



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

**Agua superficial de las llanuras
del núcleo agroproductivo de Argentina:
análisis basado en múltiples líneas de evidencia**

Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en
el área Ciencias de la Atmósfera y los Océanos

Lic. Lucía María Cappelletti

Directora: Dra. Anna A. Sörensson
Co-Director: Dr. Esteban G. Jobbágy

Consejera de estudios: Dra. Olga C. Penalba

Lugar de trabajo: Universidad de Buenos Aires. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA) / Instituto Franco-Argentino de Estudios sobre el Clima y sus Impactos (IRL IFAECI/CNRS-CONICET-IRD-UBA)

Resumen

Agua superficial de las llanuras del núcleo agroproductivo de Argentina: análisis basado en múltiples líneas de evidencia

Esta tesis tiene como objetivo avanzar en la descripción y entendimiento de la dinámica del agua superficial y sub-superficial de llanuras agrícolas propensas a inundarse con nivel freático poco profundo, como consecuencia del cambio de uso de suelo de vegetación perenne -nativa o cultivada- a cultivos anuales. La región que aquí se estudia es el sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina. Adicionalmente, a lo largo de esta tesis se analiza y se expone la coherencia hidrológica de productos que se basan en diferentes paradigmas, con el fin de mostrar la importancia del uso de múltiples líneas de evidencia.

En primer lugar, se desarrolló, se calibró y se puso a prueba una herramienta para la detección de agua superficial de llanuras agrícolas en la que el nivel freático se encuentra próximo a la superficie. Esto permitió poner en evidencia que inundaciones y anegamientos de la región, identificadas por productos globales como categoría “agua abierta” no están constituidas simplemente por agua, sino que también están dadas por combinaciones de agua con suelo desnudo y vegetación. Para la implementación de esta herramienta se empleó información espectral de satélites del tipo óptico.

Se exploró también si el cambio de extremos diarios y mensuales de precipitación, que suele ser empleado como indicador del cambio de inundaciones, es apto para la caracterización del tipo de inundaciones que sufre la región de interés. Para este análisis se utilizaron datos *in situ* y productos satelitales. El mismo reveló que las inundaciones de la región han aumentado sin presentar cambios en el régimen de sus precipitaciones. Además, si se compara el presente (las últimas dos décadas) con el pasado (las dos décadas anteriores al presente), la asociación entre el nivel freático y las inundaciones se ha vuelto más fuerte, y las inundaciones más reactivas a la precipitación acumulada. En ninguno de los dos períodos hay asociación entre las inundaciones y los extremos de precipitación considerados, no obstante si la hay si se considera precipitación acumulada. De este estudio se ha derivado que el uso aislado de cambios en índices de extremos diarios y mensuales de precipitación, generalmente utilizados por la comunidad climatológica internacional para estudiar cambios en inundaciones, no son un proxy adecuado del comportamiento de las inundaciones en llanuras agrícolas estancadas, donde la acumulación de excesos graduales de precipitación y el estado freático son relevantes.

Por otro lado se exploró la humedad del suelo superficial como variable que integra la interacción entre reservorios, mecanismos de entrada y salida de agua del suelo de la región. Esto se realizó utilizando estimaciones satelitales y mediciones *in situ* como fuentes de información complementarias entre sí. En este contexto, y siendo que la red de dispositivos empleada fue instalada con el fin de evaluar estimaciones de misiones satelitales, se espera que la dinámica de los cultivos y de las inundaciones se exprese en la dinámica de la humedad del suelo a escala temporal anual y diaria en ambas fuentes de información. Sin embargo, se encontró que los dispositivos *in situ* utilizados fueron instalados cerca de viviendas en lugar de campos de cultivo propensos

a inundarse, que es la cobertura dominante de la región. En este sentido, se evaluó el sesgo introducido por la ubicación de los dispositivos *in situ* en una cobertura de suelo que no es representativa de la región, mostrando que estos no captan la diferencia entre las temporadas de cultivo inactivo y activo en cuanto a la disponibilidad diaria de agua del suelo. Además, no captan el fenómeno de anegamiento como si lo hacen las misiones satelitales. También se expone el impacto de las lagunas de datos en los registros de humedad del suelo superficial de misiones satelitales con pocos años de datos disponibles al calcular estadísticas representativas, y la importancia de que los sistemas satelitales incorporen en sus rangos de humedad del suelo la respuesta de regiones propensas a inundarse.

Finalmente se evaluó el desempeño del modelo de superficie ORCHIDEE en representar procesos hidrológicos de llanuras agrícolas con napa freática poco profunda y la transformación de su dinámica sobre la región de estudio, como resultado del cambio de uso y cobertura del suelo. Al integrar un modelo de superficie en esta tesis, no sólo se incorpora una fuente más de información, sino también un procedimiento de análisis de los procesos involucrados en los anegamientos e inundaciones de un sistema que posee consistencia física entre las variables que lo fuerzan y las que simula. Los resultados sugieren que, aunque ORCHIDEE puede capturar ciertos aspectos de los procesos hidrológicos en las llanuras agrícolas de Argentina, aún existen desafíos para modelar con precisión el cambio hidrológico observado. Es importante resaltar que los aspectos sí capturados fueron resultado de ajustar los parámetros del uso y cobertura de suelo a los de la región de estudio, en lugar de utilizar la información *default* del modelo de ORCHIDEE, cuyos parámetros que describen los ciclos de cultivo se corresponden a datos de observación procedentes principalmente de latitudes altas del hemisferio norte. En este capítulo, se expone la complejidad del desajuste entre los resultados del modelo y el cambio hidrológico observado, que posiblemente confunde la *performance* del modelo, con la incertidumbre intrínseca de los forzantes, y la adecuación de los parámetros sobre el uso y cobertura de suelo, para la representación de la región de estudio de esta tesis.

A lo largo de este trabajo se resalta la importancia de emplear múltiples líneas de evidencia, sobre todo en regiones donde los datos son escasos, como es el caso de la que aquí se estudia. Para ello, no solo se combinó el uso de mediciones *in situ*, estimaciones satelitales y salidas de modelo de superficie terrestre, sino también informes locales de instituciones nacionales y subnacionales como otra pieza de conocimiento de valor fundamental.

Palabras clave: agua en superficie, inundación, anegamiento, nivel freático, humedad de suelo superficial, datos *in situ*, estimaciones de sensoramiento remoto, simulaciones de modelo de superficie terrestre, múltiples líneas de evidencia, llanuras agrícolas, Llanura Pampeana, Argentina

Abstract

*Surface water in the plains of the agro-productive core of Argentina:
analysis based on multiple lines of evidence*

This thesis aims to advance in the description and understanding of the surface and sub-surface water dynamics of flood-prone agricultural plains with shallow water tables as a consequence of land use change from perennial vegetation –native or cultivated– to annual crops. The region studied here is southeastern Córdoba, Argentina. Additionally, the hydrological coherence of products based on different paradigms is analysed and exposed throughout this thesis, in order to show the importance of using multiple lines of evidence.

Firstly, a tool was developed, calibrated and tested for the detection of surface water in agricultural plains with shallow water table, which showed that floods and waterlogging in the region identified by global products as open water are not simply made up of water, but also consists of the combination of water, bare soil and vegetation. For the implementation of this tool, spectral information from optical satellites was used.

It was also explored whether the change in daily and monthly precipitation extremes, which are often used as proxies of flood change, are suitable for characterising the type of flooding experienced in the region of interest. In situ data and satellite products were used for this analysis. It was found that flooding in the region has increased although the precipitation regime has not changed. Furthermore, comparing the present (the last two decades) with the past (the two decades prior to the present) of the region, the association between the water table and flooding has become stronger, and flooding more reactive to the accumulated precipitation. In neither period an association between flooding and extreme precipitation was found, however there is when considering cumulative precipitation. This study shows that the isolated use of changes in the daily and monthly precipitation extreme indices, generally used by the international climatological community to study changes in flooding, are not an adequate proxy for flooding behaviour in flood-prone agricultural plains.

In addition, surface soil moisture was explored as a variable that integrates the interaction between reservoirs, water inflow and outflow mechanisms of the soil in the region. This was done using satellite estimates and in situ measurements as complementary sources of information. Since the network of in situ devices used was established for evaluating estimates from satellite missions, crop and flood dynamics are expected to be captured in annual and daily time-scale soil moisture dynamics in both sources of information, however, it was found that the in situ devices were installed close to residential houses instead of flood-prone crop fields, which is the dominant cover of the region. In this sense, the bias introduced by the location of the in situ devices in a land cover that is not representative of the region was assessed, showing that they do not capture the difference between inactive and active cropping seasons in terms of daily soil water availability. Furthermore, they do not capture the phenomenon of waterlogging as the satellite soil moisture missions do. The potential impact of data gaps in surface soil moisture records from satellite missions with few years of available

data in calculating representative statistics, and the importance of satellite systems incorporating the response of flood-prone regions into their soil moisture thresholds is also discussed.

Finally, the performance of the ORCHIDEE surface model in representing the hydrological processes of shallow water table agricultural plains and the transformation of the dynamics of the study region as a result of land use and land cover change was evaluated. By integrating a surface model in this thesis, not only is an additional source of information incorporated, but also a source of analysis of the processes involved in the flooding and waterlogging of a system that has physical consistency between the variables it forces and those it simulates. The results suggest that, although ORCHIDEE can capture certain aspects of hydrological processes in the agricultural plains of Argentina, there are still challenges in accurately modelling the observed hydrological change. It is important to note that the aspects that were captured were the result of adjusting the land use and land cover parameters to those of the study region, rather than using the default information from the ORCHIDEE model, whose parameters involved in the crop cycles are derived from observational data mainly from high latitudes in the northern hemisphere. It shows the complexity of the mismatch between model results and observed hydrological change, possibly misleading the model performance with the intrinsic uncertainty of the meteorological forcings, and observations of land use and land cover that truly represent the region studied in this thesis.

Throughout this work, the importance of employing multiple lines of evidence is highlighted, especially in regions where data are scarce, as is the case here. To this end, not only the use of in situ measurements, satellite estimates and land surface model outputs were combined, but also local reports from national and sub-national institutions as another piece of knowledge of fundamental value.

Keywords: surface water, flooding, waterlogging, water table, surface soil moisture, in situ data, remote sensing estimates, land surface model simulations, multiple lines of evidence, agricultural plains, Pampean Plain, Argentina

Agradecimientos

A Carlos, Claudia, Juan y Teresa. Mi papá, mi mamá, mi hermano y mi nonna. Las personas que me esperaban con la comida hecha después de cursar por muchas horas, y viajar un par más. Quienes me acompañaron y cebaron mate mientras estudiaba para cada parcial y final dado. Quienes me acompañan con cariño y paciencia en tratamientos que a veces se tornan complicados. Quienes me llenan el corazón de fe y fuerza. Quienes me quieren, cuidan y apoyan de manera incondicional. Las que me enseñaron que el amor es lo que está por encima de todo. A las que les debo y dedico cada victoria, y abrazo en cada tristeza. Quisiera decirles gracias, pero es poco para todo lo que siento por ustedes. Les amo, pero no voy a gastar energía en tratar de cuantificarlo, porque es en vano.

Nonna, te extraño. Qué ganas de cebarte unos mates y escuchar cómo te quejás de lo lento que se seca la ropa.

A Julián. El chico más adorable, dulce, inteligente, compañero, amable, y la lista no tiene fin. Que fortuna la mía tenerete. Gracias por darme tu amor, y por recibir el mío. Gracias por cumplir sueños que ni sabía que teníamos. Gracias por enseñarme más sobre mí, por llenar de besos mis miedos y por permitirme estar en tu vida. Gracias por Cafú. Los amo, son mi familia.

A Yamil. Mi media naranja. Mi hermano del alma. Ya no me pregunto por qué nos entendemos y amamos tanto.

A Mai, Sol y Yam. Gracias por su amistad. Por el camino que recorrimos, y el que nos queda recorrer. Sigamos creciendo juntas. Si es con ustedes, no hay juego que no valga la pena ser jugado.

A Camila, Daiana, Eliana, Luciano y Nadia. Cuando pienso en ustedes, siento una alegría similar a la de tomar mate un sábado soleado en el balcón. Gracias por confiar en mí, por darme su hombro y por tratar de sacarme sonrisas, aun en los días más pesados.

Luciano, no tiene sentido todo el cariño y gratitud que siento por vos en tan poco tiempo. Además de mi DT, te volviste mi amigo.

A las chiruzas meteoamigas. Gracias por explicarme que el enso no era Fernández. Gracias por su cariño, pero sobre todo gracias por sus risas (acá claramente me refiero a Silvi). Son unas piruchas hermosas.

A Anthony, Juan, Julián y Leandro. Gracias por su paciencia y por su ayuda. Y por darme tranquilidad en momentos complicados.

Anthony, aunque sigas diciendo que no es para tanto, gracias por ser un director más para mí. Todavía me parece increíble como nos supimos salvar mutuamente en la pandemia. Tenerte de colega es un privilegio.

Al perri y al piro. Más leales e inteligentes no se consigue. Cada charla con ustedes fue y es una enseñanza llena de risas.

A Carolina, Lucía, Mariana, Micaela y Rocío. Simplemente gracias. Fueron, son y serán parte de mi. Mis amigas órgano.

A Pablo. Gracias por ser el amor después del amor.

A les batatas y mis otras amigues de la vida que podemos pasar 5 meses sin vernos, pero no más de 3 días sin mandarnos un meme.

A Anna y Esteban. Gracias por aceptar ser mis directores para la Carrera de Doctorado y por ser fuente de tanto conocimiento (no paro de sorprenderme de lo mucho que he aprendido). Realmente estoy muy agradecida. Gracias por todas las oportunidades que me brindan y siguen brindando. Por involucrarme en proyectos e iniciativas tan apasionantes para mí. Por confiar en mi criterio y respetar mis valores a la hora de hacer ciencia.

A Carla, Jan, Jhan-Carlo, Mercedes, Paola y Romina. Trabajar con ustedes fue y es continuo aprendizaje.

Romina, gracias por acompañarme con tanto cariño desde la tesis de licenciatura.

A Federico. Gracias por mostrarme y ser guía del tipo de ciencia que quiero hacer. Por ser un maestro tanto en lo académico como en lo humano. Por tu alegría. Por darme esperanzas de que no nos han vencido.

A la comunidad DCAO/CIMA por abrirme sus puertas con cariño. Por brindarme amigues y colegas maravillosos.

Al grupo ILLAPA. Gracias por brindarme las herramientas necesarias para llevar a cabo mi Carrera de Doctorado.

A la Universidad de Buenos Aires, la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, y al Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos. Gracias por el privilegio de hacer la Carrera de Doctorado en instituciones de alta calidad, reconocidas a nivel global.

A CONICET por otorgarme la beca para llevar adelante este trabajo.

A mi fe y a mi fuerza.

Índice general

| | |
|--|-------------|
| Resumen | i |
| Abstract | iii |
| Agradecimientos | v |
| Índice de figuras | xi |
| Índice de tablas | xvii |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Métodos y materiales | 7 |
| 2.1. Métodos | 7 |
| 2.1.1. Múltiples líneas de evidencia | 7 |
| 2.2. Fuentes de información | 9 |
| 2.2.1. Estimaciones y productos satelitales | 9 |
| 2.2.2. Modelos de superficie terrestre | 13 |
| 2.2.3. Información in situ y productos basados en la misma | 15 |
| 2.3. Región de estudio | 15 |
| 3. Complejidad de la superficie inundada: una visión más allá del espejo de agua | 19 |
| 3.1. Introducción | 20 |
| 3.2. Materiales y metodología | 23 |
| 3.2.1. Sitio de estudio | 23 |
| 3.2.2. Datos in situ e información multiespectral | 24 |
| 3.2.3. Detección de superficie de agua en las escenas | 24 |
| 3.3. Resultados y discusión | 29 |
| 3.4. Conclusiones | 33 |
| 4. Inundaciones en llanuras agrícolas estancadas desde arriba y desde abajo: perspectivas más allá del aumento de los extremos de precipitación | 35 |
| 4.1. Introducción | 36 |
| 4.2. Materiales y metodología | 37 |
| 4.2.1. Definición y caracterización del área de estudio | 37 |

