complejos ecosistémicos

argentinos (Morello et al., 2012). La ecorregión Pampa comprende una extensa planicie cuya área supera los 390.000 km², se localiza en el centro Este de Argentina en 5 provincias agrícolas: Entre Ríos (sector sur), Córdoba (SE), Santa Fé (S) y La Pampa (NE), Buenos Aires en su totalidad (excepto el sector S) (Figura 1) y es el ecosistema de praderas más importante de Argentina. El espinal, como ecorregión, se desarrolla a lo largo de un extenso arco de bosques que rodean por el N, O y S a la ecorregión Pampa, con una extensión que supera los 290.000 km². Abarca el S de la provincia de Corrientes, mitad N de la provincia de Entre Ríos, una faja central de las provincias de Santa Fé y Córdoba, centro y S de la provincia de San Luis, mitad oriental de la provincia de La Pampa y S de la provincia de Buenos Aires (Morello et al., 2012). El paisaje predominante es el de llanura, con presencia de serranías bajas y el desarrollo de dos sistemas serranos (Ventania y Tandilia) (Figura 1). Dicha llanura constituye un área sedimentaria y plana de clima subhúmedo a semiárido con pendientes menores a 0,1% (Jobbágy et al., 2018). Este sector constituye el ecosistema de praderas más importante de Argentina. Su importancia reside en que posee suelos aptos para la agricultura y la ganadería, potencial que declina acompañando el gradiente de precipitación que varía entre los 1.000 mm/año al NO y los 400 mm/año al SO (Viglizzo et al., 2006). De acuerdo al mapa de cobertura del suelo de la República Argentina, realizado por el INTA (2009) (E 1:500.000), la cobertura del suelo predominante en el área es el cultivo de herbáceas graminoideas. La región de BB también presenta áreas urbanas densamente pobladas y zonas de pastizal abierto. En el sur, en HA y RC, también se desarrolla arbustal abierto como cobertura predominante. En SR, al igual que en el resto del área, se destaca el cultivo de herbáceas graminoideas y uso urbano.

2.1.2. Caracterización edáfica del área de estudio

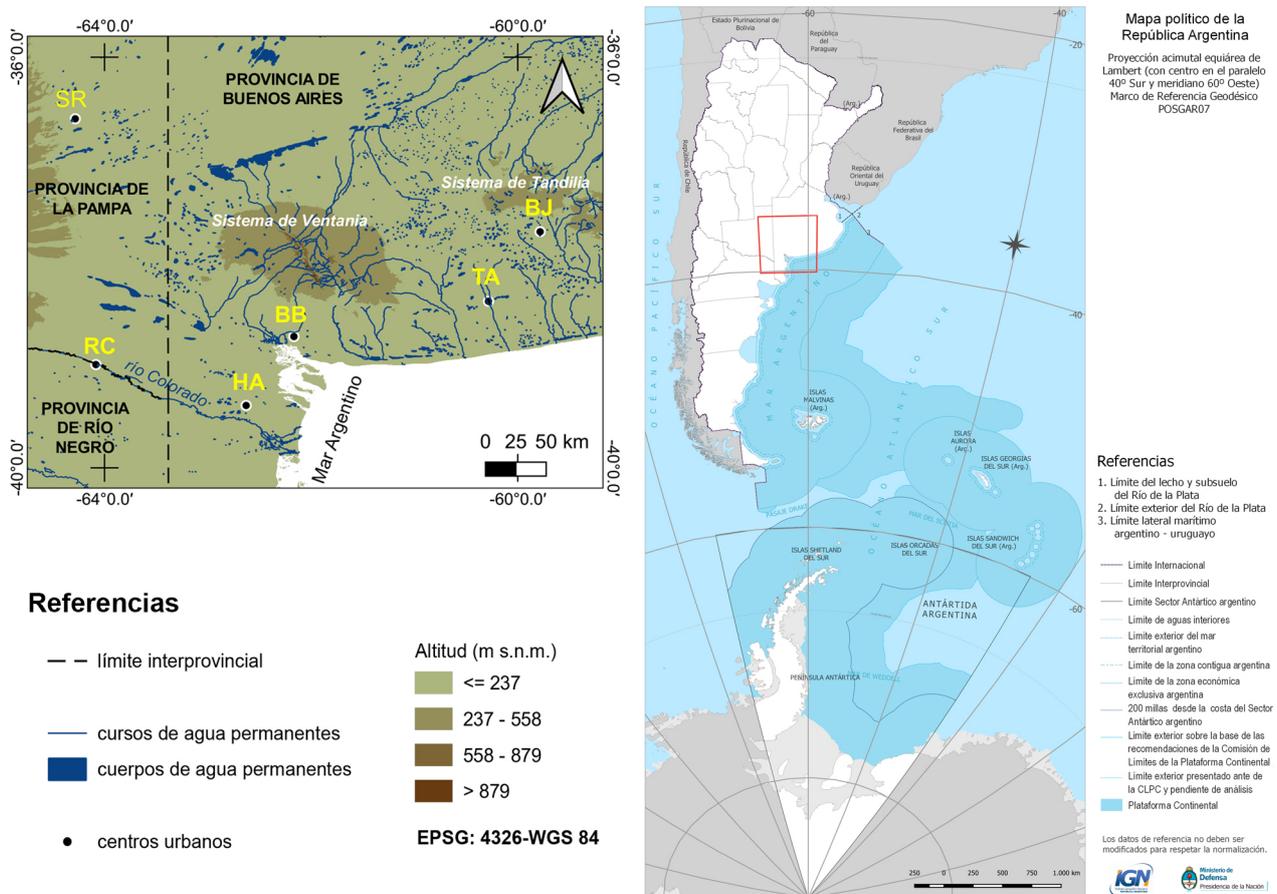
De acuerdo a la Taxonomía de Suelos (Soil Taxonomy) (Departamento de Agricultura de Estados Unidos [USDA], 1975), que es la clasificación de suelos más utilizada en la Argentina, el área de estudio incluye los órdenes de suelo Entisoles (estación SR), Molisoles (estaciones de BB, BJ, TA) y Aridisoles (estaciones HA y RC). El orden de suelos Entisoles representa a aquellos suelos con muy bajo grado de desarrollo. La diferenciación de horizontes es escasa y generalmente se reconoce un horizonte superficial con bajo contenido de materia orgánica. Se asocian a relieves de alta dinámica geomorfológica y a materiales originarios recientemente depositados. Los suelos Molisoles se caracterizan por un horizonte superficial oscuro, con altas proporciones de materia orgánica. Se asocian a climas húmedos a subhúmedos, relieves de escasa pendiente topográfica y vegetación de tipo pastizal (herbácea). Arealmente, es el Orden con mayor representatividad en la Argentina, con especial desarrollo en la llanura pampeana (ecorregión pampas). Se caracterizan por su fertilidad y aptitud para la agricultura. En general, los suelos Molisoles se relacionan con el loess pampeano y con depósitos retrabajados por la acción hídrica. Presentan como materiales originarios, en menor proporción, arenas y limos fluviales y glaciales. Por último, los Aridisoles constituyen suelos con desarrollo variable, se formaron en ambientes áridos y semiáridos por lo que, en general, poseen horizontes de acumulación de sales, carbonato o yeso. A nivel superficial el contenido de materia orgánica es escaso y con predominio de granulometrías gruesas. Se desarrollan materiales originarios muy diferentes, arenas fluviales y eólicas, gravas fluviales y pedemontanas y limos salinos de playas. Desde el punto de vista geomorfológico su distribución es amplia y suelen presentarse en geofomas subhorizontales como zonas pedemontanas, planicies estructurales y terrazas fluviales. La vegetación es usualmente de tipo estepa arbustiva y sus orígenes se vinculan con ambientes con déficit hídrico (Pereyra, 2012).

En cuanto a los caracteres del clima edáfico, para el sector correspondiente a las estaciones de RC e HA, se reconoce un régimen edáfico árido, relacionado al déficit hídrico y caracterizado por un suelo que se encuentra seco la mayor parte del año. En tanto, para las estaciones de BB y SR por un lado y, de TA y BJ (Figura 1), por otro, se desarrolla un régimen de humedad ústico y údico, respectivamente. Los mismos implican un nivel de humedad intermedio en el primer caso y un suelo que no se encuentra seco por más de 90 días en el año, en el segundo. Desde el punto de vista del régimen edáfico de temperatura, todas las estaciones se localizaron en un régimen térmico, es decir, vinculado a climas atmosféricos templados, con temperaturas de los suelos promedio de 15-20 °C, durante todo el año (Pereyra, 2012). Desde una perspectiva hidrológica, especialmente en la ecoregión de Pampa, se encuentran lagunas permanentes y temporales, en parte como consecuencia de la escasa red de drenaje, que favorece el anegamiento. Estas lagunas han mostrado gran variabilidad la cual se vincula con la histórica alternancia de sequías en inundaciones típica de la región (Bohn et al., 2016; Ferrelli et al., 2012; Scarpati & Capriolo, 2013). Como consecuencia de la escasa energía del relieve, la región presenta predominio de los movimientos verticales del agua (precipitación y evapotranspiración) frente a los de tipo horizontal (escurrimiento superficial y profundo) (Scarpati & Capriolo, 2013).

En el área de estudio, la alternancia de inundaciones y sequías constituyen un rasgo característico, con una alta frecuencia de estos eventos hidrológicos extremos. En este contexto, la disponibilidad de agua en el suelo constituye un indicador del riesgo de inundación (Scarpati & Capriolo, 2018; Jobbágy et al., 2018). Dicho aspecto constituye, también, un elemento clave a tener cuenta debido a la predominancia de las actividades agrícolas y ganaderas, como principal actividad económica. Estos últimos constituyen motivos relevantes para la realización de estudios en esta región. En cuanto a la clasificación climática del área de estudio, de acuerdo a Beck et al. (2018), las localidades de BB y SR corresponden a climas templados, sin estación seca y veranos cálidos mientras que HA y RC corresponden a un área de climas áridos, de estepa y fríos. Por último, la región de TA y BJ corresponden a climas templados, sin estación seca y veranos cálidos.

Asimismo, se ha constatado en la región, la ocurrencia de extremos climáticos en coincidencia con el fenómeno de El Niño cuando se presentan lluvias torrenciales y con la Niña, durante los eventos en los que el clima puede tornarse más seco (Iriondo, 1995). No obstante, la variabilidad interanual de las precipitaciones en Argentina puede tener otras causas, independientemente de los episodios Niño o Niña, que son menos conocidas, tales como la temperatura superficial del mar en el Atlántico Sur, por ejemplo (Barros & Camilloni, 2016). La variabilidad interanual de sequías e inundaciones fue citada para la llanura pampeana argentina, en variadas ocasiones (Bohn et al., 2016; Dillon et al., 2019; Ferrelli et al., 2019; Ferrelli, 2020; Brendel et al., 2021). Hacia el S del área de estudio (estaciones RC e HA), el clima se torna más árido y presenta déficit hídrico lo que se explica mediante el desarrollo de la diagonal árida argentina (Bruniard, 1982). La región de estudio presenta entre 600 y 750 mm de evapotranspiración potencial anual, aumentando de NE a SO (Bianchi & Cravero, 2010). De acuerdo al mapa que representa el índice de aridez de De Martonne (IA), elaborado para el Atlas Climático Digital de la República Argentina (Bianchi & Cravero, 2010), las localidades estudiadas se situaron en áreas subhúmedas (SR y BB), semiáridas (RC y HA) y húmedas (TA y BJ).

Figura 1. Localidades analizadas y aspectos físico-geográficos de la región de estudio: BJ, Benito Juárez; TA, Tres Arroyos; BB, Bahía Blanca; HA, Hilario Ascasubi; RC, Río Colorado; SR, Santa Rosa



Se señala la localización del área de estudio (con un cuadro rojo) en el mapa político de la República Argentina (IGN).

Fuente: datos proporcionados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) e Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN). Elaboración propia

2.2. Series de datos

2.2.1. Índice Estandarizado de Precipitación y Evapotranspiración (SPEI)

Se analizó el índice climático estandarizado de precipitación y evapotranspiración (SPEI, por sus siglas en inglés) correspondiente a la base de datos publicada por Vicente-Serrano et al. (2010) y datos de reanálisis de humedad superficial del suelo (HSS) provistos por el proyecto de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) (NASA Project, 2021) (Figura 2). Ambos parámetros se analizaron para 6 localidades de la llanura argentina (Figura 1) (de Este a Oeste): Benito Juárez (BJ); Tres Arroyos (TA); Bahía Blanca (BB); Hilario Ascasubi (HA); Río Colorado (RC) y Santa Rosa (SR) para el estudio de la dinámica espacio-temporal de la HSS y su relación con las variables climáticas a escalas mensual, anual e interanual (período 1981-2021). Las mismas se localizan en 3 provincias argentinas (Figura 1), entre las isohietas de 800 (NE) y 400 (SO) mm/año.

Los datos de SPEI fueron obtenidos, con libre acceso, de la base de datos SPEI Global Drought Monitor (<https://spei.csic.es>) (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2010) para el período 1981-2021, con frecuencia mensual y en 3 escalas temporales: 1, 2 y 3 meses. El SPEI es un índice de sequía multiescalar que combina datos de precipitación y temperatura, se basa en la diferencia mensual entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (EVTP). De esta manera, este índice representa un balance de agua simple, calculado a diferentes escalas de tiempo (1 a 48 meses) de acuerdo al fenómeno evaluado. La escala espacial es de $0,5^\circ$ (~ 50 km). En el presente estudio se analizaron las escalas temporales de 1, 2 y 3 meses, las que están relacionadas principalmente con el contenido de agua del suelo y la descarga de los ríos en las nacientes, mientras que las escalas de tiempo medias y largas están relacionadas con los almacenamientos en embalses, cuerpos de agua, descargas en curso medio de los ríos y variaciones en el almacenamiento de agua subterránea, respectivamente (<https://spei.csic.es>). Las categorías de SPEI indican situaciones de extrema humedad (SPEI ≥ 2), humedad ($1,5 \leq \text{SPEI} \leq 1,99$), moderada humedad ($1 \leq \text{SPEI} \leq 1,49$), normal ($-0,99 \leq \text{SPEI} \leq 0,99$), moderada sequía ($-1 \leq \text{SPEI} \leq -1,99$), sequía ($-1,5 \leq \text{SPEI} \leq -1,99$) o extrema sequía (SPEI ≤ -2) (Vicente Serrano et al., 2010).

2.2.2. Humedad Superficial del Suelo (HSS)

Los registros de HSS fueron obtenidos, según la coordenada geográfica de las localidades estudiadas (Figura 1), de la base de datos de reanálisis de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) fundada a través de la NASA Earth Science/Applied Science Program (NASA POWER DATA) (NASA Project, 2021). Los datos de HSS, así como todos los correspondientes a meteorología de la base de datos Power Nasa, están disponibles a una resolución espacial de $0,5 \times 0,625^\circ$ y se encuentran disponibles a escalas diaria, mensual y anual. La misma provee datos agrometeorológicos de investigaciones de la NASA cuyo objetivo es dar soporte a las actividades agrícolas, de sustentabilidad de recursos naturales, entre otras. Los datos fueron obtenidos desde el sitio de NASA POWER Project (<https://power.larc.nasa.gov/>). El porcentaje de humedad del suelo muestra un valor de 0 indicando un suelo completamente libre de agua. En tanto, un valor de 1, indica un suelo saturado. Este parámetro se refiere a la capa superficial de suelo, desde la superficie (0 cm) hasta los 5 cm de profundidad. En ambos casos (SPEI y HSS), los datos se obtuvieron del punto de malla más cercano a cada coordenada, de cada localidad.

2.2.3. Análisis estadístico

Para conocer el grado de coherencia entre el índice climático SPEI y la variación de la HSS, la misma se cuantificó mediante el cálculo de la varianza y covarianza y el cálculo del coeficiente de Pearson. En cuanto a la interpretación de la magnitud del coeficiente de correlación de Pearson, según las sugerencias de Cohen, un valor del coeficiente mayor a 0,50 indicará una correlación fuerte entre las variables analizadas (Hernández Lalinde et al., 2018). La matriz de covarianza mediante el coeficiente de Pearson y los estadísticos descriptivos se calcularon entre las series de tiempo del índice SPEI y los datos de reanálisis de HSS.

2.3. Determinación de eventos extremos a partir de diversas fuentes

Posteriormente, con el objetivo de analizar el comportamiento de la variable de HSS durante eventos pluviométricos extremos se seleccionaron, sobre la base de trabajos previos (D'Ambrosio et al., 2013; Bohn et al., 2016) y de acuerdo a la clasificación del índice oceánico de El Niño (Oceanic Niño Index, ONI), obtenido del sitio web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, <https://www.noaa.gov/>), un año

correspondiente a un evento Niña, de sequía y a un evento Niño, de inundaciones o de precipitaciones abundantes. Los períodos cálidos (asociados con eventos Niño) y fríos (eventos Niña) se estiman en un umbral de +/- 0,5 °C para el ONI mediante el cálculo de la media móvil de 3 meses de anomalías de la temperatura superficial del mar en la región del Niño 3,4 (<https://www.noaa.gov/>). Ha sido demostrado, para la región pampeana argentina, que el índice ONI representa los períodos húmedos y secos mediante la asignación de años Niño y Niña, respectivamente (Iriondo, 1995).