| | |
|---|------------|
| 4.2.2. Información implementada: fuentes y procesamiento | 39 |
| 4.2.3. Evaluación de tendencias e identificación de puntos de cambio de series temporales | 41 |
| 4.3. Resultados y Discusión | 41 |
| 4.3.1. Aumento de las inundaciones en la región y su relación con el cambio en los regímenes de precipitación | 41 |
| 4.3.2. Transición hidrológica de la región: medir el cambio utilizando evidencia observacional disponible | 44 |
| 4.4. Conclusiones | 49 |
| 5. Efecto de la interacción entre reservorios de agua de llanuras agrícolas anegables en la humedad de sus suelos | 53 |
| 5.1. Introducción | 54 |
| 5.2. Materiales y metodología | 57 |
| 5.2.1. Sitio y periodo de estudio | 57 |
| 5.2.2. Fuentes de información de humedad de suelo | 57 |
| 5.2.3. Precipitación, NDVI y producto de ocurrencia de agua | 60 |
| 5.2.4. Tratamiento de datos de humedad del suelo: filtrado y cálculo de medias | 60 |
| 5.2.5. Tasas de humedecimiento y secado del suelo superficial | 63 |
| 5.3. Resultados | 64 |
| 5.3.1. Series temporales de humedad de suelo: múltiples fuentes de información benefician el entendimiento de las lagunas de datos . | 64 |
| 5.3.2. Comparación entre mediciones <i>in situ</i> y estimaciones satelitales: ¿qué nos dice una fuente de datos sobre la otra? | 67 |
| 5.4. Discusión | 73 |
| 5.5. Conclusiones | 78 |
| 6. Evaluación del modelo de superficie ORCHIDEE para la representación de la hidrología de llanuras agrícolas sujetas a cambios de uso y cobertura de suelo | 81 |
| 6.1. Introducción | 83 |
| 6.2. Materiales y metodología | 89 |
| 6.2.1. Forzantes atmosféricos | 89 |
| 6.2.2. Ciclo de vegetación | 92 |
| 6.2.3. Uso de suelo | 93 |
| 6.2.4. Experimentos realizados | 94 |
| 6.2.5. Resultados y discusión | 95 |
| 6.3. Reflexiones y perspectivas sobre las limitaciones del modelo ORCHIDEE, forzado por diferentes datasets atmosféricos y considerando el cambio de uso y cobertura del suelo ESA-LUH2 para reproducir la transición hidrológica del núcleo agroproductivo de la Pampas Argentinas . | 102 |
| 6.4. Conclusiones | 104 |
| 7. Conclusiones generales | 107 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 2.1. Mapa topográfico [m] de la región de estudio de esta tesis, y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. https://www.ign.gob.ar/ , consultado el 18 de junio de 2024). Se diferencian los polígonos de estudio que aborda cada uno de los capítulos. Como ciudad de referencia se marca Marcos Juárez, contenida en el sudeste de la Provincia de Córdoba. | 16 |
| 3.1. Mapa topográfico [m] del sitio de estudio (cuadrado rojo en el mapa regional); y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. https://www.ign.gob.ar/ , consultado el 18 de junio de 2024). La región se encuentra en la provincia de Córdoba, Argentina (punto rojo en el mapa de Sudamérica). | 23 |
| 3.2. Mapeo de los índices mNDWI y NDWI sobre el sitio de estudio, empleando escenas Landsat 8 del 7 de enero de 2020 (escena húmeda) y del 9 de enero de 2021 (escena seca). (a): mNDWI, escena húmeda. (b): mNDWI, escena seca. (c): NDWI, escena húmeda. (d): NDWI, escena seca. | 26 |
| 3.3. Diagrama de dispersión de los píxeles de las 18 imágenes analizadas en este estudio, acorde a sus valores de mNDWI y NDWI. Los colores identifican a qué clúster pertenece cada píxel, según el método de clasificación no supervisada <i>K-Means</i> y su posterior agrupamiento: clúster A, clúster B y clúster C. Además, se representan los límites inferiores de los umbrales correspondientes a las categorías <i>Open Water</i> (línea sólida) y <i>Mixed-Water</i> (línea de puntos). | 28 |
| 3.4. Serie temporal de (a): precipitación correspondiente a una ventana de suma móvil de 5 días [$\text{mm}^1\text{día}^{-1}$], es decir, el valor de un cierto día es la suma de la precipitación diaria de ese día sumada a la correspondiente de los 4 días anteriores (precipitación acumulada). (b): altura diaria del nivel freático en referencia al nivel del terreno [cm]. Los datos diarios de precipitación y altura del nivel freático se refieren a mediciones <i>in situ</i> en Justiniano Posse (INTA Justiniano Posse). (c): número de píxeles clasificados como <i>Open Water</i> y <i>Mixed-Water</i> , de acuerdo con los umbrales en la Tabla 3.2. Algunas de las magnitudes se muestran junto con la fecha de la escena correspondiente. | 30 |

| | |
|--|----|
| 3.5. Mapeo de las categorías de <i>Open Water</i> (OW), <i>Mixed-Water</i> (MW) y <i>Non-Water</i> (NW) sobre la zona de estudio, basado en las escenas de Landsat 8 del 7 de enero de 2020 (escena húmeda), en el panel (a) y del 9 de enero de 2021 (escena seca), en el panel (b). Los píxeles fueron etiquetados de acuerdo a los umbrales establecidos en la Tabla 3.2. En los paneles (c) y (d) se muestra el producto <i>Water Seasonality</i> para el año 2020 y 2021, respectivamente (Fuente: EC JRC/Google) sobre la misma región. La escala de colores diferencia los cuerpos de agua identificados como permanentes de los de ocurrencia estacional, para la cual los datos fueron escalados de 1 mes a 12 meses para cada año, y el valor 0 representa una contribución nula del producto <i>Water Seasonality</i> | 32 |
| 4.1. Mapa topográfico [m] de la región de estudio de este capítulo, y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. https://www.ign.gob.ar/ , consultado el 18 de junio de 2024). | 38 |
| 4.2. Series temporales de (a) la precipitación anual acumulada de Marcos Juárez, así como de la frecuencia e intensidad anual de la precipitación diaria. La intensidad se calculó tomando el cuantil diario de 0.9 sobre cada año. La frecuencia corresponde al número de días por año con precipitación por encima de los $10 \text{ mm}^1 \text{día}^{-1}$. También, series temporales de (b) área inundada anual de la región de estudio, (c) máximo y mínimo anual de área inundada, y (d) nivel freático anual de Marcos Juárez. Se muestra la tendencia y pendiente según el test de Mann-Kendall Theil-Sen para cada una de estas variables. | 43 |
| 4.3. Series temporales de los valores anuales de área inundada, profundidad del nivel freático y anomalía de la precipitación. El año del punto de cambio identificado en las series de área inundada y nivel freático, según el test de Pettitt, se resalta en naranja. | 44 |
| 4.4. Valores mensuales de área inundada en función de los valores mensuales de profundidad del nivel freático. En (a) la barra de color representa la anomalía de precipitación mensual, en (b) el morado indica el periodo pre-2001 y el amarillo el post-2001. | 46 |
| 4.5. Ciclos anuales de área inundada, profundidad de nivel freático, almacenamiento de agua terrestre y precipitación. El periodo correspondiente es 1986-2020, excepto para el almacenamiento de agua terrestre que corresponde al periodo 2002-2020. | 47 |
| 4.6. Representación esquemática de la asociación entre precipitación acumulada, área inundada y nivel freático en los periodos previo y posterior al 2001. Del periodo pre-2001 al post-2001 las correlaciones entre el nivel freático y el área inundada, y las correlaciones entre la precipitación acumulada de noviembre a marzo y el área inundada de abril, mayo, junio y julio, se han hecho más fuertes (flechas más gruesas). Además, en el periodo post-2001, a diferencia del pre-2001, existe una correlación significativa entre la precipitación acumulada y el nivel freático. | 50 |

| | |
|---|----|
| 5.1. (a) Mapa topográfico [m] del dominio de estudio y distribución de las fuentes de información: sitios in situ (14), píxeles SMOS (4) y píxel SMAP (1). (b) Ciclo anual de precipitación en el período 2015-2019. También se muestran los valores medios, máximos y mínimos mensuales de NDVI del período 2015-2019. | 58 |
| 5.2. Ubicación de algunos de los sitios in situ que se incluyeron en el estudio (Google Earth, 2022). | 59 |
| 5.3. Series temporales diarias in situ de θ [$m^3 m^{-3}$]. Los valores se corresponden a registros los registros de las 7 AM. | 61 |
| 5.4. Series temporales diarias de θ [$m^3 m^{-3}$] de las tres fuentes de información analizadas tras calcular la media de los sitios in situ/píxeles, como se describe en la Sección 5.2.4. El panel (a) presenta las series temporales en el formato usual. El panel (b) presenta las series temporales de forma tal de facilitar la identificación de lagunas en los registros de datos. En ambos paneles, la etiqueta TRMM10 indica la presencia de precipitaciones superiores a $10 \text{ mm}^1 \text{día}^{-1}$ | 65 |
| 5.5. Diagrama de dispersión entre los datos in situ y las estimaciones satelitales θ [$m^3 m^{-3}$]. Se marca la línea de identidad 1:1. Paneles (a), y (d) refieren al periodo completo. Paneles (b) y (e) a la temporada de barbecho, (c) y (f) a la temporada de cultivo activo. De arriba a abajo: SMOS y SMAP. Cada diagrama de dispersión incluye el número de muestras (N) y el correspondiente coeficiente de correlación de Pearson (R) para $p\text{-value} < 0.01$ | 68 |
| 5.6. Distribución de densidad de θ [$m^3 m^{-3}$] de las fuentes de información analizadas. Panel (a) refiere a la temporada de barbecho, el (b) a la temporada de cultivo activo. | 69 |
| 5.7. Mapas de calor de la tasa $d\theta/dt$ [$m^3 m^{-3} \text{día}^{-1}$] en función de θ [$m^3 m^{-3}$] de las mediciones in situ, y de las estimaciones SMOS y SMAP. La barra de color indica el número de muestras en escala logarítmica, incluidas en un área de $0.01 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{día}^{-1} \times 0.01 \text{ m}^3 \text{m}^{-3}$. Los paneles (a), (d) y (g) refieren al período completo; (b), (e) y (h) a la temporada de barbecho; y (c), (f) e (i) a la temporada de cultivo activo. | 72 |
| 5.8. Mapeo del producto <i>Water Occurrence</i> en la región de estudio en el periodo abril 2015-noviembre 2019 (fuente: EC JRC/Google). Este conjunto de datos proporciona información sobre la frecuencia de presencia de aguas abiertas [%] a través del cálculo de las observaciones disponibles e identificadas como agua a lo largo del período de interés. También se muestra la distribución de los sitios in situ, y los píxeles SMOS y SMAP. | 76 |

| | |
|--|----|
| 5.9. Representación esquemática de las características y mecanismos del sitio de estudio que son discernibles por los dispositivos <i>in situ</i> y los sistemas satelitales. En el caso de la red <i>in situ</i> , los dispositivos se encuentran instalados cercanos a residencias, que suelen estar situadas a elevaciones relativamente más altas, menos afectadas por los efectos capilares del nivel freático y, por tanto, menos propensas al encharcamiento, respecto a las áreas dedicadas a cultivo. Además, los dispositivos <i>in situ</i> están expuestos a una dinámica de la vegetación más uniforme a lo largo del año, a diferencia de los sistemas satelitales, que experimentan la transición entre las temporadas de barbecho y de crecimiento activo de los cultivos. | 77 |
| 6.1. Profundidad media del nivel freático en tierras de cultivo, bosques secos nativos o plantaciones de eucaliptos y praderas nativas o pasturas de alfalfa en las llanuras centrales de Sudamérica. Figura basada del estudio de Houspanossian y otros, 2023. | 84 |
| 6.2. En el panel superior se muestra la cuenca de Cruz Alta según el modelo de superficie ORCHIDEE. El panel medio es un acercamiento a dicha cuenca, y se corresponde a un mapa topográfico [m] de la región de la cuenca Cruz Alta –aproximación en línea punteada– junto a la red de aguas permanentes de la región (fuente: IGN-Instituto Geográfico Nacional de Argentina). En el panel inferior se muestra en detalle la localización de los sitios relevantes para este capítulo. En Marcos Juárez y Pueblo Andino, donde se cuenta con datos observacionales de nivel freático y descarga, respectivamente, se expone el signo de las tendencias ($p\text{-value} < 0.01$) en el periodo de estudio de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen | 85 |
| 6.3. Esquema que muestra el sistema de flujo de agua subterránea y su aporte a la descarga de río. A escala local, la entrada de aguas subterráneas a la descarga de ríos se produce al nivel de la napa freática. Las vías de flujo cortas y poco profundas se originan en la napa freática cercana al río. A medida que aumenta la distancia al río, las vías de flujo hacia el mismo son más largas y profundas. Figura tomada de Alley y otros (1999). | 86 |
| 6.4. Precipitación, velocidad del viento y radiación solar incidente de la cuenca Cruz Alta de los ocho forzantes examinados para la selección del subconjunto a emplear en este estudio para realizar las simulaciones. Se grafican en su periodo común de disponibilidad. Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia (en las unidades que corresponda) y significancia de cada variable de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen. | 91 |
| 6.5. Ciclo anual del LAI <i>default</i> de la cuenca de Cruz Alta, junto al LAI resultante de adaptar el <i>default</i> a la región por medio del ciclo anual de NDVI correspondiente, también mostrado en la figura. | 93 |

| | |
|---|-----|
| 6.6. Fracción anual máxima de cultivo y pastura de la cuenca Cruz Alta según la base ESA-LUH2 que emplea ORCHIDEE para sus simulaciones. El tipo de vegetación cultivo está dado por la suma de las PFTs C3-agricultura y C4-agricultura, mientras que el tipo pastura está dado por la suma de las PFTs C3-pastura y C4-pastura | 94 |
| 6.7. Partición de la evapotranspiración de la cuenca Cruz Alta durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes empleados la evapotranspiración, la transpiración, la evaporación del suelo desnudo y la intercepción, simuladas utilizando el LAI <i>default</i> . Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia de cada componente [$\text{mm}^1\text{año}^{-1}$] y significancia asociada de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen. | 97 |
| 6.8. Partición de la evapotranspiración de la cuenca Cruz Alta durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes empleados la evapotranspiración, la transpiración, la evaporación del suelo desnudo y la intercepción, simuladas utilizando el LAI adaptado a la región. Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia de cada componente [$\text{mm}^1\text{año}^{-1}$] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen. | 98 |
| 6.9. Descarga de la cuenca Cruz Alta en su punto de cierre durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes las salidas simuladas utilizando el LAI <i>default</i> . Por cada forzante, se expone la pendiente de la tendencia de descarga [m^1s^{-1}] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen. | 99 |
| 6.10. Descarga de la cuenca de Cruz Alta en su punto de cierre durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes las salidas simuladas utilizando el LAI adaptado a la región. Por cada forzante, se expone la pendiente de la tendencia de descarga [m^1s^{-1}] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen. | 99 |
| 6.11. Resumen de los experimentos realizados comparando las simulaciones que emplean la fracción vegetación de 1950 para todo el periodo de estudio y las que emplean la de 2016. Se muestran las componentes de la evapotranspiración de las simulaciones 1950 y de 2016 para los tres forzantes. Se expone por cada experimento y componente la diferencia de los promedios de 1950 y de 2016, cuyo valor se compara con dos desviaciones estándar con el fin de evaluar si las simulaciones 1950 y 2016 son distinguibles entre si para un intervalo de confianza del 95 %. Aquellas diferencias que cumplan con esto último son señaladas en negrita y resaltado naranja. | 101 |
| 6.12. Registro a largo plazo de uso y cobertura de la tierra, que indica el cambio de vegetación perenne a cultivos anuales. Gráfico tomado del estudio de Pal y otros (2021), el cual se realizó con datos suministrados por INTA Marcos Juárez. | 103 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Especificaciones de las bandas espectrales de la misión Landsat 8 - sensor OLI. | 11 |
| 3.1. Especificaciones y fechas de las escenas empleadas. | 25 |
| 3.2. Umbrales de los índices mNDWI y NDWI identificar píxeles correspondientes a las categorías de <i>Open Water</i> y <i>Mixed-Water</i> | 28 |
| 4.1. Mínimo y máximo mensual de profundidad de nivel freático y de área inundada de los periodos 1986-2001 y 2002-2020. En el caso de la profundidad de nivel freático, el mínimo (máximo) se refiere al valor más superficial (más profundo) alcanzado durante todo el periodo pre- y post-2001. | 45 |
| 4.2. Correlación de Spearman de forma retardada (“laggeada”) en los periodos 1986-2001 y 2002-2020, entre las anomalías mensuales de los reservorios de agua enumerados. El <i>lag</i> (retardo) temporal fue de 0 meses (sin retardo) a 11 meses. Las correlaciones significativas con <i>p-value</i> < 0.01 están marcadas en negrita. En el caso de las correlaciones que incluyen el almacenamiento de agua terrestre, éstas se calculan sobre el periodo posterior a 2001 debido a la disponibilidad de estos datos. | 48 |
| 4.3. Correlación de Spearman en los periodos 1986-2001 y 2002-2020 entre la precipitación acumulada de noviembre a marzo y los reservorios de agua de abril, mayo, junio y julio. Las correlaciones significativas de <i>p-value</i> < 0.01 están marcadas en negrita. En el caso de las correlaciones que incluyen el almacenamiento de agua terrestre, estas se calculan para el periodo post-2001 debido a la disponibilidad de sus datos. | 48 |
| 5.1. Resumen de la disponibilidad de datos del periodo de estudio por fuente de información. | 62 |
| 5.2. Resumen de las modas y valores máximos de las PDFs de θ [$m^3 m^{-3}$] de las temporadas de barbecho y de cultivo activo (Figura 5.6). | 71 |
| 6.1. Forzantes atmosféricos evaluados para la selección del subconjunto que se utilizaría para realizar las simulaciones analizadas en este capítulo. | 90 |
| 6.2. Valores de los parámetros SENESCENCE_TYPE [-], PHENO_GDD_CRIT_C [-], GDD_SENESCENCE [días] y LEAFFALL [días] del modelo ORCHIDEE para la implementación del LAI del modelo <i>default</i> y del adaptado según el NDVI de la región de interés. | 93 |

Capítulo 1

Introducción

Según la Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina (FADA, 2021), las cadenas agroindustriales del país produjeron un total de 25,650 millones de dólares en exportaciones sólo en el primer semestre de 2021. Así, este sector económico representa siete de cada diez dólares de exportación que recibe la Argentina. La Llanura Pampeana de Argentina es uno de los mayores cinturones cerealeros del mundo y el núcleo de la producción agroindustrial del país. Es la región que más soja y maíz produce en Argentina, consolidando su posición como primer exportador mundial de harina y aceite de soja, tercer exportador mundial de soja y primer exportador mundial de maíz en 2020. Por lo tanto, la economía y el comercio del país con el resto del mundo dependen en gran medida de la producción agrícola de esta región. La agricultura argentina ha pasado por varios puntos de inflexión importantes. En 1962 el país exportó por primera vez soja (Martínez Alvarez, 2012), uno de los cultivos que había liderado en años anteriores la sustitución de la vegetación nativa perenne, otros cultivos y la ganadería. A mediados de la década de 1990, el efecto del aumento del precio de la tierra fue tal que muchos productores buscaron nuevos terrenos, y con ello se produjo una nueva expansión de la soja (Reboratti, 2010). Esta sustitución de la vegetación perenne –nativa o cultivada– de raíces profundas –por ejemplo, pastos o árboles– por cultivos anuales de raíces superficiales –por ejemplo, la soja– es responsable del ascenso del nivel freático y el incremento de las inundaciones de la región, según varios estudios de campo y basados en simulaciones (Amdan y otros, 2013; Nosetto y otros, 2013, 2015; Giménez y otros, 2016; Pal y otros, 2021; Houspanossian y otros, 2023).