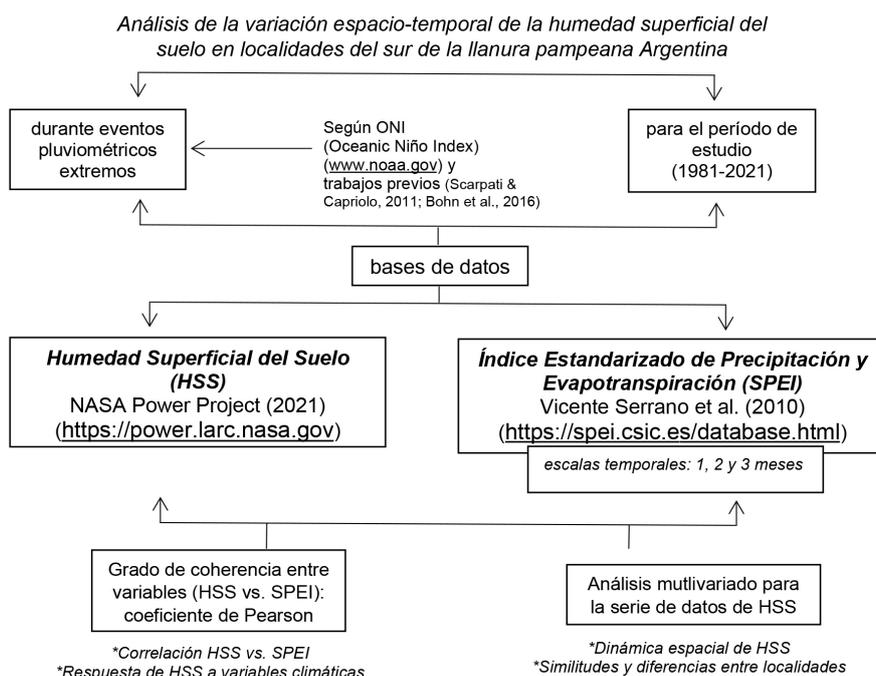
2.4. Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la HSS

La variabilidad espacio-temporal de la HSS se analizó en forma gráfica, mediante la interpretación de los extremos, la obtención de estadísticos descriptivos y la aplicación del método estadístico de agrupamiento clásico (cluster) siguiendo el método de Ward. Los métodos jerárquicos del análisis de agrupamiento o clúster son de utilidad cuando se presenta la necesidad de agrupar objetos y no se conoce la cantidad de clases que deben formarse. Este tipo de técnicas proporciona diferentes resultados de agrupación, sobre la misma serie de datos y permite determinar el número de grupos óptimo. El algoritmo de Ward es uno de los métodos que ofrece el análisis de agrupamiento jerárquico y posee la ventaja de tener fundamentos estadísticos y minimizar la dispersión entre los grupos que se forman (Dongo Román, 2017). Se utilizó el software gratuito Past 4.03 (folk.uio.no/ohammer/past) (Hammer et al., 2001). El agrupamiento estadístico se realizó, en primera instancia, para toda la serie de datos de HSS, a escala anual y para todas las estaciones y, en segunda instancia, sobre la base de los registros mensuales correspondientes a eventos extremos (año 2002, Niño y año 2008, Niña) previamente seleccionados, sobre la base de trabajos previos y de su clasificación según el ONI. Los valores medios de HSS para el período de estudio (1981-2021) también fueron analizados desde el punto de vista de la variabilidad estacional de la HSS. Este análisis se realizó con el objetivo de mostrar las diferencias entre situaciones consideradas extremas, desde el punto de vista climático y para establecer una comparación con aquellos agrupamientos realizados con la serie de datos completa.

2.5. Confección de la cartografía del área de estudio

La cartografía de localización se realizó mediante el uso del SIG gratuito QGIS (Quantum Geographic Information System, <https://www.qgis.org/>) y sobre la base de información vectorial proporcionada por el Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN) (hidrografía, localización relativa del área de estudio y límites administrativos) y ráster, proporcionada por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (topografía, Modelo de elevación digital DEM SRTM, 90 m).

Figura 2. Diagrama metodológico



Elaboración propia

3. Resultados

3.1. Análisis estadístico de las series de datos de SPEI y HSS

Los años 1995, 2008 y 2009 se presentaron entre los 8 años con valores más bajos de HSS, para la totalidad de las estaciones. En cuanto a la mayor humedad, la misma fue estimada principalmente durante los años 1984, 1997, 2001, para la totalidad de las estaciones. La HSS mostró relación interanual con las variables climáticas de la P y EVPT. Dicha correlación fue considerada fuerte por presentar un valor del coeficiente de Pearson $> 0,50$ (Hernández Lalinde et al., 2018) y fue mayor a escala del SPEI de 3 meses en comparación con los hallados a escala 1 mes del SPEI (Tabla 1). Tras el análisis visual de los máximos y mínimos en la relación de ambas variables, se observa concordancia entre los eventos considerados húmedos y muy húmedos, con los valores más altos de HSS (Figura 3 y 4). Por ejemplo, en BJ (Figura 3, BJ), en junio y julio de 1993 la HSS fue de 0,87 y 0,89 y el SPEI3 fue de 2,17 y 1,92, respectivamente, indicando períodos muy y extremadamente húmedos.

Tabla 1. Matriz de correlación, según método de Pearson, entre la HSS y el SPEI a escalas temporales de 1, 2 y 3 meses. Período 1981-2021

HSS	SPEI1	SPEI2	SPEI3
BJ	0,42	0,53	0,55
TA	0,53	0,55	0,54
BB	0,43	0,58	0,59
HA	0,44	0,57	0,60
RC	0,44	0,56	0,60
SR	0,50	0,71	0,75

Fuente: datos provistos por Nasa Power Project (2021) y Vicente-Serrano et al. (2010). Elaboración propia

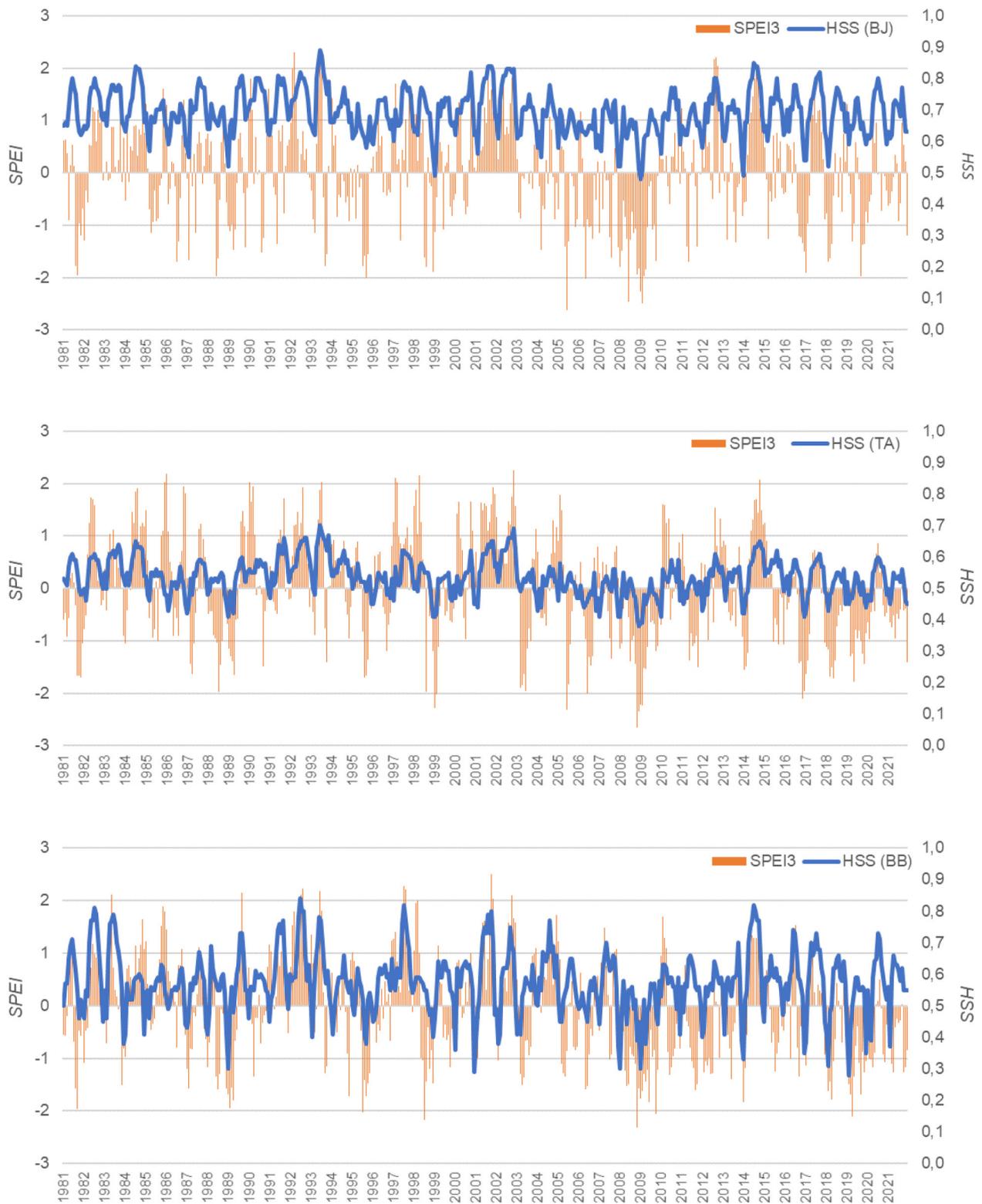
En TA, también se observó concordancia entre valores mínimos de HSS y SPEI3 representativos de períodos secos y viceversa. Por ejemplo, se citan como períodos de excedente hídrico los meses de junio de 1993 y septiembre de 2002 durante los cuales la HSS fue de 0,70 y 0,66 y el SPEI3 fue de 1,87 y 1,22, respectivamente. En el caso de años secos, se cita el ejemplo de noviembre de 2008, con HSS = 0,66 y SPEI3 = -2,65.

En BB, en noviembre de 2009, la HSS solo alcanzó el valor de 0,44 y se correspondió con un valor de SPEI3 de -1,22. Similarmente, en marzo de 2019, los valores fueron de 0,42 y -1,69 para la HSS y SPEI3, respectivamente. En HA, al S del área de estudio, el período 2008-2009 mostró valores bajos de HSS ($\sim 0,33$) y valores negativos de SPEI3 (Figura 3).

En RC, la tendencia también fue observada, cuando la HSS disminuyó, fue acompañada de valores de SPEI indicativos de períodos secos y viceversa (Figura 4, RC). En SR, al O de la región, se presentaron casos muy representativos tales como junio de 1999, con HSS = 0,71 y SPEI3 = 1,79, mayo de 2001, con HSS = 0,73 y SPEI3 = 2,15. En agosto de 2009, la HSS = 0,24 y el SPEI3 indicó un período extremadamente seco (SPEI3 = -1,93) (Figura 4).

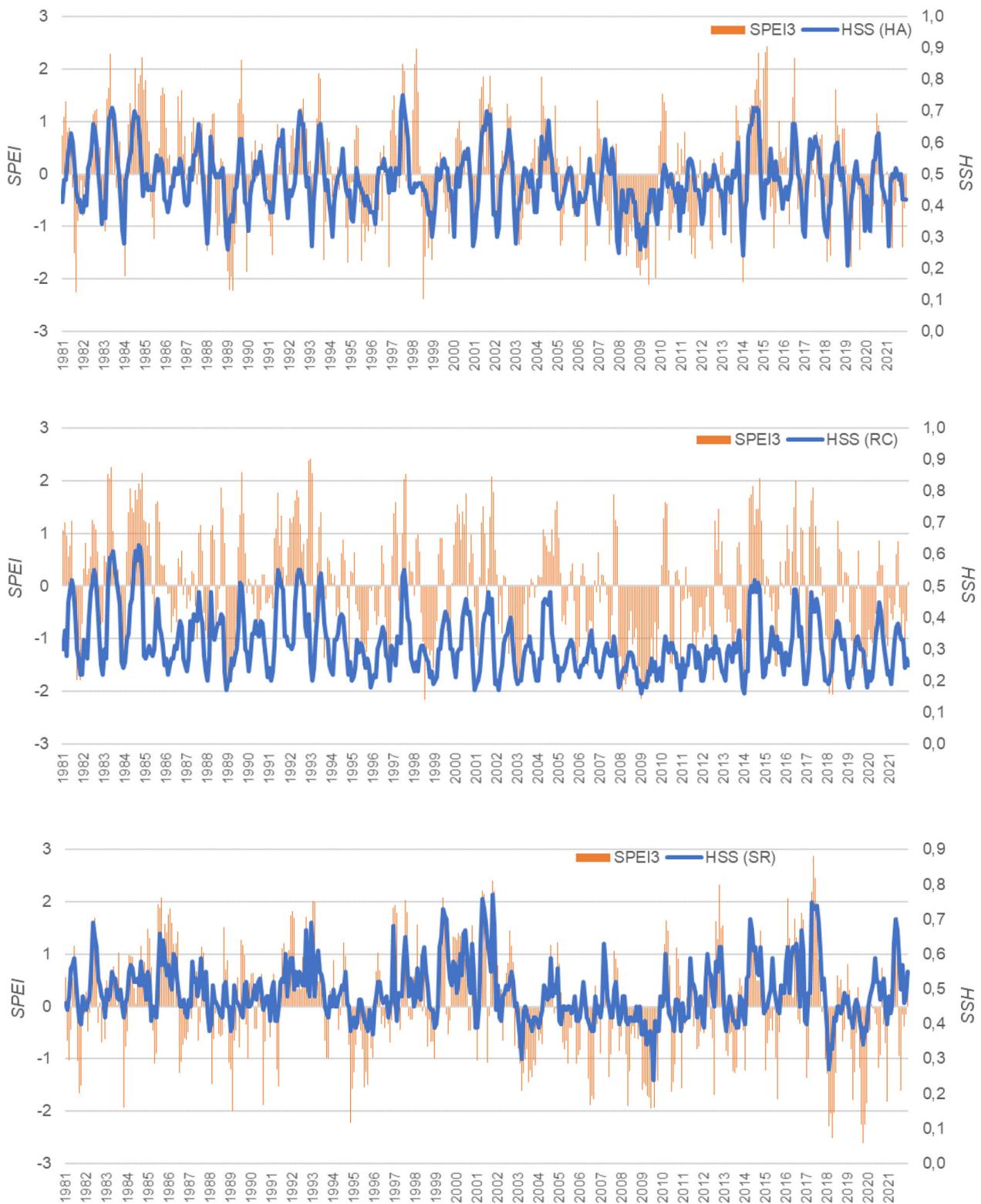
En términos generales, a una escala temporal de 3 meses, el índice climático SPEI mostró concordancia, incluso mayor a la demostrada entre la HSS y el SPEI1 y SPEI2, en la definición de períodos húmedos y secos con aumentos y descensos en la HSS, respectivamente. Tras la elaboración de las matrices de varianza y covarianza y la estimación del coeficiente de Pearson, la correlación entre ambas variables, climáticas y edáficas, mostró una correlación fuerte a lo largo del período estudiado (Tabla 1), mostrando una respuesta de la variable edáfica a las variables climáticas, en todas las estaciones. Tal como se explicó, si bien dicha correlación fue alta en todos los casos, los valores más altos se dieron en las localidades del O y S del área de estudio, donde se dan características de mayor aridez.

Figura 3. Evolución temporal interanual de la HSS durante el período estudiado (1981-2021) e índice climático SPEI a escala 3 meses, para cada localidad (de este a oeste): BJ, Benito Juárez; TA, Tres Arroyos; BB, Bahía Blanca



Fuente: datos provistos por Nasa Power Project y Vicente-Serrano et al. (2010). Elaboración propia

Figura 4. Evolución temporal interanual de la HSS durante el período estudiado (1981-2021) e índice climático SPEI a escala 3 meses, para cada localidad (de este a oeste): HA, Hilario Ascasubi; RC, Río Colorado SR, Santa Rosa