Las inundaciones y anegamientos en la región pampeana afectan directamente a

la economía argentina, no sólo por los motivos mencionados sino también porque la región proporciona trabajo y sustento a cientos de miles de personas. El análisis de estos eventos hidrológicos extremos en ambientes agrícolas es de crucial relevancia (Whitworth-Hulse y otros, 2023), considerando la creciente demanda de productos agroindustriales, principalmente alimentos. Se espera que dicha demanda aumente debido al crecimiento demográfico previsto, lo que incrementará las superficies agrícolas (McKenzie y Williams, 2015; Potapov y otros, 2022).

Las Pampas Argentinas son una región agrícola subhúmeda plana caracterizada por un material parental de suelos altamente homogéneo (Zárate, 2003) con un uso de la tierra similar (Baldi y Paruelo, 2008), y parcelas agrícolas de secano a gran escala, con ausencia casi total de sistemas de riego y drenaje artificial. La fenología de los cultivos en la región se ha ajustado a las estaciones en que los recursos están disponibles y las condiciones ambientales son más favorables, una de las principales estrategias para estabilizar los rendimientos en diferentes ambientes productivos. Así, el ciclo de los cultivos se han sincronizado con la estacionalidad de las precipitaciones, alcanzando el consumo máximo de agua durante los veranos, y en el caso de los inviernos con la mayor parte de las parcelas en barbecho (Lawn e Imrie, 1994; Pascale y Damario, 2004; Jobbág y otros, 2021).

Esta tesis se enfoca en el sudeste de Córdoba, localizada en la parte central de las Llanuras Pampeanas. Al ser parte parte del núcleo agroproductivo de Argentina, su suelo franco limoso se utiliza principalmente para la agricultura de secano (IDECOR, 2018, 2023a), y su cobertura vegetal está compuesta casi exclusivamente por cultivos anuales, con predominio de soja y en segundo lugar maíz y, en menor medida, trigo de cultivo invernal (IDECOR, 2023b). Esta región llana presenta una baja densidad de ríos. Además, a lo largo de las décadas, el nivel freático de este paisaje ha experimentado un notable ascenso, pasando de más de 10 m por debajo de la superficie en la década de 1960, a encontrarse próxima a la misma (< 1-4 m) actualmente (Bollatti y otros, 2017; Alsina y otros, 2020; Whitworth-Hulse y otros, 2023). En el caso de este trabajo, nivel freático refiere a la parte superior de la zona saturada de la matriz porosa –i.e., el suelo–, definición dada por Fetter (1994).

Las napas freáticas poco profundas son fundamentales para controlar los procesos

hidrológicos del suelo, y en las llanuras sedimentarias sus efectos no se limitan a las zonas ribereñas o a las tierras bajas, sino que afectan a zonas más extensas (Ferone y Devito, 2004; Wang y otros, 2009; Pirastru y Niedda, 2013; Jobbág y otros, 2021). Los cambios en el contenido de agua de la superficie se debe principalmente a las precipitaciones infiltradas –entrada de agua al suelo de manera descendente– y la evapotranspiración, pero las napas freáticas poco profundas también añaden contenido de agua al suelo superficial por mecanismos de capilaridad ascendente (Pirastru y Niedda, 2013). Esta interacción puede mantener los suelos húmedos durante varios meses (Kuppel y otros, 2015), favoreciendo la saturación de la superficie del suelo. Así pues, la región de estudio es un “laboratorio natural” ideal para examinar rangos de amplia variabilidad de contenido de agua del suelo superficial y sub-superficial, en este contexto de interacciones complejas debido a la acción simultánea de precipitaciones, napa freática, percolación –movimiento del agua dentro del suelo– y evapotranspiración.

Motivación y objetivos

Las llanuras agrícolas de las Pampas Argentinas son una de las principales fuentes de sustento económico del sur de Sudamérica. El sudeste de Córdoba, zona contenida en las Pampas, es parte del núcleo agroproductivo del país. En esta zona llana y subhúmeda, el ciclo regional del agua está dominado por el transporte vertical del agua debido a sus escasas pendientes y a la ausencia de redes fluviales importantes. La región sufre inundaciones y anegamientos provocados por procesos locales, como escasa infiltración y el ascenso del nivel freático. Estos fenómenos hidrológicos extremos afectan a las comunidades y economías locales al dañar los cultivos e infraestructuras, incluidos pueblos y ciudades. Desde 1960, la región ha experimentado un notable ascenso del nivel freático como consecuencia de la intensificación de la sustitución de la vegetación perenne -dominada por pastos- por cultivos anuales, lo que ha contribuido a que las inundaciones y los anegamientos sean más frecuentes y graves. Por lo tanto, es necesario enriquecer el conocimiento sobre los mecanismos implicados en el desencadenamiento y la persistencia del agua en superficie en las llanuras agrícolas de napas poco profundas.

En el Capítulo 8 del Informe de Evaluación 6 (*Assessment Report 6*, AR6) –que eva-

lúa los cambios en el ciclo del agua– el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) afirma que las inundaciones y los anegamientos desempeñan un papel fundamental como respuestas naturales del ciclo del agua. Sin embargo, su ocurrencia da lugar a potenciales peligros para la vida y la seguridad humana, perturba las actividades antropogénicas e inflige daños a infraestructuras vitales. La manifestación predominante de las inundaciones no costeras se produce cuando los ríos superan la capacidad de sus orillas –inundaciones fluviales– o cuando zonas localizadas experimentan el impacto acumulativo de precipitaciones intensas, provocando su desbordamiento –inundaciones pluviales–. En el Capítulo 12 (Ranasinghe y otros, 2021) solo se enumeran a las inundaciones fluviales, pluviales y costeras como las principales categorías de generadores de impacto climático –*climatic impact-drivers*, definidos como condiciones físicas del sistema climático que afectan a un elemento de la sociedad o los ecosistemas–. Así, el IPCC no aborda el tipo de inundaciones que sufre el núcleo agroproductivo de Argentina, en el cual la napa freática juega un papel central. Esta tesis tiene entonces como objetivo avanzar en la descripción y entendimiento de la dinámica del agua en superficie de llanuras agrícolas propensas a inundarse y que presentan napa freática poco profunda, tomando como laboratorio natural que cumple con dichas condiciones el sudeste de Córdoba.

Los análisis y resultados de esta tesis, por consecuencia, son útiles y provechosos para regiones sedimentarias planas con sistemas hidrológicos estancados y aguas subterráneas poco profundas (Fan y otros, 2013), especialmente en los casos en los que la agricultura es la cubierta vegetal dominante. Estas son las condiciones encontradas en algunos de los principales cinturones cerealistas mundiales, como las Grandes Llanuras de América del Norte (Rizzo y otros, 2018) y las Llanuras del Norte en China (Wang y otros, 2015; Li y otros, 2024). Estas últimas son comparables a la zona de interés debido a la combinación de características que la definen, por lo que el interés del conocimiento aquí generado no se limita a las llanuras agrícolas de Argentina.

Para alcanzar el objetivo general de esta tesis, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- I. Generar una herramienta adaptada a las condiciones de la región de estudio para

analizar a escala local las características y elementos que intervienen en el agua superficial, ya que la base de los registros históricos de agua superficial que se utiliza en esta tesis es de escala global (Capítulo 3).

- II. Caracterizar las relaciones entre reservorios de agua, entre ellos el agua en superficie, y diferentes índices de precipitación –e.g., extremos y acumulados– (Capítulo 4).
- III. Estudiar cómo diversas fuentes de información de humedad de suelo captan los mecanismos de entrada y salida de agua del suelo y el agua en superficie durante las diferentes temporadas agrícolas que caracterizan la región. (Capítulo 5).
- IV. Evaluar el modelo de superficie ORCHIDEE en la representación de la hidrología de llanuras agrícolas sujetas a cambios de uso y cobertura de suelo (Capítulo 6). Este objetivo se propone en el marco de que los modelos de superficie terrestre son herramientas fundamentales en la investigación climática y ambiental, que permiten simular y entender los procesos que ocurren en la superficie terrestre, como la interacción entre la atmósfera, la hidrología, la vegetación y el suelo. Además, son utilizados como componentes clave en los modelos del sistema terrestre.
- V. Analizar y exponer, a lo largo de toda esta tesis, la coherencia hidrológica de productos que se basan en diferentes paradigmas con el fin de mostrar la importancia del uso de múltiples líneas de evidencia.

Capítulo 2

Métodos y materiales

En este capítulo se explica el concepto de “múltiples líneas de evidencia” como método común a todos los análisis realizados en el marco de esta tesis. Además se presentan las fuentes de información y una caracterización de la región que contiene a las áreas de estudio aquí consideradas. Particularidades relevantes sobre los sitios de estudio y de las bases de datos empleadas, como así también de las metodologías aplicadas para cada análisis, se abordan en sus correspondientes capítulos.

2.1. Métodos

2.1.1. Múltiples líneas de evidencia

En las investigaciones sobre clima se cuenta, en general, con dos enfoques metodológicos en cuanto al uso de la información. Por un lado, un enfoque reduccionista, que se centra en analizar una o pocas fuentes de información, buscando profundidad y precisión en un único frente de conocimiento. Por otro, un enfoque de integración que privilegia el cruce de información proveniente de diversas fuentes, que pueden variar en origen, escala, y precisión (Baldissera Pacchetti y otros, 2024). En esta tesis se aplica el segundo enfoque mencionado.

El empleo de varias fuentes de información y la aplicación de diversas metodologías puede dar lugar a resultados diferentes para un mismo problema, por lo tanto es

importante tomar conciencia de las elecciones que hacemos como científicos, y que las mismas se ven afectadas por nuestros valores y contexto. La relación entre los valores y el contexto de los científicos, y las fuentes de información y las metodologías que empleamos para resolver un problema particular ha sido señalada como un punto relevante por el Grupo de Trabajo I del IPCC (Doblas-Reyes y otros, 2021). Los valores desempeñan un papel integral en todos los aspectos del proceso científico, desde la formulación de problemas e interrogantes de investigación hasta la exploración de la información, así como la comunicación y traducción de resultados (Pulkkinen y otros, 2022).

Ser conscientes de cómo los valores inciden en las decisiones a lo largo de una investigación radica en la capacidad para gestionar la forma en que suposiciones no declaradas podrían generar barreras para el entendimiento, aceptación y uso del conocimiento (Morrison, 2023). La influencia de los valores no tiene por qué ser una fuente de sesgo o distorsión, a veces es apropiada y beneficiosa. El análisis crítico desde una diversa gama de perspectivas de valores puede descubrir y cuestionar sesgos y omisiones en la información que, de otro modo, pasarían desapercibidos (Longino, 2004).

Para tomar decisiones y dar respuestas, es importante tener en cuenta todos los resultados físicamente plausibles basados en múltiples líneas de evidencia, sobre todo cuando pueden ser contrastados. Cuando se utilizan bases de datos, es posible que estas carezcan de metadata con una explicación transparente y fácilmente comprensible de los supuestos subyacentes, así como de sus puntos fuertes y limitaciones (Barsugli y otros, 2013; Hewitson y otros, 2017). Con frecuencia, la selección de las fuentes de información no es determinada por lo que es más relevante e informativo para la pregunta en cuestión, sino más bien por restricciones prácticas como la accesibilidad y la facilidad de uso. Otros limitantes son la flexibilidad cultural o institucional, la capacidad técnica y los conocimientos de los distintos agentes que participan, así como las escalas espaciales y temporales que pueden variar con la región de interés, su tamaño y el ámbito al que se aplicará. Otro punto a considerar es la disponibilidad (o no) de la información: observaciones in situ, estimaciones satelitales, simulaciones de modelos, bibliografía y de expertos regionales pertinentes a la problemática en cuestión. En el Sur Global esto es un punto no menor, ya que que la disponibilidad de alguna o

del total de estas fuentes es aún más limitado (Dinku y otros, 2014). En particular, en Latinoamérica los registros prolongados de observaciones *in situ* son escasos y los recursos para generar y almacenar nuevos sets de datos no abundan (Cavazos y otros, 2024). Lo expuesto puede derivar a que, en casos extremos, se cuente con solo una fuente de información (Rössler y otros, 2019). Por lo tanto, el contexto en si mismo impone restricciones a la forma en que podemos construir y alinear el conocimiento respecto a su aplicación prevista.

Así, un elemento clave de la construcción del conocimiento es la exploración y conciliación de diferentes fuentes de información (Barsugli y otros, 2013; Field y Barros, 2014; Maraun y Widmann, 2018), lo cual implica principalmente dos cuestiones: la evaluación de la idoneidad de distintas fuentes y la integración de las mismas a la hora de abordar un determinado problema, teniendo en cuenta que estos procesos están condicionados por las fuentes disponibles, los agentes implicados, sus valores y contexto (Doblas-Reyes y otros, 2021).

2.2. Fuentes de información

2.2.1. Estimaciones y productos satelitales

Landsat

A principios de la década de los 70, la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y junto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) lanzaron el primer satélite del programa Landsat. Este programa de alcance global brinda escenas del tipo óptico, es decir, brinda información acerca de la reflectancia espectral de la cobertura terrestre. Los distintos tipos de elementos que constituyen dicha cobertura divergen en determinadas longitudes de onda, esto es, presentan características espectrales intrínsecas. Por ello, las imágenes Landsat son ampliamente usadas por usuarios con diferentes objetivos, pero con el interés común de reconocer elementos a partir de su información espectral. Por ejemplo, los hidrólogos las utilizan para identificar cuerpos de agua y seguir los cambios que sufren, las instituciones agroproductivas para

analizar la salud de cultivos y servicios de emergencia para detectar zonas alcanzadas por el fuego. Las misiones Landsat proporcionan una variedad de imágenes satelitales limitadas a diferentes períodos temporales y resoluciones espaciales. Las misiones históricas varían desde la misión Landsat 1 hasta la misión Landsat 9, la última en lanzarse. En la actualidad, tres siguen recogiendo observaciones globales desde el espacio: los satélites Landsat 7, 8 y 9 (<https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/landsat-cumple-medio-siglo-observando-la-tierra-desde-el-espacio/>, consultado el 18 de junio de 2024).

En el marco de esta tesis fueron utilizadas escenas de la etapa 8 del programa. El satélite de esta etapa, lanzado en febrero de 2013, se corresponde al sensor OLI, que recopila imágenes correspondientes a nueve bandas espectrales. El sensor proporciona escenas cada 16 días con una resolución espacial de 30 m (bandas visibles, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta) y 15 m (banda pancromática), como se detalla en la Tabla 2.1. Las escenas aquí utilizadas corresponden al producto de *Level 2 Surface Reflectance*, derivado del producto *Level 1 Top of Atmosphere Reflectance* que ha sido corregido considerando los efectos de las variaciones temporales, espaciales y espectrales de la dispersión y absorción de los gases atmosféricos, los aerosoles y el vapor de agua (Vermote y otros, 2016). Dentro de este nivel de procesamiento, el USGS recomienda utilizar información de la *Collection 2* (<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>, consultado el 18 de junio de 2024).

Global Surface Water

El producto global *Global Surface Water* brinda mapas con diferente información acerca del agua en superficie, los cuales son proporcionados por la Comisión Europea (EC, *European Commission*) del Centro Común de Investigación (JRC, *Joint Research Centre*). Estos mapas contienen la ubicación espacial y la distribución temporal del agua en superficie de aproximadamente 40 años, y proporcionan estadísticas sobre la extensión y el cambio de la misma. Este conjunto de productos es elaborado a partir de la informaciónpectral de escenas Landsat (Pekel y otros, 2016), y presentan una resolución espacial de 30 m. La resolución temporal varía según el producto. Cada

| Satélite | Nombre de Banda | Longitud de onda [μm] | Resolución espacial [m] |
|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| Landsat 8 sensor OLI | 1 - Aerosol costero | 0.43-0.45 | 30 |
| | 2 - Azul | 0.45-0.51 | 30 |
| | 3 - Verde | 0.53-0.59 | 30 |
| | 4 - Rojo | 0.64-0.67 | 30 |
| | 5 - Infrarrojo cercano | 0.85-0.88 | 30 |
| | 6 - Infrarrojo de onda corta 1 | 1.57-1.65 | 30 |
| | 7 - Infrarrojo de onda corta 2 | 2.11-2.29 | 30 |
| | 8 - Pancromática | 0.50-0.68 | 15 |
| | 9 - Cirrus | 1.36-1.38 | 30 |

Tabla 2.1: Especificaciones de las bandas espectrales de la misión Landsat 8 - sensor OLI.

capítulo de esta tesis que lo requiera, aclarará qué producto de esta base empleó, junto a sus características relevantes. Los productos de la fuente *Global Surface Water* están disponibles en la plataforma *Google Earth Engine* (<https://global-surface-water.appspot.com/map>, consultado el 18 de junio de 2024).

Producto NDVI de MODIS

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*,) aquí utilizado es un producto generado a partir de la información espectral de la superficie terrestre que brinda la misión global MODIS. El grupo *Global Inventory Monitoring and Modeling Studies* de la NASA/Goddard Space Flight Center compone escenas MODIS, produciendo y archivando mapas de NDVI de 8 días con 250 m de resolución espacial. Los datos de series temporales de NDVI de MODIS están disponibles en la plataforma *Global Agricultural Monitoring* (*US Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. Global Agricultural Monitoring*: <https://glam1.gsfc.nasa.gov/>, consultado el 18 de junio de 2024).

SMAP

En esta tesis también se emplearon datos de humedad del suelo superficial de la misión *Soil Moisture Active Passive* (SMAP). El satélite que proporciona estas estimaciones a escala global fue lanzado por la NASA en enero de 2015 (Entekhabi y otros,

2014). La misión cuenta con tiempo de revisita de 3 días y un radiómetro de aproximadamente 40 km. Se utilizó el producto SMAP *Level 3 Radiometer v.6* de retícula *Equal-Area Scalable Earth (EASE) v.2* de 36 km (O'Neill y otros, 2019).

SMOS

Se utilizaron estimaciones satelitales de humedad del suelo superficial de la misión global *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS, Kerr y otros, 2010), lanzado en noviembre de 2009 por la Agencia Espacial Europea. El satélite de la misión SMOS posee un radiómetro que proporciona adquisiciones globales con una resolución espacial de aproximadamente 40 km y un tiempo de revisita de aproximadamente 3 días. Se empleó el producto SMOS Level 3 v.3, que tiene una retícula EASE v.2 de 25 km (Pablos y otros, 2019) y es distribuido por el *Barcelona Expert Center* (<https://cp34-bec.cmima.csic.es/>, consultado el 18 de junio de 2024).

GRACE

La misión *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) es un proyecto conjunto de la NASA y la Agencia Espacial Alemana. GRACE tiene como fin generar estimaciones de los cambios del campo gravitatorio terrestre, que tiene aplicaciones como el estudio de las variaciones del almacenamiento de agua sobre los continentes. La misión fue lanzada en marzo de 2002 y terminó en octubre de 2017. En mayo de 2018 se lanzó el sistema satelital de la misión GRACE *Follow-on* (-FO), sucesora de la misión GRACE. Datos del contenido de agua terrestre de las misiones GRACE y GRACE-FO (Tapley y otros, 2004; Landerer y Swenson, 2012; Landerer y otros, 2020), se encuentran disponibles en la herramienta de análisis de datos GRACE creada por la NASA/JPL, (<https://grace.jpl.nasa.gov/data-analysis-tool>, consultado el 18 de junio de 2024). La información tiene una resolución aproximadamente mensual y es interpolada a una cuadrícula de $1^\circ \times 1^\circ$ latitud por longitud.

TRMM

Una de las fuentes de precipitación empleadas es la provista por el programa multisatélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). De esta base, se empleó un

producto global de precipitación acumulada diaria que se genera a partir de TRMM 3B42 TMPA v.7 de resolución espacial de aproximadamente 25 km y resolución temporal de 3 horas (Huffman y otros, 2007). Es elaborado y proporcionado por el *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* de la NASA (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B42_Daily_7/summary, consultado el 18 de junio de 2024) como producto de valor añadido.

IMERG

En esta tesis también se emplearon datos de precipitación estimada por el algoritmo *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* de la NASA, el cual combina información de la misión *Global Precipitation Measurement* (GPM; Huffman y otros, 2020). GPM se puso en marcha en 2014 como continuación del producto TRMM, que estuvo activo entre 1997 y 2015. En cuanto a la base de datasets IMERG, esta presenta resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ latitud por longitud y resolución temporal de media hora. Los productos de este programa son proporcionados por el *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/technology/giovanni>, consultado el 18 de junio de 2024).

2.2.2. Modelos de superficie terrestre

ORCHIDEE

En esta tesis se emplea el modelo de superficie *Organising Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems* (ORCHIDEE), el cual es la componente de superficie terrestre del modelo global atmosférico del Instituto Pierre-Simon Laplace (de Rosnay y Polcher, 1998; Krinner y otros, 2005).

ORCHIDEE está compuesto por tres esquemas principales: (1) SECHIBA, que calcula los procesos físicos de la superficie terrestre entre el suelo, la vegetación y la atmósfera, los flujos hídricos del suelo y el control de la evaporación por la humedad del suelo (de Rosnay y Polcher, 1998; Ducoudré y otros, 1993), (2) STOMATE dedicado al ciclo de carbono y la simulación de procesos biogeoquímicos en la superficie (Viovy, 1996), y (3) una representación de la evolución dinámica de la vegetación y

del almacenamiento de carbono (Sitch, 2000). La componente (3) no se utilizó en este trabajo.

En el contexto de esta tesis, se realizaron simulaciones con la versión 2.2 de ORCHIDEE en una configuración *off-line* –sin retroalimentación atmosférica– y con una resolución espacial de 0.5°. En esta configuración *off-line*, el modelo se fuerza con datos atmosféricos externos (precipitación, temperatura y humedad específica del aire a 2 m, velocidad del viento, y radiación descendente de onda larga y corta). Por otro lado, ORCHIDEE requiere dos conjuntos de datos auxiliares adicionales que proporcionan información sobre la cubierta vegetal y la composición del suelo. Para cada retícula, la vegetación se representa mediante su composición en proporción de suelo desnudo y 15 tipos funcionales de plantas (*plant functional types*, PFT), mientras que la descripción del suelo se representa mediante una combinación de 3 texturas de suelo (gruesa, media y fina). Para esta tesis se empleó una clasificación de 15 PFTs que prescribe la evolución temporal de la cobertura y uso del suelo de cada retícula con una resolución anual. Esta base de datos es una combinación entre los mapas de cobertura de suelo de la *European Space Agency Climate Change Initiative* (ESA-CCI, 2017) y la fracción de usos de suelo de variación anual del conjunto de datos *Land Use Harmonization 2* (LUH2; Hurtt y otros, 2011). El producto final de esta combinación será llamado ESA-LUH2 a lo largo de la tesis. En cuanto a la información de textura de suelo se utilizó la descripción del suelo del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (Reynolds y otros, 2000).

Respecto al módulo de hidrología, el modelo cuenta con un esquema de 11 capas de suelo que representa los procesos de transferencia vertical de agua y calor, como la difusión y la retención (De Rosnay y otros, 2000, 2002; Campoy y otros, 2013). Adicionalmente, la versión empleada del modelo cuenta con un esquema de ríos (módulo de *routing*; Schrapffer, 2022). Este módulo permite que a cada punto de retícula del modelo se le asigne una cuenca con información sobre su dirección de flujo, topografía y longitud del canal. Así, cada retícula de ORCHIDEE es parte de una cuenca bien delimitada, con una única salida aforada y, con ello, una de sus variables de salida es la descarga de río asociada a la correspondiente cuenca.

2.2.3. Información in situ y productos basados en la misma

Mediciones in situ

En esta tesis se emplearon mediciones in situ de diversas variables, brindadas por distintas instituciones subnacionales y nacionales. En cada capítulo, según corresponda, se expondrán los detalles relevantes acerca de este tipo de fuente de datos.

GPCC

Como fuente de datos de precipitación también se empleó el producto mensual del *Global Precipitation Climatology Centre* (GPCC). El mismo se corresponde a precipitación global en superficie terrestre basada en unas 86,000 estaciones de todo el mundo, con registros de duración de 10 años o más. Las anomalías de precipitación de las estaciones se interpolan y superponen a la climatología del producto *GPCC Precipitation V2022*, que se ha desarrollado como campo de fondo y de referencia (Schneider y otros, 2022). El producto GPCC aquí utilizado cuenta con una resolución espacial de aproximadamente 25 km. El mismo es publicado por el GPCC del Servicio Meteorológico Alemán (<http://gpcc.dwd.de/>, consultado el 18 de junio de 2024).

2.3. Región de estudio

La región de estudio se encuentra al sudeste de la provincia de Córdoba, Argentina (Figura 2.1), en la zona más llana de la misma. En particular, esta región es parte de las hiperllanuras del país (Jobbagy y otros, 2008). La estación meteorológica de Marcos Juárez perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que se encuentra dentro de la región de estudio, indica que en la misma se registran temperaturas máximas de 31 °C en enero y mínimas de 4 °C en julio (<https://www.smn.gob.ar/estadisticas>, consultado el 18 de junio de 2024). Además, se caracteriza por veranos húmedos (inviernos secos) con precipitaciones que rondan los 4.2 $\text{mm}^1\text{día}^{-1}$ (menos de 1 $\text{mm}^1\text{día}^{-1}$). Al formar parte del núcleo agroproductivo de Argentina, el suelo franco limoso de la región se utiliza principalmente para la agricultura de secano (IDECOR, 2018, 2023a), lo cual es importante saber a la hora de analizar

las posibles entradas de agua de la matriz porosa. Su cobertura vegetal está compuesta casi exclusivamente por cultivos anuales, con predominio de soja y en segundo lugar maíz (IDECOR, 2023b) y, en menor medida, trigo invernal. A lo largo de las décadas, la profundidad de la napa freática de este paisaje propenso a inundaciones ha experimentado un notable ascenso, pasando de más de 10 m por debajo de la superficie en la década de 1960 a menos de 1 m en 2016-2017, según la investigación de Bollatti y otros (2017).

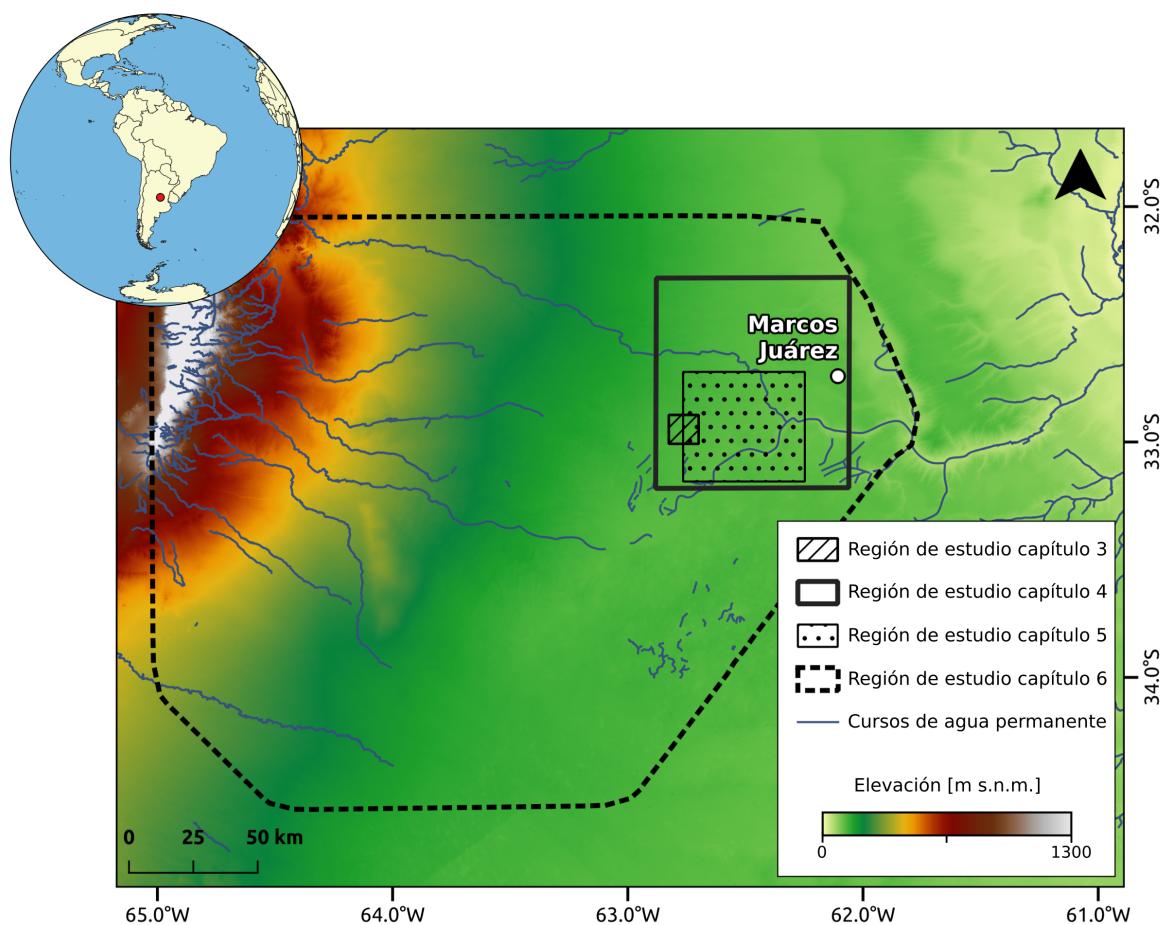


Figura 2.1: Mapa topográfico [m] de la región de estudio de esta tesis, y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. <https://www.ign.gob.ar/>, consultado el 18 de junio de 2024). Se diferencian los polígonos de estudio que aborda cada uno de los capítulos. Como ciudad de referencia se marca Marcos Juárez, contenida en el sudeste de la Provincia de Córdoba.

La Figura 2.1 muestra los polígonos que se tomaron como áreas de estudio de esta tesis, marcando a qué capítulo se corresponde cada uno. Los polígonos fueron

seleccionados en base de la disponibilidad de las mediciones in situ necesarias para cada estudio, salvo el que refiere a la evaluación del modelo ORCHIDEE. Esto se debe a la resolución del modelo, el cual tiene la capacidad de simular las variables de ciertas cuencas, por lo que para los análisis de su correspondiente capítulo se tomó la cuenca disponible que contuviese las áreas de estudio de los demás capítulos.

Capítulo 3

Complejidad de la superficie inundada: una visión más allá del espejo de agua

Este capítulo se basa en la publicación: Cappelletti, L.M.; Schrapffer, A.; y Sörensson, A. 2022. Identification and monitoring of waterlogged areas in a productive region of Argentina using Landsat information. *Meteorologica*. <https://doi.org/10.24215/1850468Xe014>

A lo largo de esta tesis se emplearon estimaciones de la base de datos *Global Surface Water* para calcular el área de superficies cubiertas por agua. Dichas estimaciones, basadas en el tratamiento de informaciónpectral de la misión Landsat, resultan de discriminar el agua de otros elementos de la superficie. Esto es una tarea no trivial debido a que el agua es un *target* altamente variable y sus propiedades espectrales en las longitudes de onda medidas por distintos sensores varían según la concentración de clorofila, la carga total de sólidos suspendidos y la materia orgánica de color disuelta, así como la profundidad y el material del fondo del cuerpo de agua en el caso de aguas someras (Arst y otros, 2003; Pekel y otros, 2016). Además, estas propiedades también varían según las condiciones de observación de los objetivos en superficie, como la geometría sol-objetivo-sensor y el espesor óptico, por su impacto en la reflectancia. Sobre estos factores cabe destacar que la base *Global Surface Water* emplea las etapas

5, 7 y 8 de la misión Landsat, y cada una de ellas se corresponde a diferentes sensores (TM, ETM+ y OLI, respectivamente. Ver Sección 2.2.1).

Siendo que los productos de la base de datos *Global Surface Water* brindan estimaciones de cuándo y dónde hubo agua en superficie, y dicha información puede incluir la mezcla de agua con otros elementos, el objetivo de este capítulo es analizar características y elementos que intervienen en el agua superficial de llanuras agrícolas con napas cercanas a la superficie, mediante el uso de índices espectrales.

3.1. Introducción

Los satélites equipados con instrumentos multiespectrales pueden detectar características de la superficie a escala global, explotando las propiedades de absorción o emisión espectral de los objetos. Por ejemplo, desde 1972 la información multiespectral de los satélites Landsat ha permitido detectar y documentar los cambios en la superficie debido al uso del suelo, incendios forestales e inundaciones, entre otros cambios naturales o inducidos por el ser humano (U.S. Geological Survey, 2015). Una de las formas de aprovechar este tipo de información es mediante el empleo de índices espectrales para resaltar diferentes características, mediante el análisis de bandas y la segmentación por umbrales (e.g., Oleksiak, 2008; Ma y otros, 2020). En este sentido, métodos basados en índices espectrales son ampliamente utilizados para la rápida identificación y seguimiento de agua en superficie (Gstaiger y otros, 2012; Tong y otros, 2018). La implementación de una sola banda no es suficiente para separar correctamente el *target* agua de píxeles oscuros, por lo que se han desarrollado índices que combinan dos bandas o más para mejorar la detección de agua, como pueden ser los índices basados en diferencias normalizadas. McFeeters (1996) desarrolló el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI, *Normalized Difference Water Index*) utilizando las bandas verde e infrarroja cercana (NIR, *Near InfraRed*). Su función es diferenciar el agua de otros elementos, teniendo en cuenta que esta absorbe el flujo radiante incidente casi en su totalidad en las bandas del infrarrojo cercano y de onda corta, mientras que la superficie terrestre refleja una cantidad significativa de energía en este rango del espectro electromagnético. En cambio, la incorporación de la banda verde maximiza la reflectancia

del agua. Este índice se encuentra dado por:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{Verde} - \text{NIR}}{\text{Verde} + \text{NIR}}$$

Para el uso de NDWI, con valores entre -1 y 1, McFeeters (1996) propuso el uso de sus valores positivos para identificar agua y valores negativos para identificar cuerpos de no-agua. Sin embargo, el NDWI tiene limitaciones para suprimir las zonas urbanizadas (Xu, 2006). Con el fin de mejorar la precisión de la clasificación del agua en zonas urbanas, Xu (2006) propuso el índice modificado de agua de diferencia normalizada (mNDWI, *modified Normalised Difference Water Index*) (Xu, 2006). El mNDWI utiliza la banda infrarroja de onda corta (SWIR, *ShortWave InfraRed*), la cual tiene una mayor reflectancia en edificaciones que la banda NIR, para mejorar el contraste entre agua y zonas urbanizadas. Además, este índice reduce el impacto de la vegetación en la identificación del agua –respecto al NDWI– y es capaz de identificar cuerpos de agua de todos los colores con gran precisión (Fisher y otros, 2016). El índice mNDWI, también con valores entre -1 y 1, es:

$$\text{mNDWI} = \frac{\text{Verde} - \text{SWIR}}{\text{Verde} + \text{SWIR}}$$

Hay aspectos que se deben considerar al emplear los índices de agua existentes, y que la comunidad científica está trabajando de manera constante para su mejora. El simple uso de bandas espectrales no puede eliminar las sombras y realzar el agua debido a la gran similitud espectral entre el agua y píxeles oscuros. Además, teniendo en cuenta que los principales factores que afectan la precisión de la identificación del agua son diferentes dependiendo del fondo y contexto espacial, es necesario mejorar los métodos de empleo de índices utilizando información espacial local. Por otro lado, los umbrales óptimos para la detección de cuerpos de agua cambia según el entorno en el que se presenta y las imágenes empleadas. Ligeros cambios en el umbral repercuten en los resultados de identificación de las cuerpos de agua (Li y otros, 2021). Por lo tanto, ajustar el umbral según las condiciones de la imagen y la información local del sistema es útil para mejorar la precisión de identificación.