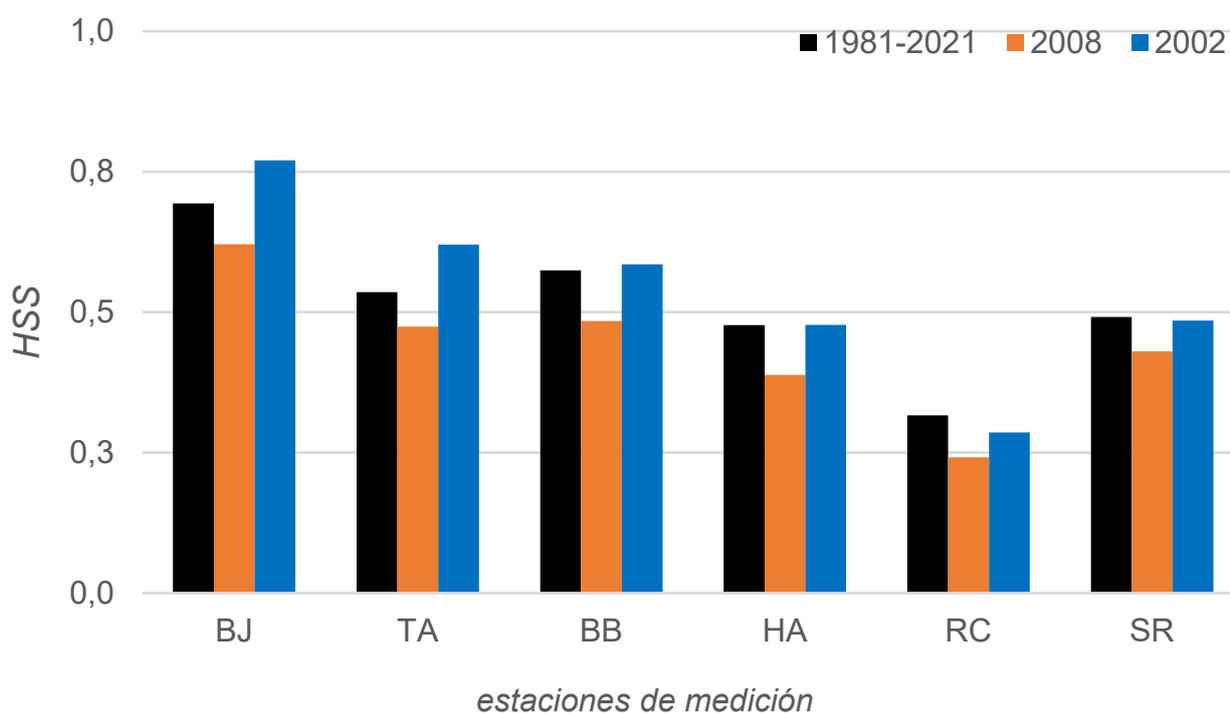
Fuente: datos provistos por Nasa Power Project y Vicente-Serrano et al. (2010). Elaboración propia

3.2. Determinación de eventos extremos y variación espacio-temporal de la HSS

Como resultado del análisis de la serie de datos del índice ONI y trabajos previos para la región (Scarpatti & Capriolo, 2011; Bohn et al., 2016) y, con el objetivo de analizar el comportamiento de ambas variables en situaciones hídricas extremas, se seleccionaron los años 2002 y 2008 como años representativos de excesos y déficit hídricos, respectivamente.

En cuanto a la variación interanual de la HSS (Figura 5), entre años secos, húmedos y los valores medios para el período, los máximos valores se hallaron durante el año considerado húmedo, en todas las localidades estudiadas. La media anual osciló entre 0,77 en el E del área de estudio (estación BJ) y de 0,29, en el sur (estación RC). Durante el año seco, se observó la misma tendencia a nivel espacial, registrándose la máxima HSS y la mínima en las estaciones de BJ y RC, respectivamente (E y S del área de estudio).

Figura 5. Variación espacio-temporal de la HSS: valores medios anuales, según localidad



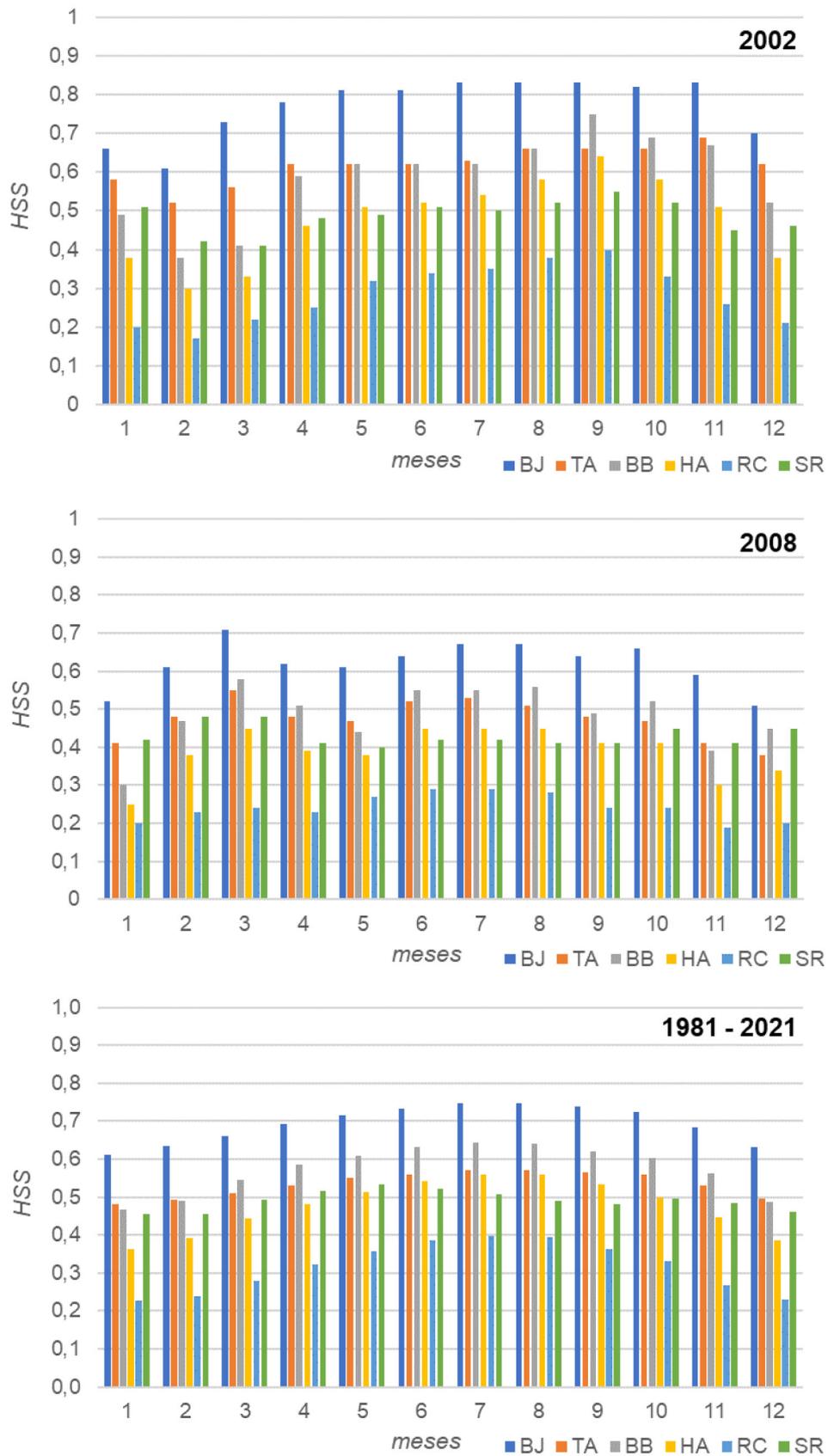
Fuente: datos provistos por NASA Power Project (2021). Elaboración propia

Los valores medios para el período de estudio (1981-2021) (Figura 5) oscilaron entre 0,23 y 0,75 para las estaciones de RC y BJ, respectivamente. En cuanto a los valores máximos de la media del período, los mismos se presentaron en la estación BJ. Temporalmente, los mismos se registraron en los meses de julio-agosto-septiembre (otoño-primavera) todas las localidades excepto para SR (situada al O) del área de estudio (Figura 6). En cuanto a los valores mínimos de la media del período, los mismos ocurrieron en los meses de verano, para todas las localidades (Figura 6). Durante el año de excedentes hídricos (Figura 6, 2002), los valores mínimos de HSS se registraron durante el verano para todas las localidades.

BB e HA fueron las localidades con mayor variabilidad anual, durante el año de excedentes hídricos (desviación estándar = 0,10) mientras que BJ mostró los mayores valores de HSS durante los 3 años, en relación con las demás estaciones de medición y, RC, los menores (Figura 6). Esto último fue acorde a lo esperado teniendo en cuenta la distribución espacial de las isohietas en la región (Figura 1).

Los registros medios anuales de HSS para el año seco (2008), no superaron el valor de 0,71 en toda el área de estudio (Figura 5). Los máximos valores, durante todo el año, se registraron en la estación de BJ, al E del área de estudio mientras que, los mínimos, ocurrieron en el S (estación RC), al igual que lo ocurrido para el año húmedo (2002) (Figura 5). Durante este último, los valores en BJ alcanzaron un máximo de 0,83 durante los meses de julio-agosto-septiembre (Figura 5).

Figura 6. Variación anual de la HSS, en cada localidad, durante: un año Niño (2002); un año Niña (2008) y el promedio para el período estudiado (1981-2021)

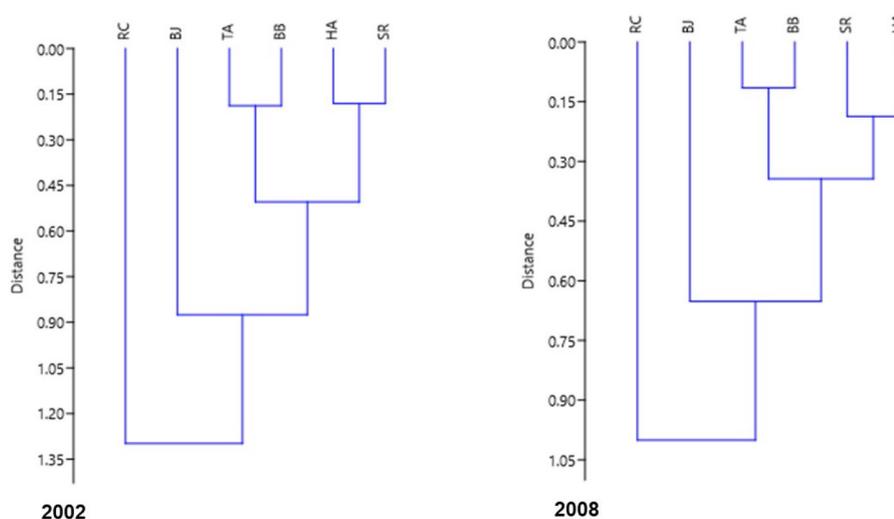


Fuente: datos provistos por NASA Power Project (2021). Elaboración propia

3.3. Análisis de agrupamiento sobre la base de datos mensuales y anuales de HSS

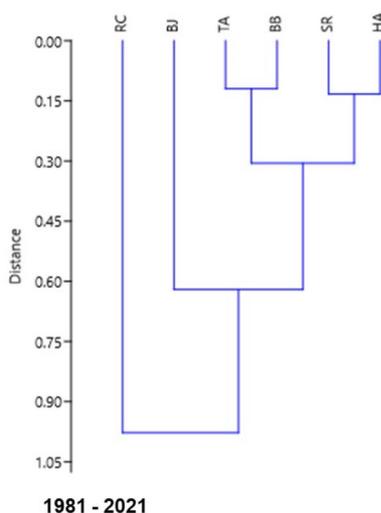
Como complemento, desde una perspectiva de análisis espacial de las variaciones de HSS, se realizaron análisis de agrupamiento multivariado. Se obtuvieron los dendogramas que mostraron grupos de localidades de acuerdo a la variabilidad temporal de la HSS durante el año Niña, el año Niño y para todo el período de datos mensuales (1981-2021). De igual manera, durante los 2 años extremos (2002 y 2008) (Figura 7), las localidades de BB y TA (S y E del área de estudio, respectivamente), SR e HA (O y SO del área de estudio) mostraron similitudes en la dinámica temporal de la HSS, dada por su agrupamiento. BJ, situada al E, presentó menor relación con los dos grupos mencionados anteriormente, siendo RC (al SO del área) la localidad más diferenciada del resto. A pesar de las características áridas de la región en la que se encuentra RC, es posible que los niveles de HSS se vean influidos por la cercanía entre la localización de la medición (grilla) y el río homónimo (Figura 1). No obstante, su similitud con el resto de las estaciones fue escasa durante los 3 períodos analizados (Figuras 7 y 8).

Figura 7. Análisis de agrupamiento para las series de datos mensuales de HSS de años extremos desde el punto de vista pluviométrico, para las 6 localidades estudiadas: año húmedo (2002) y año seco (2008)



Elaboración propia sobre la base de datos provistos por NASA Power Project (2021)

Figura 8. Análisis de agrupamiento para las series de datos anuales de HSS (1981-2021) de las 6 localidades estudiadas



Elaboración propia sobre la base de datos provistos por NASA Power Project (2021)

En cuanto a la dinámica de la HSS a nivel interanual para todo el período de datos, los registros mostraron los mismos agrupamientos en comparación con los patrones de variación de la HSS durante los años extremos. A nivel interanual, para la serie completa de datos (1981-2021), se definieron dos primeros grupos, con mayores similitudes entre sí, integrados por las estaciones de HA y SR, por un lado y, por BB y TA, por

otro. Posteriormente se relacionan con ambos grupos las estaciones de BJ y RC (Figura 8). En este último caso, se infiere que el motivo de disimilitud es que ambas estaciones constituyen los extremos geográficos del área de estudio. Ello, teniendo en cuenta que el análisis se realiza sobre la base de datos de HSS correspondientes a un período mayor a 30 años, se corresponde con la tendencia regional de la precipitación y evapotranspiración en Argentina, la que disminuye y aumenta en dirección NE-SO, respectivamente (Bianchi & Cravero, 2010).

La disimilitud hallada entre las estaciones de BJ y RC también se observó a partir del análisis de la marcha interanual de la HSS. En cuanto a ello, ambas presentaron de manera constante, los máximos y mínimos de HSS, respectivamente (Figura 3 y 4). BB y TA, mostraron una marcha interanual muy similar entre sí (Figura 3), lo que se infiere como uno de los aspectos que las posicionó en el mismo grupo por similitud (Figura 8). En este caso, sus valores máximos para todo el período (1981-2021) fueron de 0,64 (BB) y 0,57 (TA) y los mínimos fueron de 0,47 y 0,48, respectivamente. El último de los grupos, según el análisis de agrupamiento sobre la serie completa de datos de HSS, estuvo conformado por HA y SR (Figura 8). Los valores medios para todo el período fueron de 0,48 (HA) y 0,49 (SR).

4. Discusión de resultados

La diferenciación espacial hallada sobre la base de los valores de HSS en la región, responde satisfactoriamente a la clasificación climática de Beck et al. (2018) en la que, a partir de un estudio de los parámetros del clima para el período 1980-2016, las localidades del E (TA, BJ), S (BB) y O (SR) corresponden a regiones más húmedas que aquella en la que se sitúan las estaciones de RC e HA (Figura 1). Los valores de HSS obtenidos de la base de datos de reanálisis (NASA Power Project, 2021) y analizados mediante estadística multivariada e interpretación visual de su dinámica a través del tiempo así como también mediante el cálculo estadístico de su relación con un índice climático coinciden, también, con lo presentado por Gusmerotti y Mercau (2022) en su determinación de la capacidad de retención de agua útil (CRA) de la región pampeana argentina, sobre la base de cartas de suelos elaboradas por el INTA a diferentes escalas.

Los valores mínimos de HSS hallados para la región del sur (estaciones de RC e HA) se encuentran en concordancia con lo afirmado por González Uriarte y Navarro (2007) en tanto que la disponibilidad de agua se restringe al río Colorado (Figura 1) y el riego es una práctica necesaria en dicha zona. Según el Índice de Aridez de De Martonne, estimado por Bianchi y Cravero (2010) para el territorio argentino, las estaciones de HA y RC correspondieron a la región semiárida, SR y BB al sector subhúmedo mientras que TA y BJ presentaron un índice entre 30 y 60, lo cual las categoriza como húmedas. Estas consideraciones coinciden con lo hallado en el presente trabajo desde el punto de vista de la distribución y el gradiente de la HSS. Estos hallazgos demuestran la factibilidad del uso de datos de reanálisis NASA POWER para la estimación de la HSS en la región de estudio, perteneciente a la región pampeana argentina. Los mismos han sido validados con éxito en otras regiones (Tayyeh & Mohammed, 2023; Tan et al., 2023), para parámetros meteorológicos y climáticos, a escala global, mediante métodos estadísticos y contrastación con datos in situ.

Las características de los suelos, a partir de las clasificaciones edáficas existentes, de órdenes de suelo (USDA, 1975) y de clima edáfico (Pereyra, 2012) coinciden con la distribución espacial hallada para la HSS en el presente trabajo. De esta manera, el análisis obtenido en referencia a su dinámica espacial constituye el principal aporte. En el sur, estación HA, los bajos valores de HSS permiten inferir la influencia de la absorción de la textura predominante del suelo (arenosa) presente en las regiones medanosas del extremo SO de la ecorregión del espinal (Morello et al., 2012).