En este capítulo se presenta un método para identificar áreas inundadas en llanuras agrícolas basado en los índices NDWI y mNDWI, con el fin de no solo tener una herramienta de monitoreo de estos eventos extremos, sino también distinguir la atribución por parte de agua “pura” de la mezcla de agua con otros elementos. En particular, por el uso y cobertura del suelo de la región de estudio, los elementos de interés son suelo desnudo y vegetación –en particular, cultivos–. Los índices se calcularon utilizando datos multiespectrales del sistema satelital Landsat 8. Estudios anteriores, como Passucci y otros (2017) y Ferral y otros (2019), utilizaron escenas de Landsat e índices espectrales para la identificación de áreas inundadas y no inundadas en regiones de las Pampas Argentinas. En este trabajo, se utilizaron y combinaron ambos índices para etiquetar cada píxel del área de estudio según la magnitud de agua superficial que contiene. Los píxeles se agruparon en tres categorías distintas: *Non-Water* (NW), *Mixed-Water* (MW) y *Open Water* (OW). La categoría NW se refiere a píxeles con un contenido de agua bajo o nulo respecto a otros elementos dentro del píxel, mientras que MW se refiere a píxeles compuestos por suelo y/o vegetación con un porcentaje de agua. La tercera categoría OP se refiere píxeles donde el elemento que predomina es el agua. La descomposición en estos tres grupos es una tarea delicada debido a la interacción de diferentes factores, como la presencia de vegetación y su gran variabilidad estacional, pero también la división del año en una temporada seca y otra húmeda que puede afectar las propiedades del suelo (Li y otros, 2015). Por estas razones, los píxeles se clasificaron mediante un método de clasificación no supervisado, dado que es simple de implementar y es ampliamente utilizado en aplicaciones de teledetección (e.g., Boschetti y otros, 2014). El algoritmo de detección de agua en superficie se ejecutó en imágenes de la misión Landsat 8 para evitar la combinación de distintos sensores. Se consideró un periodo que contara con escenas de temporadas secas, así como fechas de eventos de inundaciones reportados por instituciones argentinas, como el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), para tener en cuenta la dinámica hidrológica de la región y obtener un único umbral por categoría de píxel. Como sitio de estudio se empleó un área de 160 km² en el centro sureste de la provincia de Córdoba. Este zona se encuentra dentro de la región que se estudia en el Capítulo 4, donde se muestra que anegamientos e inundaciones están asociados significativamente al nivel

de napa freática, sobre todo en las últimas dos décadas.

3.2. Materiales y metodología

3.2.1. Sitio de estudio

El área estudiada en este capítulo se expone en la Figura 3.1. La misma cuenta con aproximadamente 160 km², y forma parte de una región de alta productividad agrícola de cultivos anuales manejados sin riego (IDECOR. <https://idecor.cba.gov.ar>, consultado el 18 de junio de 2024), caracterizada por una llanura de relieve normal con numerosas áreas relativamente pequeñas de relieve subnormal-cóncavo, que dan lugar a charcas y estanques naturales (Capdevila y otros, 2016).

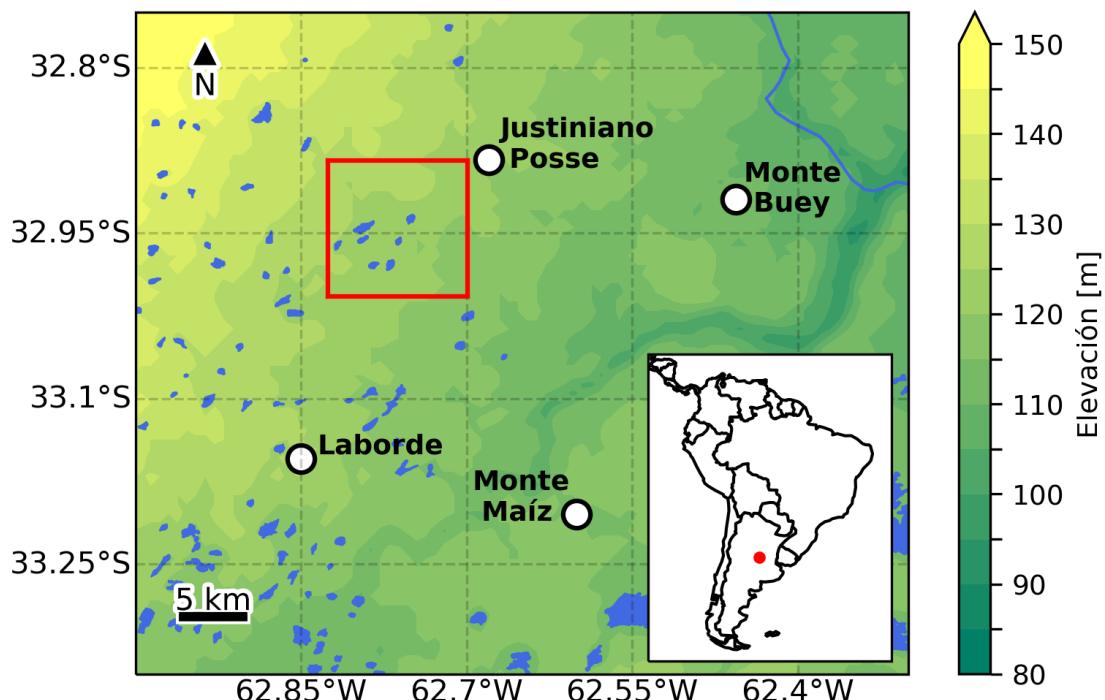


Figura 3.1: Mapa topográfico [m] del sitio de estudio (cuadrado rojo en el mapa regional); y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. <https://www.ign.gob.ar/>, consultado el 18 de junio de 2024). La región se encuentra en la provincia de Córdoba, Argentina (punto rojo en el mapa de Sudamérica).

3.2.2. Datos in situ e información multiespectral

Dado que la variación del nivel freático es un factor crítico en la ocurrencia y duración del anegamiento e inundaciones de la región de interés (Sección 2.3; Capítulo 4), se emplearon datos in situ de esta variable y de precipitación para evaluar el desempeño y los resultados del método desarrollado. En la región de estudio, INTA cuenta con datos de un sensor in situ ubicado en Justiniano Posse (datos proporcionados por la Agencia de Extensión Rural de INTA Justiniano Posse). La disponibilidad de los datos in situ limitó el período de estudio de este capítulo a septiembre de 2019 - abril de 2021.

Para implementar la herramienta de identificación de agua en superficie sobre la región de Justiniano Posse, se utilizaron imágenes Landsat 8 correspondientes al *path* 228 y *row* 083. Las escenas se adquirieron a través del *USGS Earth Explorer* (<https://earthexplorer.usgs.gov>, consultado el 18 de junio de 2024). Las escenas utilizadas corresponden al producto de *Level 2 Surface Reflectance*. Dentro de este nivel de procesamiento, el USGS recomienda utilizar información de la *Collection 2* (<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>, consultado el 18 de junio de 2024). La presencia de nubes en los productos satelitales de tipo ópticos representa un desafío para la detección de inundaciones. Para evitar la contaminación de las imágenes por cirrus, nubes y sus sombras, las escenas se han filtrado en dos pasos: (1) utilizando el *score* de cobertura de nubes del *USGS Earth Explorer* se seleccionaron aquellas escenas con un *score* inferior al 5 %, umbral que también se toma en otros estudios, como Acharya y otros (2018). El *score* se determina mediante el algoritmo *C Function of Mask*, que proporciona una estimación del porcentaje de cobertura de nubes sobre toda la escena (Foga y otros, 2017). Luego, (2) sobre las escenas resultantes del paso (1) se llevó a cabo un filtro mediante inspección visual, según recomiendan estudios antecedentes (e.g., Ferral y otros, 2019). Este filtrado, aplicado sobre el período de estudio, resultó en 18 imágenes para ser analizadas (Tabla 3.1).

3.2.3. Detección de superficie de agua en las escenas

Los índices espectrales NDWI y mNDWI se emplearon de manera combinada para etiquetar a cada uno de los píxeles de las escenas según su proporción de agua, respecto

| | Fecha de la escena |
|------------------------|---------------------------|
| Landsat 8 - OLI | 01-09-2019 |
| Collection 2 - Level 2 | 17-09-2019 |
| Path 228 Row 083 | 20-11-2019 |
| | 07-01-2020 |
| | 24-02-2020 |
| | 14-05-2020 |
| | 15-06-2020 |
| | 02-08-2020 |
| | 18-08-2020 |
| | 19-09-2020 |
| | 05-10-2020 |
| | 22-11-2020 |
| | 08-12-2020 |
| | 09-01-2021 |
| | 26-02-2021 |
| | 30-03-2021 |
| | 15-04-2021 |
| | 01-05-2021 |

Tabla 3.1: Especificaciones y fechas de las escenas empleadas.

a otros elementos presentes. Ambos índices son útiles para la detección de agua abierta. Adicionalmente, el NDWI es sensible a condiciones de mezcla de agua con suelo y/o vegetación, mientras que el mNDWI es sensible a condiciones de agua en entornos urbanos (Zhou y otros, 2017). Con esta elección, se logró identificar y mapear áreas anegadas e inundadas sobre cada escena, en base a las tres etiquetas ya mencionadas: *Non-Water* –elemento característico no es agua–, *Mixed-Water* –mezcla no disociable de agua con otro/s elementos, por la resolución del sensor– y *Open Water* –elemento característico es agua–.

El umbral estándar para áreas de agua “pura” en ambos índices es valores mayores a 0. Sin embargo, la categorización de píxeles mediante el uso de umbrales óptimos es una tarea delicada. Con el fin de mostrar el comportamiento de los índices y la sensibilidad de los umbrales, se mapearon los índices NDWI y mNDWI para una escena húmeda (7 de enero de 2020) y una escena seca (9 de enero de 2021). En la escena seca, la condición climática previa fue cercana a la media de la región, sin eventos extremos de lluvia. En el caso de la escena húmeda, tanto medios locales como la Bolsa de Cereales de la Provincia de Córdoba (BCCBA, <https://www.bccba.org.ar>, consultado el 18

de junio de 2024) informaron que Justiniano Posse, junto con otras ciudades vecinas, sufrieron graves inundaciones a principios de enero. En la Figura 3.2 se puede observar que tanto el mNDWI como el NDWI muestran patrones análogos en la diferenciación de la escena húmeda respecto a la seca. Haciendo uso de imágenes en color real (RGB: B4-B3-B2 para Landsat 8) y firmas espectrales de muestras de píxeles de ambas escenas (no se muestra), se advirtió que los píxeles correspondientes a agua “pura”, presentan valores de mNDWI positivos. En el caso de NDWI, los valores de estos mismos píxeles, en general, resultaron ser negativos. Además, píxeles identificados como agua “pura” en ambas fechas, presentaron valores distintos del mismo índice en cada escena, aunque ambas se correspondiesen al mismo período del año –enero–. Esto se debe a que los umbrales son sensibles a diferentes factores y su interacción, como la variabilidad año tras año del contenido de agua del suelo y la vegetación (Acharya y otros, 2018).

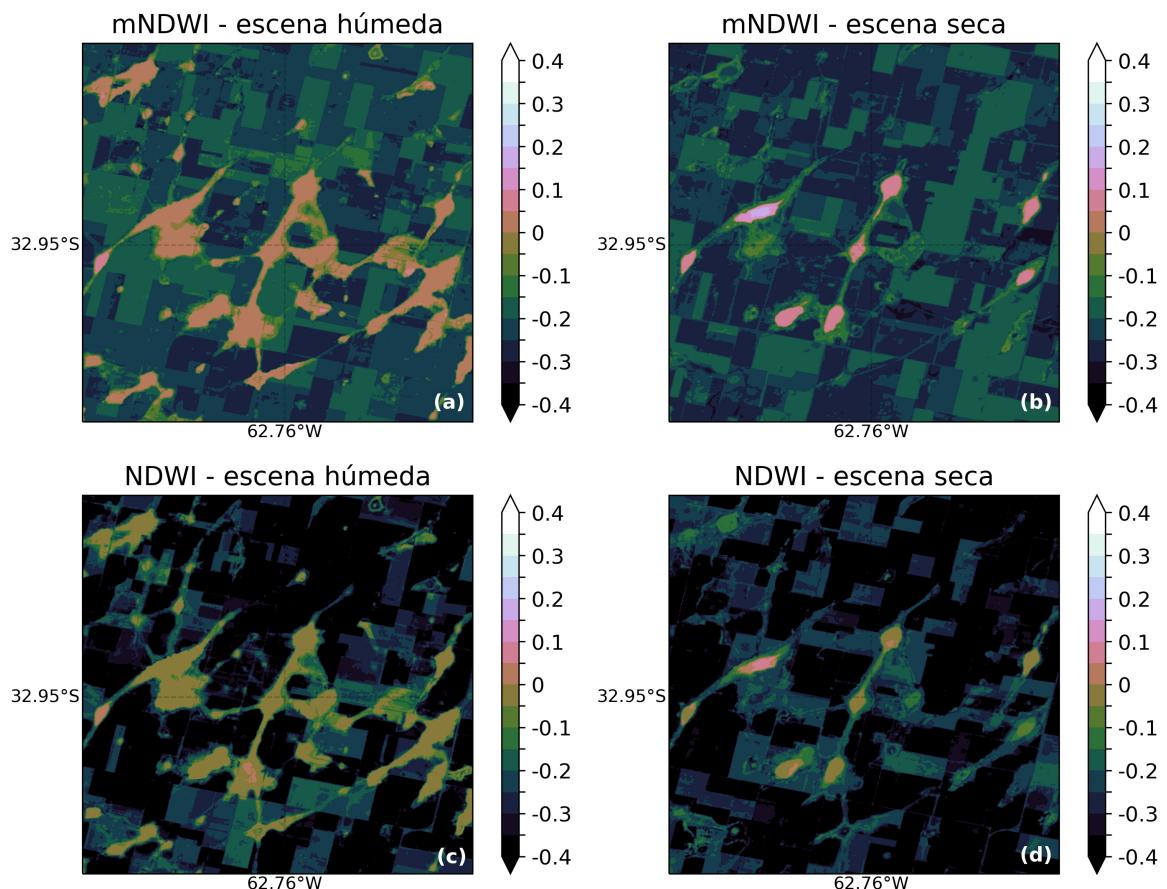


Figura 3.2: Mapeo de los índices mNDWI y NDWI sobre el sitio de estudio, empleando escenas Landsat 8 del 7 de enero de 2020 (escena húmeda) y del 9 de enero de 2021 (escena seca). (a): mNDWI, escena húmeda. (b): mNDWI, escena seca. (c): NDWI, escena húmeda. (d): NDWI, escena seca.

El ejemplo mostrado expone que obtener umbrales óptimos es una tarea compleja, incluso en regiones como la que se analiza en este trabajo, donde no se generan sombras por terreno montañoso. Por ello, para clasificar los píxeles según las clases de interés, se utilizó el método *K-Means*. Este es un método de clasificación no supervisada ampliamente utilizado para la identificación de elementos de la cobertura terrestre basada en estimaciones producto de sensoramiento remoto (e.g., Ogilvie y otros, 2015). Adicionalmente, es de fácil implementación mediante la biblioteca *scikit-learn* de *Python* (Pedregosa y otros, 2011). El algoritmo *K-Means* es sumamente adaptable a una gran cantidad de muestras y requiere que el número de clústeres sea especificado por el usuario.

Los índices mNDWI y NDWI fueron calculados para los píxeles de las 18 imágenes, resultando en aproximadamente 3,200,000 píxeles etiquetados de acuerdo a dos variables cada uno. Sobre estos píxeles, se aplicó el método *K-Means* utilizando 10 clústeres. De estos 10 clústeres, solo 2 contenían píxeles con valores positivos de ambos índices. El grupo con píxeles de valores más altos para ambos índices (en adelante, clúster A) contiene 94,542 píxeles, de los cuales el ~95 % presentan $mNDWI > 0$, pero en el caso de NDWI menos del 40 % de los píxeles tienen valores positivos. Este comportamiento en el cual un mismo píxel presenta valores de $mNDWI > 0$ y $NDWI < 0$ fue expuesto en la Figura 3.2. El otro clúster que también contiene valores positivos para ambos índices (clúster B) presenta 59,449 píxeles, de los cuales el ~5 % se corresponde a $mNDWI > 0$ y en el caso de NDWI, menos del 1 % son positivos. Los 8 clústeres restantes (agrupados como clúster C) están compuestos completamente de píxeles con valores negativos de mNDWI y NDWI (Figura 3.3). Por lo tanto, se tomó el clúster A para identificar píxeles de la clase *Open Water*, el clúster B para *Mixed-Water* y el clúster C para *Non-Water*. Para definir el intervalo umbral de valores que representa cada etiqueta de condición del agua, en el caso de *Open Water*, se empleó el cuantil 0.05 como su límite inferior (el ~90 % del clúster A). En cuanto al clúster B, aproximadamente el 94 % estaba por debajo del límite inferior del clúster A, por lo que para *Mixed-Water* se empleó ese límite como su cota superior, y el límite inferior como el cuantil 0.05 del clúster B (*Mixed-Water* está dada por el ~80 % del clúster B). Los píxeles por debajo del umbral inferior del clúster B, se trataron como *Non-Water*. La Tabla 3.2 muestra

los umbrales de las etiquetas de interés para la identificación de áreas de *Open Water* y *Mixed-Water*.

| Categoría de píxel acorde a condición de agua | Umbbral |
|---|--|
| <i>Open Water</i> | $mNDWI > 0$ y $NDWI > -0.09$ |
| <i>Mixed-Water</i> | $0 > mNDWI > 0.15$ y $-0.09 > NDWI > -0.19$ |

Tabla 3.2: Umbrales de los índices mNDWI y NDWI identificar píxeles correspondientes a las categorías de *Open Water* y *Mixed-Water*.

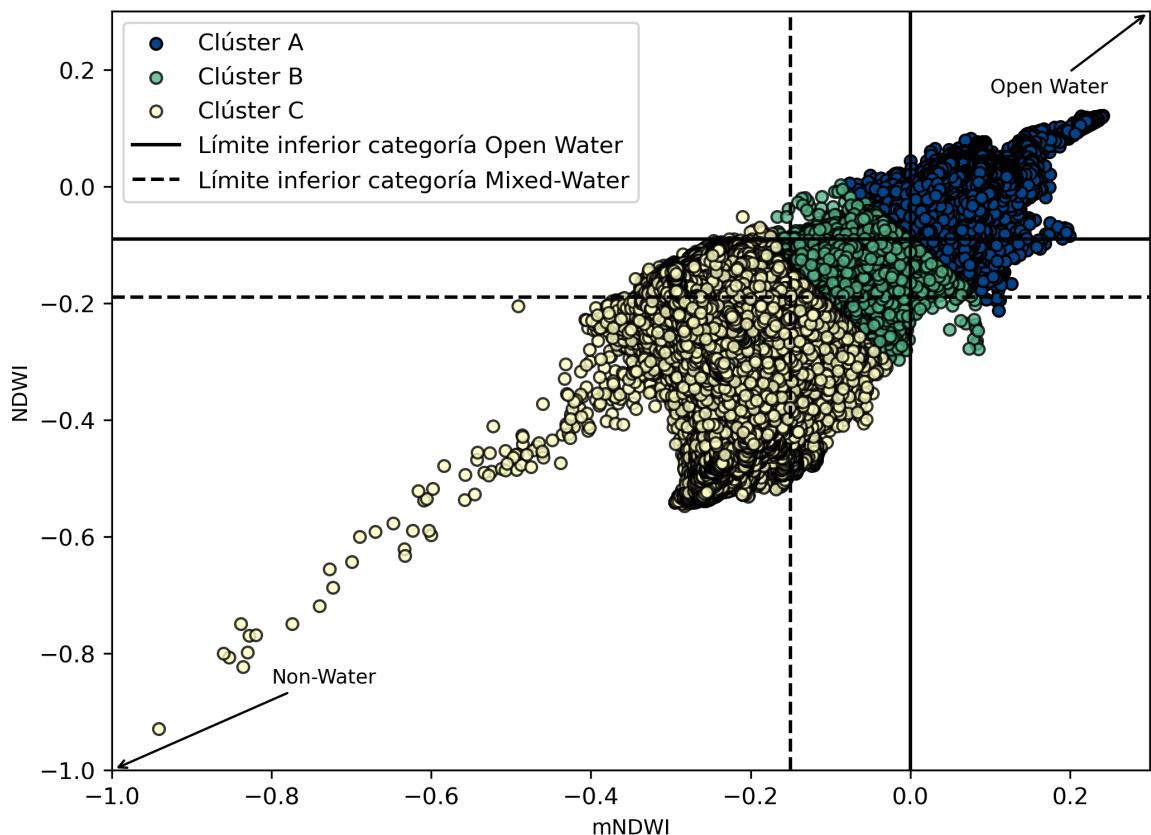


Figura 3.3: Diagrama de dispersión de los píxeles de las 18 imágenes analizadas en este estudio, acorde a sus valores de mNDWI y NDWI. Los colores identifican a qué clúster pertenece cada píxel, seg\xf1n el m\xedodo de clasificaci\xf3n no supervisada *K-Means* y su posterior agrupamiento: cl\xfustro A, cl\xfustro B y cl\xfustro C. Adem\xe1s, se representan los l\xedmites inferiores de los umbrales correspondientes a las categor\xedas *Open Water* (l\xednea sólida) y *Mixed-Water* (l\xednea de puntos).

3.3. Resultados y discusión

La Figura 3.4 muestra la serie de tiempo de precipitación correspondiente a la suma móvil de 5 días (3.4a) y la altura del nivel freático de Justiniano Posse (3.4b). Asimismo muestra el número de píxeles pertenecientes a *Open Water* y *Mixed-Water* (3.4c) calculado mediante los umbrales de la Tabla 3.2. En la Figura 3.4 se observa que en enero y mediados de febrero de 2020, la altura del nivel freático experimenta dos aumentos que no son perceptibles en las áreas de *Open Water* y *Mixed-Water*, esto se puede deber a la falta de imágenes en ese período. La siguiente escena más cercana es del 24-02-2020, momento en el cual el nivel freático disminuyó a alrededor de -150 cm desde su último aumento notable a mediados de febrero.

Desde abril hasta mediados de octubre de 2020, la altura del nivel freático disminuyó desde -100 cm hasta aproximadamente -175 cm, con una tasa media de disminución diaria de 1.4 cm. Esta estabilización de la altura de napa se refleja en el comportamiento de la clase *Open Water*. A comienzos de septiembre de ese año ocurrieron eventos de precipitación que dieron lugar al ascenso del nivel freático de aproximadamente 10 cm. Dicha ocurrencia de precipitación y leve ascenso de napa –comparado a ascensos previos– también se ve reflejado en el aumento de píxeles de clase *Mixed-Water*, más no en la clase *Open Water*. Esto evidencia que que el agua en superficie de la región durante septiembre e inicios de octubre se corresponde mayoritariamente de la mezcla de agua con vegetación/suelo, en lugar de agua “pura”.

En cuanto a los últimos meses de 2020, en los días 25-10-2020 y 18-12-2020 se desencadenaron ascensos de aproximadamente 30 cm en dos días de la altura del nivel freático, seguidamente de la ocurrencia de lluvia acumulada por encima de los 50 mm. En el caso de la fecha de octubre, se tiene un ligero aumento de 870 píxeles de *Open Water* entre las escenas disponibles del 05-10-2020 y el 22-11-2020. A finales de enero de 2021, el 28-01-2021 y el 29-01-2021 la precipitación superó los 60 mm y los 80 mm respectivamente, lo que resultó en un aumento de la altura de napa de -228 cm a -72 cm en solo dos días. En el caso de un evento de este tipo, se esperaba un aumento notable del número de píxeles de *Open Water* y *Mixed-Water* debido a la respuesta que estas variables presentaron frente a las precipitaciones ocurridas a principios de enero del

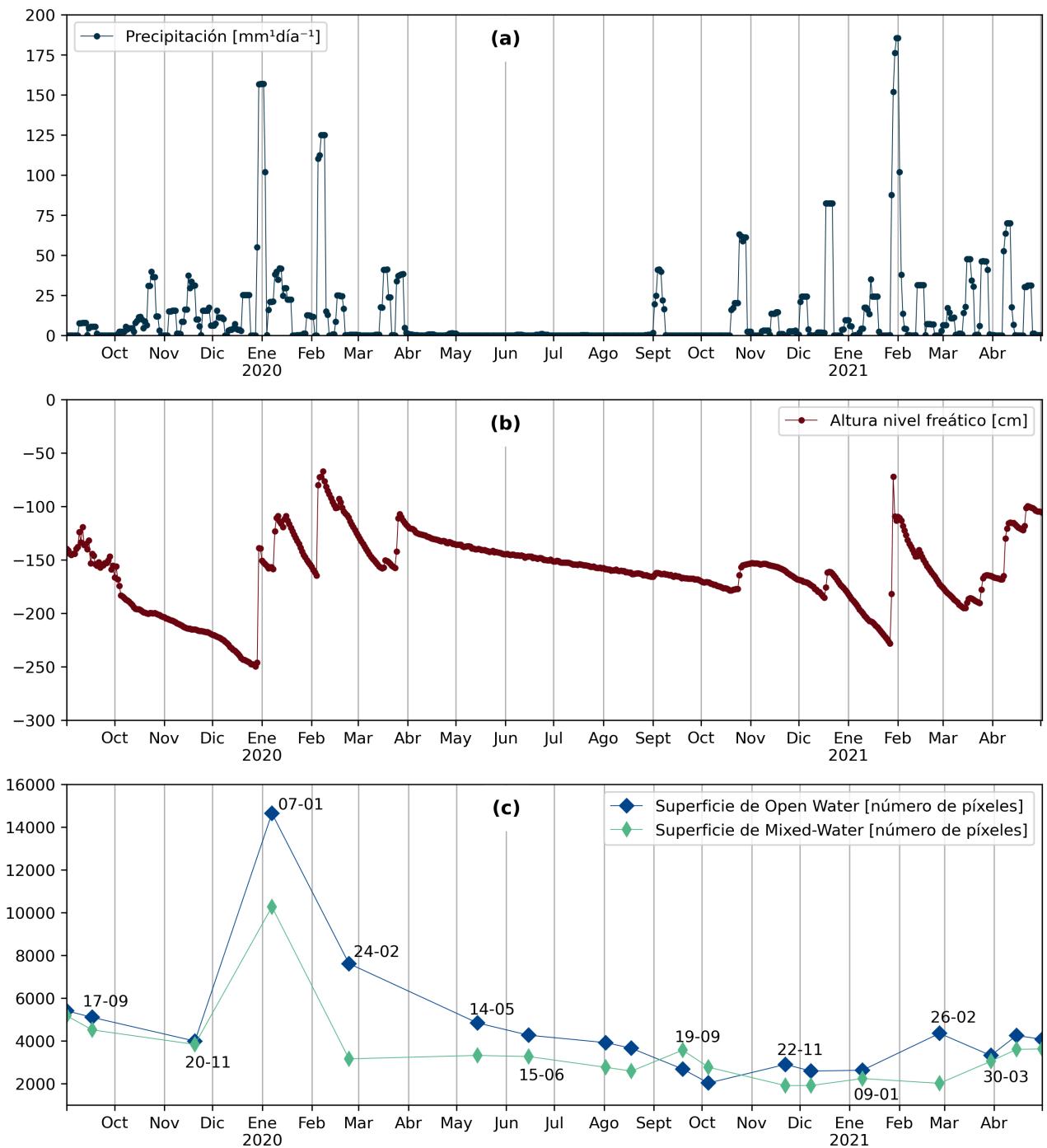


Figura 3.4: Serie temporal de (a): precipitación correspondiente a una ventana de suma móvil de 5 días [mm¹día⁻¹], es decir, el valor de un cierto día es la suma de la precipitación diaria de ese día sumada a la correspondiente de los 4 días anteriores (precipitación acumulada). (b): altura diaria del nivel freático en referencia al nivel del terreno [cm]. Los datos diarios de precipitación y altura del nivel freático se refieren a mediciones in situ en Justiniano Posse (INTA Justiniano Posse). (c): número de píxeles clasificados como *Open Water* y *Mixed-Water*, de acuerdo con los umbrales en la Tabla 3.2. Algunas de las magnitudes se muestran junto con la fecha de la escena correspondiente.

2020. Aunque las condiciones de lluvia en los veranos del 2020 y 2021 son similares, el área de agua en superficie es evidentemente menor en el 2021. Esto se explica por la diferencia de días entre el evento extremo de precipitación y la disponibilidad de imagen Landsat: en cuanto al verano del 2020, la diferencia es de 4 días (evento extremo de precipitación: 03-01-2020, imagen disponible: 07-01-2020); en el caso del verano de 2021 dicha diferencia es de 24 días (evento extremo de precipitación: 02-02-2021, imagen disponible: 26-02-2021). Esto pone en evidencia la dificultad que impone la baja disponibilidad de imágenes en la identificación y monitoreo de cuerpos de agua. En la región de estudio esta problemática ocurre sobre todo en verano, ya que se descartan más imágenes debido a nubosidad respecto a las otras estaciones del año.

Como ejemplo gráfico de la detección de *Open Water* y *Mixed-Water*, estas categorías se mapearon sobre las escenas seca y húmeda. Ambos resultados se contrastaron con el producto *Water Seasonality* de la base *Global Surface Water*. El producto *Water Seasonality* proporciona información sobre el comportamiento intra-anual de los cuerpos de agua. Separa los cuerpos de agua “permanentes” –aquellos que están presentes durante todo el período de observación, en este caso 2020 y 2021– de los cuerpos de agua “estacionales” –aquellos que están presentes solo durante una parte del año–. El grado de estacionalidad se representa por la proporción del número total de meses –de 1 a 12– en los que cada píxel presenta agua. La Figura 3.5 muestra los mapeos de agua mencionados. Los píxeles que corresponden a *Open Water* en la escena seca también lo son en la escena húmeda. Con respecto a los píxeles de *Water Seasonality* de menos de 12 meses, la mayoría de ellos se refieren a *Open Water* y en menor medida *Mixed-Water* en la escena húmeda. En cuanto al producto *Water Seasonality*, todos los píxeles que se corresponden a agua permanente –i.e., presentan– agua los 12 meses del año, son *Open Water* tanto en la escena húmeda como en la seca. Cabe agregar que la menor variabilidad entre agua estacional y permanente de la escena seca, se refleja en la baja cantidad de píxeles del tipo *Mixed-Water*.

Para las situaciones mostradas, resultó más difícil contrastar la información de la categoría de *Mixed-Water* que la correspondiente a la categoría de *Open Water*. En el estudio realizado por Ferral y otros (2019), se explica que la categoría de *Mixed-Water* es más compleja de tratar, ya que la delimitación precisa de las líneas de costa de

estanques o la determinación de píxeles mixtos –compuestos de vegetación y/o suelo con un cierto porcentaje de agua–, es complicado de analizar cuando se utiliza datos de un solo sensor. En el caso de esta tesis se empleó Landsat porque es de interés interpretar lo que la base de datos *Global Surface Water* identifica como “agua”.

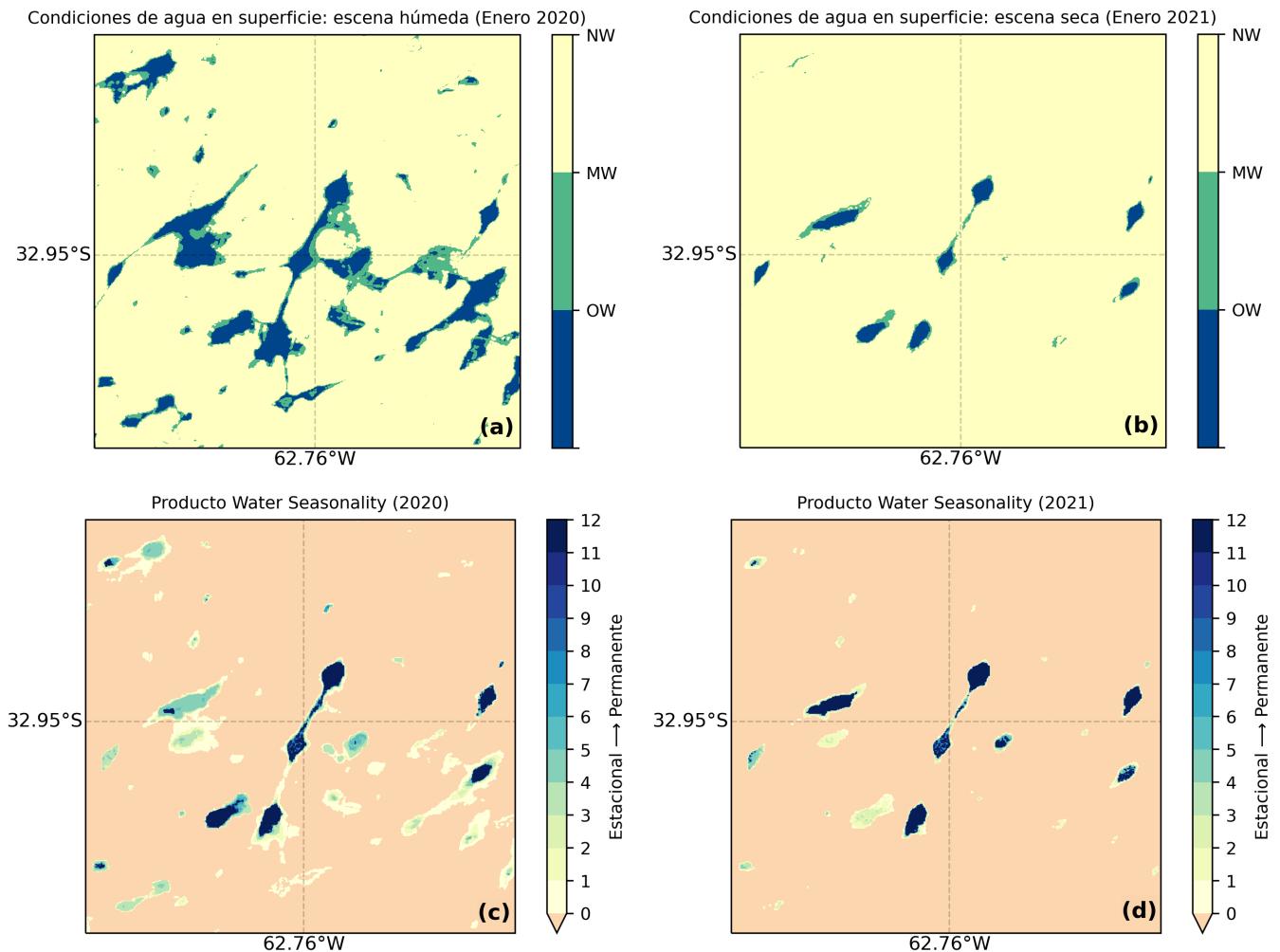


Figura 3.5: Mapeo de las categorías de *Open Water* (OW), *Mixed-Water* (MW) y *Non-Water* (NW) sobre la zona de estudio, basado en las escenas de Landsat 8 del 7 de enero de 2020 (escena húmeda), en el panel (a) y del 9 de enero de 2021 (escena seca), en el panel (b). Los píxeles fueron etiquetados de acuerdo a los umbrales establecidos en la Tabla 3.2. En los paneles (c) y (d) se muestra el producto *Water Seasonality* para el año 2020 y 2021, respectivamente (Fuente: EC JRC/Google) sobre la misma región. La escala de colores diferencia los cuerpos de agua identificados como permanentes de los de ocurrencia estacional, para la cual los datos fueron escalados de 1 mes a 12 meses para cada año, y el valor 0 representa una contribución nula del producto *Water Seasonality*.