En cuanto a la variabilidad interanual de la HSS, se constató un predominio de valores más bajos durante los años 1995, 2008 y 2009. En los 3 casos, han sido categorizados y estudiados por numerosos autores como períodos de extrema sequía en la región de estudio, con repercusión en los rendimientos agrícolas de cada año y las extensiones areales de los cuerpos de agua en el O de la región de estudio (D'Ambrosio et al., 2013), consecuencias socio-ambientales y económicas tales como la erosión edáfica, salinización de tierras bajo riego y mortandad de animales en el S de la provincia de Buenos Aires (Ferrelli et al., 2012). Los años mencionados y categorizados como secos en el presente estudio también fueron señalados entre los períodos de mayor sequía para la provincia de Buenos Aires (Scarpati & Capriolo, 2013). Específicamente para el evento ocurrido en 2008, Scarpati y Capriolo (2013) indicaron que, el mismo, afectó a la totalidad del territorio argentino con consecuencias para el ganado (se tuvo una gran mortandad), las cosechas y la declaración de "Desastre Agropecuario". El S, O y SO de la provincia de Buenos Aires (Figura 1) fueron los sectores más afectados. En cuanto a los años que mostraron mayor HSS, 1992, 1993, 2001 y 2014, se destacaron para

todas las estaciones y las consecuencias en la región también fueron observadas. Se demostró que los eventos El Niño (2002/3) y La Niña (2007/8) afectaron las precipitaciones del área de estudio observándose, como consecuencia, un incremento y decrecimiento de las extensiones areales de los cuerpos de agua, respectivamente (Bohn et al., 2016). Los mismos años, para el SO de la provincia de Buenos Aires, fueron caracterizados por Brendel et al. (2017) como húmedos y extremadamente secos, respectivamente y fueron estudiados junto a la evolución de los rendimientos de un cultivo de secano (trigo). En soporte a lo hallado para los años 2008 y 2009 se creó, para el sudoeste de la región en estudio, una Comisión de Emergencia y Desastres y un Sistema Nacional para Prevención de Desastres y emergencia agrícola, mediante la Ley agrícola de emergencia N° 26509, ello ligado a las consecuencias de los eventos de extrema sequía (Abraham et al., 2016). Desde el verano de 2008 en adelante, para la cuenca hidrográfica del Río de la Plata, al N de la región de estudio, Abelen et al. (2015) mostraron la existencia de una fuerte relación entre las variaciones en la humedad del suelo y el ONI, el que indicó un evento La Niña.

La dinámica espacial de la HSS y la dinámica del índice climático SPEI mostraron una correlación alta (Coeficiente de Pearson $> 0,50$) en todas las localidades, al igual que la conexión que evidenció, para la cuenca del Río de La Plata (Abelen et al., 2015), con las anomalías de diferentes parámetros hidrológicos y la precipitación. Se comprobó la influencia del balance simple de agua, a una escala temporal de 3 meses, dado mediante el SPEI y su variabilidad en la dinámica espacial de la HSS en las estaciones analizadas sin descartar la posibilidad de que exista otra variable forzante que pueda acrecentar o mitigar esta respuesta, tales como los cambios de cobertura de suelo o la variabilidad de los niveles freáticos, aspectos que no han sido tenidos en cuenta en el presente estudio.

El presente trabajo constituye un aporte para el conocimiento de la dinámica temporal y espacial de la variable de disponibilidad de agua, en una región en la que los excesos y los déficits hídricos se alternan cíclicamente. Ambos extremos pueden traer consecuencias para la producción agrícola y ganadera, tanto a través del desarrollo de inundaciones, así como también como consecuencia de sequías extremas. Se aporta el uso de datos de reanálisis y técnicas de análisis, lo que permite arribar a patrones de comportamiento de la HSS en una región amplia, con cobertura de suelo homogénea y en la que las variables del clima en conjunto con las características edáficas se infieren como forzantes de esta dinámica.

5. Conclusiones

La dinámica espacial y temporal de la HSS en localidades del sur de la llanura pampeana argentina mostró un patrón relacionado, a nivel interanual, con el régimen de la precipitación. Esto significó que, las localidades situadas al E (BJ, por ejemplo) de la región presentaron niveles superiores de HSS con respecto a aquellas situadas al SO (RC, por ejemplo) y dicha variación también mostró relación según correspondiera a años secos o húmedos, siendo siempre inferior durante los primeros. La aplicación del índice climático SPEI permitió demostrar que la respuesta del parámetro edáfico presentó mayor correlación a una escala temporal de 3 meses. Esto, teniendo en cuenta el uso de suelo predominantemente agrícola, constituye, sin presentarse como un modelo predictivo en sí mismo, cierto aporte para la planificación de los recursos.

A escala anual, la dinámica del parámetro analizado a lo largo de los meses, fue homogénea en el área de estudio, entre el período completo de estudio y los años secos. A partir de los datos de todo el período, se constató que, para todas las estaciones, los mínimos y máximos valores de HSS se registraron durante los meses de verano e invierno y primavera, respectivamente. La definición de estos patrones temporales también constituye un aporte para la actividad productiva de la región. En los años secos, los valores más bajos también se registraron durante el verano mientras que los máximos se dieron en otoño-invierno y primavera, en concordancia con el régimen de precipitación de la región. En los registros correspondientes a los años húmedos, la HSS hallada fue inferior durante el verano en todas las localidades excepto en SR. Estos aspectos también denotan la influencia de un relieve llano, en el que los procesos hidrológicos se rigen, fundamentalmente, por procesos verticales (en este caso, la evapotranspiración y evaporación). En cuanto a los máximos hallados de HSS, estos se registraron en otoño-invierno y primavera. En cuanto a la HSS estimada, según años pluviométricamente diferentes, los máximos valores fueron identificados durante los años húmedos de todas las localidades. A nivel espacial, los agrupamientos de localidades sobre la base de datos de HSS no se diferenciaron a pesar de pertenecer a períodos extremos y a valores promedio de más de 30 años y mostraron una relación estrecha con el patrón regional de precipitaciones.

La dependencia de la HSS con respecto al balance simple de agua dado por el SPEI fue demostrada a nivel interanual mientras que, a nivel anual, la correlación entre ambas variables fue mayor a una escala temporal

de 3 meses. La metodología del presente trabajo, basada en el uso de bases de datos disponibles, con libre acceso, a nivel global, permite su aplicación en otras áreas geográficas similares. Los resultados obtenidos son relevantes teniendo en cuenta que el área de estudio presenta una actividad económica basada, fundamentalmente, en la producción agrícola. Asimismo, es una región en la que la alternancia de períodos secos y húmedos se traduce en un riesgo para la producción de cultivos de secano por la falta de agua disponible, así como también por fenómenos de anegamiento y/o inundación de tierras productivas, respectivamente.

Financiación

La investigación se desarrolla en el marco del Proyecto de Grupos de Investigación (PGI) Vulnerabilidad hidrológica y problemas ambientales en cuencas hidrográficas de llanura (región pampeana, Argentina), otorgado y subsidiado por la Universidad Nacional del Sur (UNS) (Argentina).

Agradecimientos

La autora agradece al Proyecto POWER NASA Langley Research Center (LaRC) POWER Project fundado a través de la NASA Earth Science/Applied Science Program, al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), a la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), a los autores (citados en el presente trabajo) de la base de datos de SPEI, al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), al Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina y al Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) por el suministro de datos, en forma gratuita, para la realización de la presente investigación. La autora agradece, también, a la Universidad Nacional del Sur y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Referencias

- Abelen, S., Seitz, F., Abarca del Río, R., & Güntner, A. (2015). Droughts and floods in the Plata basin in soil moisture data and GRACE. *Remote Sensing*, 7, 7324-7349. <https://doi.org/10.3390/rs70607324>
- Abraham, E.M., Guevara, J.C., Candia, R.J., & Soria, N.D. (2016). Dust storms, drought and desertification in the Southwest of Buenos Aires Province, Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 48(2), 222-241. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-86652016000200016&lng=es&nrm=iso
- Barros, V. & Camilloni, I. (2016). *La Argentina y el cambio climático: de la física a la política*. Editorial Eudeba.
- Baatz, R., Hendricks Franssen, H. J., Euskirchen, E., Sihi, D., Dietze, M., Ciavatta, S., Fennel, K., Beck, H., De Lannoy, G., Pauwels, V. R. N., Raiho, A., Montzka, C., Williams, M., Mishra, U., Poppe, C., Zacharias, S., Lausch, A., Samaniego, L., Van Looy, K., Bogena, H., Adamescu, M., Mirtl, M., Fox, A., Goergen, K., Naz, B.S., Zeng, Y., Vereecken, H. (2021). Reanalysis in Earth system science: Toward terrestrial ecosystem reanalysis. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000715. <https://doi.org/10.1029/2020RG000715>
- Bengtsson, L., Hagemann, S., & Hodges, K.I. (2004), Can climate trends be calculated from reanalysis data?, *J. Geophys. Res.*, 109, D11111. <https://doi.org/10.1029/2004JD004536>
- Beck, H.E., N.E. Zimmermann, T.R. McVicar, Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E.F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Nature Scientific Data*, 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Beguiría, S., Vicente-Serrano, S.M., & Angulo, M. (2010). A multi-scalar global drought data set: the SPEIbase: A new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, (91), 1351-1354. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2988.1>
- Bianchi, A.R. & Cravero, S.A.C. (2010). Atlas climático digital de la República Argentina. Salta, Argentina: Ediciones Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria. <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/16040>
- 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), 1-15. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>
- Brendel, A.S., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2017). Variabilidad de la precipitación y su relación con los rendimientos agrícolas en una región semiárida de la llanura pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, LXXVIII(282), 7-29. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201701>
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2021). Efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana (Argentina). Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales. *Revista Geográfica Venezolana*, 62(1), 92-106. <https://doi.org/10.53766/RGV/2021.62.01.03>
- Bruniard, E.D. (1982). La diagonal árida argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica*, 95, 5-20. <https://www.jstor.org/stable/40992410?origin=JSTOR-pdf>
- Caicedo-Rosero, L.C., Méndez-Ávila, F. de J., Gutiérrez-Zeferino, E., & Flores-Cuautle, J. de J.A. (2021). Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *Pádi Boletín Científico De Ciencias Básicas E Ingenierías Del ICBI*, 9(17), 1-8. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7035>
- Cruz, G., Baethgen, W., Picasso, V., & Terra, R. (2014). Análisis de sequías agronómicas en dos regiones ganaderas de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 18(1), 126-132. <https://doi.org/10.31285/AGRO.18.448>
- Chen, J., Zhang, B., Zhou, J., & Guo, F. (2023). Temporal and Spatial Changes of Drought Characteristics in Temperate Steppes in China from 1960 to 2020. *Sustainability*, 15(17), 12909. <https://doi.org/10.3390/su151712909>
- D'Ambrosio, G.T., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2013). Evaluación de la sequía 2008-2009 en el oeste de la Región Pampeana (Argentina). *Cuadernos Geográficos*, 52(5), 29-45. <https://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/924>