3.4. Conclusiones

Los productos generados por la base de datos *Global Surface Water* proporcionan estimaciones sobre la localización y momento en el que se produce presencia de agua sobre la superficie. La ocurrencia de estos cuerpos de agua puede estar dada más que por agua “pura”, incluyendo información acerca de su posible mezcla con otros elementos. En este contexto, el objetivo de este capítulo consistió identificar si en llanuras agrícolas de napas poco profundas se tiene aporte de mezcla de agua con otros elementos –en particular y por las características de la región, suelo y vegetación–.

Para ello se calcularon los índices de agua mNDWI y NDWI de 18 imágenes de la misión Landsat 8, del periodo septiembre de 2019 - abril de 2021, y se definieron umbrales para la identificación de las categorías *Open Water* y *Mixed-Water*, mediante un método de clasificación no supervisado. Con ello, se encontró que las inundaciones que presenta la región según *Global Surface Water* no solo están compuestas por píxeles de agua “pura” –*Open Water*–, sino también por píxeles que se corresponden a la mezcla de agua con suelo y/o vegetación. Además, se muestra que el número de píxeles de *Open Water* y *Mixed-Water*, varían según las fluctuaciones del nivel freático a escala diaria y la precipitación acumulada (ventana de 5 días). En general, el agua en superficie de la región se corresponde mayoritariamente a *Open Water*, sin embargo, en eventos aislados de precipitación, la categoría dominante es *Mixed-Water*. Cabe destacar que por medio de este simple método implementado, fue posible identificar el aumento de agua superficial en el área de estudio durante eventos severos de inundación.

Como consideraciones relevantes para trabajos futuros y el uso del algoritmo desarrollado, es importante tener en cuenta que emplear únicamente información de la misión Landsat para el cálculo de agua en superficie representa una limitación, ya que las escenas solo están disponibles cada 16 días, y varias de ellas deben ser filtradas por la cobertura de nubes que sufren. Sin embargo, por el objetivo de este capítulo fue necesario el emplear el mismo producto que se emplea en las estimaciones de la base de datos *Global Surface Water*.

Capítulo 4

Inundaciones en llanuras agrícolas estancadas desde arriba y desde abajo: perspectivas más allá del aumento de los extremos de precipitación

Este capítulo se basa en la publicación: Cappelletti, L.M.; Sörensson, A.; y Jobbágy, E. 2024. Floods from above and below: insights beyond increases in precipitation extremes over flat agricultural plains. *Hydrological Sciences Journal*. Artículo en revisión.

Varios de los principales cinturones cerealeros del mundo son planicies sedimentarias de sistemas hidrológicos estancados y niveles freáticos poco profundos, como la Gran Llanura Norteamericana, las Llanuras del Norte de China y la Llanura Pampeana Argentina (Jobbagy y otros, 2008; Fan y otros, 2013; Wang y otros, 2015; Rizzo y otros, 2018; Li y otros, 2024). Los niveles freáticos superficiales son clave en el control de los procesos hidrológicos del suelo de extensas áreas en estas regiones (Ferone y Devito, 2004; Wang y otros, 2009; Pirastru y Niedda, 2013; Jobbágy y otros, 2021). Los cambios en el contenido de agua de la capa superior del suelo son causados principalmente por la precipitación infiltrada y la evapotranspiración, pero las napas freáticas poco profundas también aportan humedad a través del transporte capilar ascendente y contribuyen a reducir el drenaje del suelo (Pirastru y Niedda, 2013). Considerando dicho contexto y que en los últimos 30 años la Llanura Pampeana ha experimentado tanto el ascenso de su nivel freático como el aumento de su área inundada (Houspanossian y otros, 2023),

en este capítulo se estudia la relación entre precipitación, nivel freático y área inundada de la región.

4.1. Introducción

La producción agrícola de la región pampeana posiciona a Argentina como el principal exportador de harina y aceite de soja, el tercer exportador de soja y el primer exportador de maíz (FADA, 2021). Por lo tanto, fenómenos hidrológicos extremos como las inundaciones que sufre la región, tienen un efecto perjudicial directo sobre el mercado y la economía del país.

La agricultura de la región ha pasado por varios puntos de inflexión importantes. El país exportó soja por primera vez en 1962 (Martínez Alvarez, 2012) y, desde entonces, la soja ha sido el principal sustituto de la vegetación nativa, los pastizales cultivados y la ganadería. A mediados de la década de 1990, el efecto del aumento del precio de los arrendamientos rurales impulsó a que numerosos productores cultivaran en campos que antes no eran ocupados por soja (Reboratti, 2010). Esto dio lugar a la sustitución de vegetación de raíces profundas –por ejemplo, pastizales naturales y bosques– por cultivos de raíces superficiales –por ejemplo, soja y maíz–, lo cual desencadenó el ascenso del nivel freático de las Llanuras Pampeanas, según varios estudios de campo y basados en simulaciones (Amdan y otros, 2013; Nosoetto y otros, 2013, 2015; Giménez y otros, 2016; Pal y otros, 2021; Houspanossian y otros, 2023), también asociado al aumento de las inundaciones en dicha región (Houspanossian y otros, 2023). Es así que el análisis de estos fenómenos hidrológicos extremos en entornos agrícolas es de crucial relevancia, sobre todo teniendo en cuenta la creciente demanda mundial de productos agroindustriales (por ejemplo, Potapov y otros, 2022).

En este capítulo se estudia eventos de inundación mediante información de área de agua en superficie durante el período 1986-2020 en una región extremadamente plana de la Llanura Pampeana, sin cursos de agua significativos y sin infraestructura de riego o drenaje, donde las inundaciones han aumentado y el nivel freático ha ascendido, a pesar de mantener un régimen de precipitaciones constante. Para ello, el siguiente trabajo propone responder a las siguientes preguntas científicas. En primer lugar, ¿Es suficiente

el incremento de índices de extremos de precipitación diaria, como los utilizados por el Informe de Evaluación 6 del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, Gutiérrez y otros, 2021; Masson-Delmotte y otros, 2021; Ranasinghe y otros, 2021), como proxy del aumento de las inundaciones en llanuras agrícolas estancadas? ¿Ha cambiado en las últimas décadas la relación entre el régimen de precipitaciones y el área inundada de la región? En segundo lugar, ¿Cómo ha sido la relación entre el nivel freático y el área inundada durante el periodo de estudio? ¿Sigue el comportamiento de una variable al de la otra en una clara relación causa-efecto o se corresponde a una cadena más compleja de retroalimentaciones? En tercer lugar, y según sugieren estudios recientes (Pal y otros, 2021; Houspanossian y otros, 2023), ¿existe una transición hidrológica en curso que pueda caracterizarse con las fuentes de datos disponibles?.

4.2. Materiales y metodología

4.2.1. Definición y caracterización del área de estudio

El área de estudio de este capítulo se encuentra dentro de las Llanuras Pampeanas y se definió siguiendo los siguientes cuatro criterios, (i) áreas propensas a inundaciones con niveles freáticos poco profundos (Fan y otros, 2013), (ii) topografía regional extremadamente plana, lo que conduce a un bajo transporte horizontal del agua en superficie, (iii) red pobre de arroyos y ríos (Iriondo y Drago, 2004), para evitar el ascenso y descenso del nivel freático vinculado a la dinámica fluvial y (iv) ausencia de sistemas de irrigación (IDECOR, 2018, 2023a), para ignorar su papel como entrada de agua en superficie y/o salida del sistema de aguas subterráneas.

Para definir los límites del polígono de estudio se utilizaron informes de instituciones públicas agroindustriales, tanto de nivel nacional como provincial, y artículos científicos revisados por pares. Los límites se seleccionaron en base a localidades donde se ha reportado ascenso de nivel freático (Gómez y otros, 2006; Capdevila y otros, 2016; Ministerio de Interior, Obra Pública y Vivienda, Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2016; Bollatti y otros, 2017; Ruiz y otros, 2017; Alsina y otros, 2020; Ministerio de Agricultura y Ganadería, Gobierno de la Provincia de Córdoba, 2023). La región

definida (Figura 4.1) tiene una superficie de 7530 km² y es uno de los núcleos agroproductivos de Argentina que ha incrementado su producción en las últimas décadas (Whitworth-Hulse y otros, 2023).

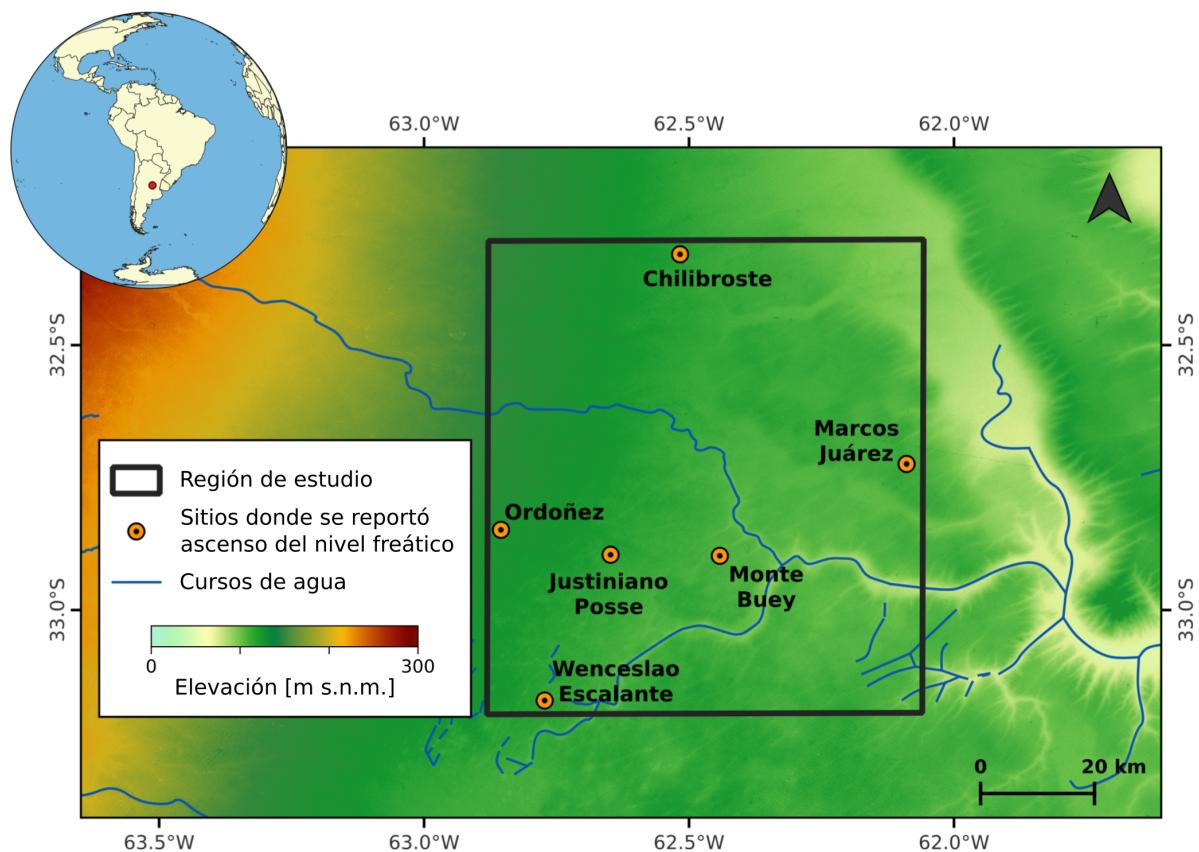


Figura 4.1: Mapa topográfico [m] de la región de estudio de este capítulo, y cuerpos de agua presentes (Fuente: Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina, IGN. <https://www.ign.gob.ar/>, consultado el 18 de junio de 2024).

Dentro de la región de estudio el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina cuenta con una estación meteorológica, en la localidad de Marcos Juárez, que indica que la zona experimenta temperaturas máximas medias de 31°C en enero y temperaturas mínimas medias de 4°C en julio. Los veranos son húmedos, con una precipitación media mensual de 127 mm, mientras que los inviernos son secos, con una precipitación media mensual de 18 mm. El suelo franco limoso de la región se utiliza principalmente para la agricultura de secano (IDECOR, 2018, 2023a). Su cubierta vegetal está compuesta casi exclusivamente por cultivos anuales, con predominio de soja y en segundo lugar maíz (IDECOR, 2023b) y, en menor medida, trigo de invierno. A lo largo de las décadas,

la profundidad del nivel freático en este paisaje ha experimentado un notable ascenso, pasando de más de 10 m por debajo de la superficie en la década de 1970 a menos de 1 m en 2016-2017 (Bollatti y otros, 2017).

4.2.2. Información implementada: fuentes y procesamiento

Nivel de napa freática

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) suministró registros *in situ* de calidad de más de 30 años de nivel freático y de variables meteorológicas correspondientes a Marcos Juárez. Por lo tanto, se consideró dicha estación como la proveedora de variables *in situ* para el estudio, con la precaución de que, en particular para el nivel freático, la misma representa una referencia aproximada para toda la región. Como información cualitativa complementaria sobre el comportamiento de la napa freática, se utilizaron artículos científicos y reportes de instituciones nacionales y subnacionales de otras cinco localidades contenidas en la región de estudio (Figura 4.1).

Precipitación

Para esta variable se utilizaron tres tipos de fuentes. Por un lado, datos *in situ* diarios de escala puntual provistos por el INTA de Marcos Juárez, por ser la única localidad de la región con registros sobre el total del periodo de interés. Por otro lado, el producto GPCC *Full Data Monthly* de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ (Sección 2.2.3). Dado que el producto GPCC $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ no está disponible a escala diaria, se emplea la precipitación *in situ* diaria de Marcos Juárez como proxy de la precipitación diaria de la región de estudio. Estas dos fuentes de precipitación presentan una correlación de Pearson de 0.98 ($p\text{-value} < 0.01$). Además, las dos fuentes muestran tendencias similares a lo largo de todo el período y las estaciones del año (no se muestra).

Además, se utilizó el conjunto de datos satelitales globales IMERG (detalles del mismo en la Sección 2.2.1). Benítez y otros (2024), quienes analizaron la *performance* de cuatro productos satelitales en la estimación de la precipitación observada en el sudeste de Sudamérica, encontraron que a escala diaria IMERG presenta el mejor desempeño

en la correcta estimación de eventos de precipitación (fracción más alta de días lluviosos observados, así como la fracción más baja de eventos de precipitación estimados que en realidad no ocurrieron). Para este trabajo se empleó el producto de precipitación global IMERG v.06 *Final Run*, el cual es calibrado con datos de GPCC y tiene una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ latitud por longitud y resolución temporal diaria (Huffman y otros, 2019). En este capítulo no se calcularon métricas a largo plazo para los datos IMERG debido a su limitada cobertura temporal, ya que la misión comenzó en 2001. Los datos IMERG empleados se utilizan junto con los datos diarios *in situ* para los análisis relativos al cálculo de la ocurrencia de días lluviosos.

Área inundada

El dataset *Water Occurrence* (presencia de agua) es parte de los productos globales sobre información de agua en superficie *Global Surface Water* (ver Sección 2.2.1). Este producto en particular proporciona la ocurrencia de agua en superficie y su variabilidad intra e interanual, de resolución temporal mensual y de resolución espacial de 30 m.

El conjunto de datos *Water Occurrence* contiene metadatos sobre el número de observaciones que dieron lugar a cada valor de área de agua en superficie por píxel. En base a la información de cada píxel, se calculó una serie temporal de porcentaje de área inundada de la región de interés. De aquí en adelante, se refiere a dicha variable como área inundada, y su unidad se corresponde con porcentaje [%]. En el caso que en que el valor de área inundada de un mes derivara de un porcentaje de observaciones faltantes superior al 50 %, se aplicó un método de interpolación temporal lineal para calcular el valor correspondiente.