- Del Valle Rivarola, A. (2009). Vulnerabilidad agroclimática a la sequía en la región centro-sur de la provincia de Córdoba [Master's Thesis, Universidad Nacional de Río Cuarto]. European Drought Observatory. https://edo.jrc.ec.europa.eu/gisdata/scado/drought/ar/riocuarto/Rivarola_2009.pdf
- Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). (1975). *Soil taxonomy. A basic system of soil classification for working and interpreting soil surveys*. Soil conservation Service. Agriculture Handbook, 436.
- Dillon, B., Pombo, D., Martínez Uncal, M.C., Leone, E.D., & Bossa, J.P. (2019). *Inundaciones y anegamientos en el noreste de La Pampa: Obra hidráulica de mitigación*. <https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/>
- Dongo Román, A.B. (2017). *Descripción Metodológica del análisis clúster utilizando el algoritmo Ward* [Trabajo de suficiencia profesional, Universidad Nacional Agraria La Molina]. <https://hdl.handle.net/20.500.12996/3384>
- Ferrelli F., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2012) Variabilidad de la precipitación y ocurrencia de eventos secos en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). In *IX Jornadas Nacionales de Geografía Física* (pp. 15-28).
- Ferrelli, F., Brendel, A., Aliaga, V.S., Piccolo, 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*, 45(1), 393-416. <https://doi.org/10.18172/cig.3707>
- Ferrelli, F. (2020). Evaluación de la tendencia y la periodicidad de eventos térmicos y pluviométricos en el Sudoeste Bonaerense (Argentina). *Revista Huellas*, 24(2), 11-25. <https://doi.org/10.19137/huellas-2020-2415>
- González Uriarte, M., & Navarro, E. (2007). Geomorfología, suelos y ocupación rural. Partido de Patagones (Buenos Aires). In Cazzaniga, N. & Vaquero, M. del C. (Eds.), *Ambiente natural, campo y ciudad, estrategias de uso y conservación en el sudoeste bonaerense: Actas de las IV Jornadas Interdisciplinarias del sudoeste bonaerense*. Editorial Universidad Nacional del Sur.
- Gusmerotti, L.A., & Mercau, J.L. (2022). Generación de mapas de capacidad de retención de agua útil en la región Chaco-Pampeana argentina. In *XXVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo* (pp. 1716-1721). AACS. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/13557>
- Hammer, O., Harper, D.A.T., & Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Hernández Lalinde, J.D., Espinosa Castro, F., Rodríguez, J.E., Chacón Rangel, J.G., Toloza Sierra, C.A., Arenas Torrado, M.K., Carrillo Sierra, S.M., & Bermúdez Pirela, V.J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=55963207025>
- Holzman, M.E., & Rivas, R. (2013). Evaluación de la humedad del suelo mediante imágenes de temperatura radiactiva e índice de vegetación. In *Temas actuales de la hidrología subterránea* (pp. 219-224). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (Edulp).
- Iriondo, M. (1995). La Pampa. In J. Argollo y P. Mourguiart (Eds.), *Climas cuaternarios en América del Sur* (pp. 283-306). Editorial Institut Francais de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération.
- Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN). <https://www.ign.gob.ar>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (2009). *Informe Técnico Unificado PNECO 1643. Cobertura del suelo de la República Argentina*. Año 2006-2007 (LCCS-FAO). INTA.
- Jobbágy, E.G., Nosetto, M.D., Santoni, C.S., & Baldi, G. (2018). El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral*, 18, 305-322.
- Liu, Z., Xu, Z., Yao, Z., & Huang, H (2012). Comparison of surface variables from ERA and NCEP reanalysis with station data over eastern China. *Theor Appl Climatol*, 107, 611-621. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0501-1>
- Liu, L., Zhang, R., & Zuo, Z. (2014). Intercomparison of spring soil moisture among multiple reanalysis data sets over eastern China. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, 54-64. <https://doi.org/10.1002/2013JD020940>

- Llorens, P., Latron, J., & Gallart, F. (2003). Dinámica espacio-temporal de la humedad del suelo en un área de montaña mediterránea. Cuencas experimentales de Vallcebre (Alto Llobregat). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, VI, 71-76. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122599/records/6477602e5eb437dfff779fd9>
- Morello, J., Matteucci, S.D., Rodríguez, A.F., & Silva, M. (2012). *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*. Ed. Orientación Gráfica Editora.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021). Langley Research Center (LaRC) Prediction of Worldwide Energy Resource (POWER) fundada a través de la NASA Earth Science/Applied Science Program (NASA POWER DATA). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Pereyra, F.X. (2012). Suelos de la Argentina. Geografía de suelos, factores y procesos formadores. *Anales*, 50. Ed. Segemar-AACS-GAEA. <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/3619>
- Rivas, R., Niclós, R., Santos García, V., Doña, C., Caselles, V., Holzman, M., Bayala, M., Carmona, F., Ocampo, D., Thibeault, M., & Soldano, A. (2013). Validación de datos de humedad de suelo SMOS en la región pampeana argentina. *Temas Actuales De La Hidrología Subterránea*, 225-230.
- Scarpati, O.E., & Capriolo, A.D. (2013). Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, (82), 38-51. <https://doi.org/10.14350/riq.31903>
- Scarpati, O.E. & Capriolo, A.D. (2018). Evolución del exceso de agua edáfica anual en la Región Pampeana (Argentina). *Estudios Geográficos*, LXXIX/285, 375-395. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201814>
- Tan, M.L., Armanuos, A.M., Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddham, S., Al-Areeq, A.M., Abba, S.I., Halder, B., Kilinc, H.C., & Yaseen, Z.M. (2023). Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes. *J. Hydrol.*, 624, 129940. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129940>
- Tapley, B. (2001). The GRACE mission: status and future plans. *EOS Trans. AGU*, 82(47).
- Tayyeh, H.K., & Mohammed, R. (2023). Analysis of NASA POWER reanalysis products to predict temperature and precipitation in Euphrates River basin. *Journal of Hydrology*, 619, 129327. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129327>
- Tian, J., Zhang, B., He, C., Han, Z., Reemt Bogena, H., & Huisman, J.K. (2019). Dynamic response patterns of profile soil moisture wetting events under different land covers in the Mountainous area of the Heihe River Watershed, Northwest China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.006>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. *Journal of Climate*, (23), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Viggiano, M., Gherardi, E., Cimini, D., Di Paola, F., Gallucci, D., Gentile, S., Larosa, S., Nilo, S.T., Ricciardelli, E., & Romano, F. (2021). The role of temporal resolution of meteorological inputs from reanalysis data in estimating air humidity for modelling applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311, 108672. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108672>
- Viglizzo, E.F., Frank, F.C., & Carreño, L. (2006). Situación ambiental en las ecorregiones pampa y campos y malezales. In Brown, A., Martínez Ortíz, U., Acerbi, M., & Corcuera, J. (Eds.), *La situación ambiental argentina 2005* (pp. 263-278). Fundación Vida Silvestre Argentina.
- Yang, S., Li, R., Wu, T., Hu, G., Xiao, Y., Du, Y., Zhu, X., Ni, J., Ma, J., Zhang, Y., Shi, J. & Qiao, Y. (2020) Evaluation of reanalysis soil temperature and soil moisture products in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau *Geoderma*, 377, 114583. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114583>