Almacenamiento total de agua terrestre

Para esta variable se emplearon datos de las misiones GRACE y GRACE-FO (detalles en la Sección 2.2.1). Este dataset cuasi-mensual presenta resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$ latitud por longitud.

Debido a su baja resolución espacial (300 km), la cual se corresponde con un área mayor a la de la región de interés, y a su limitada cobertura temporal, que comienza en 2002, no se calcularon métricas a largo plazo para el producto GRACE(-FO). Los

datos se emplearon para la interpretación cualitativa de la relación de esta variable con las ya mencionadas.

4.2.3. Evaluación de tendencias e identificación de puntos de cambio de series temporales

Los cambios a largo plazo del periodo de estudio, 1986-2020, se evaluaron mediante la prueba no paramétrica de tendencias de Mann-Kendall (Kendall, 1948). Para estimar la magnitud de cada tendencia se utilizó el método Theil-Sen (Theil, 1950; Sen, 1968). En cuanto a la identificación de punto de cambio en series temporales, el método no paramétrico desarrollado por (Pettitt, 1979) es ampliamente empleado para detectar un único punto de cambio en series temporales de variables hidrológicas (e.g., Ishak y Rahman, 2019; Kocsis y otros, 2020; Ryberg y otros, 2020). En este estudio se utilizó el test de Pettitt para encontrar si la distribución de las series temporales de nivel freático y área inundada presentan un cambio significativo en su comportamiento en un determinado año, y con ello obtener dos subperiodos a analizar.

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1. Aumento de las inundaciones en la región y su relación con el cambio en los regímenes de precipitación

La precipitación anual de la región estudiada no presenta tendencia en el periodo 1986-2020 (Figura 4.2a), como así tampoco ninguno de los meses calendario de manera individual (no se muestra). En cuanto a los extremos diarios, se evaluaron dos índices: la frecuencia de precipitaciones intensas –calculada como el número de días al año con precipitaciones superiores a $10 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$ –, y la intensidad extrema anual de precipitación –definida por el cuantil diario de 0.9, calculado sobre los días con precipitaciones superiores a 1 mm de cada año–. Ninguno de estos dos indicadores puede explicar el aumento de las inundaciones en la región, ya que no muestran ninguna tendencia. Por el contrario, para el mismo periodo, el área inundada media, así como el área inundada máxima y mínima, y el nivel freático presentan aumentos significativos (Figura 4.2b,

4.2c y 4.2d). Por lo tanto, cambios de extremos diarios utilizados por el AR6 del IPCC como proxies del comportamiento de las inundaciones, no son suficientes para reflejar el aumento de dicho extremo hidrológico en la región de estudio.

Adicionalmente se examinaron tres eventos de inundación severos y de larga duración. Según informes y medios locales, en 2014, 2016 y 2019 la región sufrió eventos de inundación que afectaron a su población y producción agropecuaria (Argentina Investiga, 2014; Federación de Centros y Entidades Gremiales de Acopiadores de Cereales, 2016; Bolsa de Cereales de Córdoba, 2019). Los meses en los que se identificaron inundaciones por estas fuentes locales de información, el área inundada fue superior al 0.5 %. En 2014, la región experimentó 10 meses consecutivos de área inundada superior al 0.5 % y, según las fuentes de precipitación diaria, tanto *in situ* como IMERG, 3 de estos 10 meses no presentaron ningún evento de precipitación superior a $10 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$. Respecto a los eventos de inundación de 2016, el año con mayor área inundada del periodo de estudio (Figura 4.2c), 8 meses consecutivos superan el 1.5 % de área inundada. En este caso, 4 meses del total no tuvieron eventos de precipitación observados superiores a $10 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$. El año 2019 presenta 9 meses consecutivos con área inundada superior al 0.5 %, y 2 de estos 9 meses no presentaron ningún evento de precipitación superior a $10 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$. Este es otro indicio de que los extremos diarios de precipitación generalmente utilizados por la comunidad climatológica no son suficientes para detectar inundaciones en llanuras agrícolas estancadas, y su uso aislado podría generar puntos ciegos (*blind spots*) de eventos severos de inundación.

Dado que el aumento del área inundada de la región está relacionado con el ascenso del nivel freático (Kuppel y otros, 2015; Houspanossian y otros, 2023), es decir, con mecanismos más lentos que los extremos de precipitación diaria, se exploró la transición hidrológica analizando procesos más lentos y otros extremos de precipitación que fueran aplicables para captar dicho tipo de comportamiento.

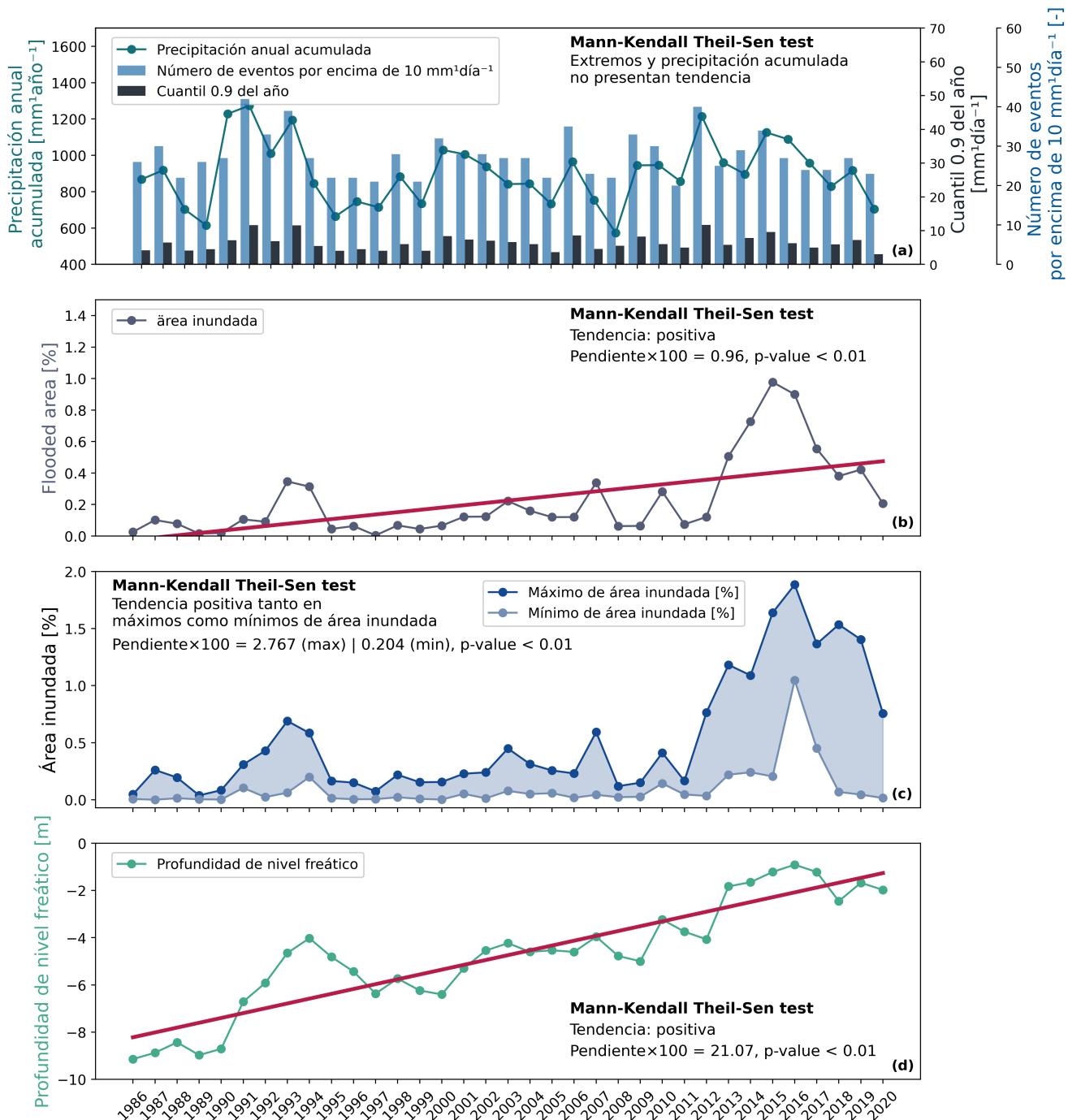


Figura 4.2: Series temporales de (a) la precipitación anual acumulada de Marcos Juárez, así como de la frecuencia e intensidad anual de la precipitación diaria. La intensidad se calculó tomando el cuantil diario de 0.9 sobre cada año. La frecuencia corresponde al número de días por año con precipitación por encima de los 10 mm/día^{-1} . También, series temporales de (b) área inundada anual de la región de estudio, (c) máximo y mínimo anual de área inundada, y (d) nivel freático anual de Marcos Juárez. Se muestra la tendencia y pendiente según el test de Mann-Kendall Theil-Sen para cada una de estas variables.

4.3.2. Transición hidrológica de la región: medir el cambio utilizando evidencia observacional disponible

Para estudiar la transición en el registro de datos disponible, este se dividió en dos subperiodos y se examinaron sus diferencias. Para identificar los subperiodos a explorar se empleó el test de Pettitt, el cual indicó que los puntos de cambio del área inundada y del nivel freático ocurren en el mismo año, 2001 (ambos significativos, $p\text{-value} < 0.01$). En la Figura 4.3 se muestran las anomalías anuales de precipitación, calculadas respecto al periodo de referencia 1986-2020. Antes de 2001 –pre-2001–, se tiene un intervalo de anomalías negativas de precipitación de 1994 a 1999, durante el cual la matriz porosa pudo haber perdido contenido de agua. La anomalía de precipitación de 2000 fue positiva, pero su aporte no fue suficiente para producir un ascenso del nivel freático. Con la anomalía positiva de 2001, el nivel freático ascendió, y después de ese año –post-2001– nunca volvió a un nivel más profundo que -5.50 m (escala mensual, Tabla 4.1). En particular, desde 2012 la napa freática se encuentra más cerca de la superficie de lo que haya estado, y el área inundada alcanzó valores que no había alcanzado anteriormente (Figura 4.3).

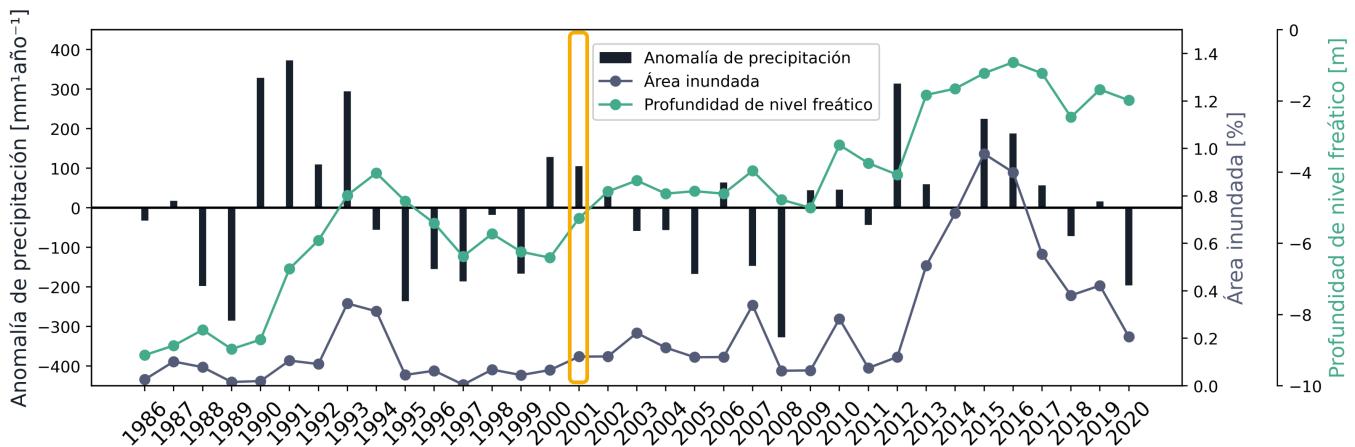


Figura 4.3: Series temporales de los valores anuales de área inundada, profundidad del nivel freático y anomalía de la precipitación. El año del punto de cambio identificado en las series de área inundada y nivel freático, según el test de Pettitt, se resalta en naranja.

La Figura 4.4a muestra el diagrama de dispersión entre los valores mensuales de área inundada y la profundidad del nivel freático, junto a la anomalía mensual de pre-

| | 1986-2001 | 2002-2020 |
|---|-----------|-----------|
| Mínimo mensual de profundidad de nivel frático [m] | -3.70 | -0.31 |
| Máximo mensual de profundidad de nivel frático [m] | -9.29 | -5.30 |
| Mínimo mensual de área inundada [%] | 0.00 | 0.01 |
| Máximo mensual de área inundada [%] | 0.69 | 1.88 |

Tabla 4.1: Mínimo y máximo mensual de profundidad de nivel freático y de área inundada de los períodos 1986-2001 y 2002-2020. En el caso de la profundidad de nivel freático, el mínimo (máximo) se refiere al valor más superficial (más profundo) alcanzado durante todo el periodo pre- y post-2001.

cipitaciones en color, para ilustrar la asociación entre las tres variables. La Figura 4.4b muestra el mismo diagrama de dispersión entre el área inundada y el nivel freático, pero resaltando el punto de cambio. La variación de las aguas superficiales está estrechamente vinculada a la profundidad del nivel freático durante todo el periodo de estudio. En particular, la inundación puede alcanzar el 2 % del total de la región de estudio cuando la napa freática de Marcos Juárez está por encima de los -2 m. Además, cuando la napa freática está por encima de los -2 m, pocos meses tienen menos del 0.5 % de área inundada, lo que representa eventos de inundación severa para la región según informes y medios locales, como se expuso anteriormente. Sin embargo, en la Figura 4.4a se observa que los valores extremos de área inundada ocurren tanto con anomalías positivas como negativas de precipitación, por lo que extremos mensuales de precipitación tampoco serían adecuados como proxy aislado para la identificación inundaciones que ocurren en el correspondiente mes.

Para analizar la variación intranual de las variables, se calculó el ciclo anual del periodo 1986-2020, excepto para el almacenamiento de agua terrestre que se corresponde al periodo 2002-2020 (Figura 4.5). La Figura 4.5 muestra que durante meses del otoño austral (marzo-mayo), cuando se están cosechando los cultivos de verano (Cappelletti y otros, 2022), disminuye la precipitación y aumenta el área inundada, el nivel freático y el almacenamiento de agua terrestre. Durante el período comprendido entre finales de la primavera y del verano austral (noviembre-febrero), cuando la precipitación es máxima y los cultivos de verano de la región se encuentran en plena fase de crecimiento (Cappelletti y otros, 2022), los reservorios de agua disminuyen. Estos

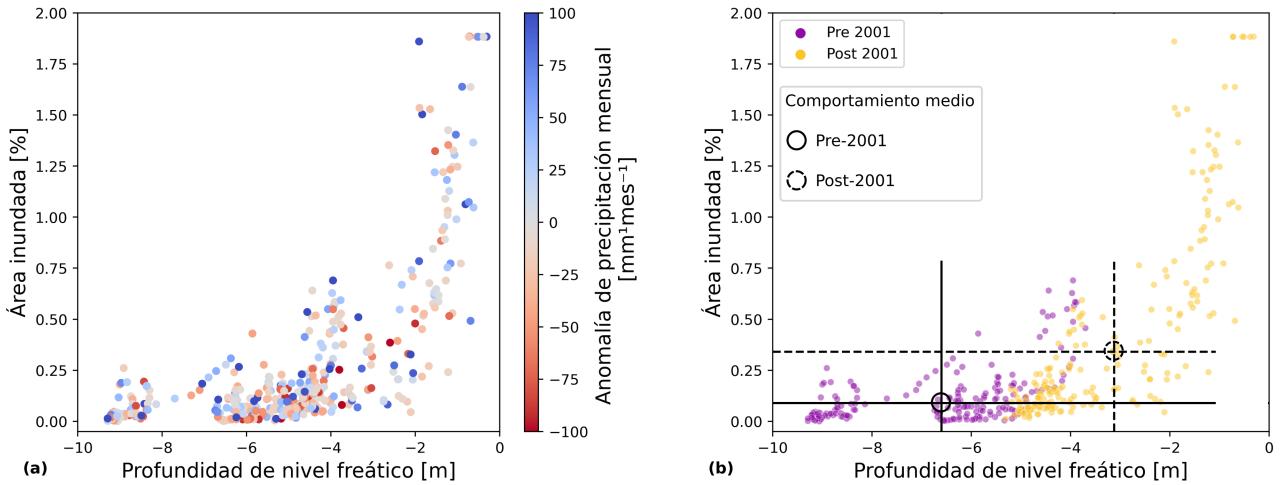


Figura 4.4: Valores mensuales de área inundada en función de los valores mensuales de profundidad del nivel freático. En (a) la barra de color representa la anomalía de precipitación mensual, en (b) el morado indica el periodo pre-2001 y el amarillo el post-2001.

últimos se encuentran en fase entre si, y desfasados de la precipitación. Esto sugiere que el comportamiento estacional de la región está influenciado por factores más allá de la precipitación, como la estacionalidad de los cultivos y la evapotranspiración. En cuanto a la relación intranual entre las variables analizadas, esta podría estar retardada (“laggeada”), es decir, el área inundada de un determinado mes podría estar siendo condicionada por las precipitaciones de meses anteriores. Por esto, se calculó la correlación de Spearman de forma retardada entre las anomalías mensuales de las variables. Estas anomalías se calcularon extrayendo la media de cada mes, considerando cada subperiodo por separado. Teniendo en cuenta el desfase de la precipitación respecto a las demás componentes del ciclo del agua (Figura 4.5), se calculó la correlación entre estas últimas y la precipitación retardada, es decir, de los meses anteriores. Para ello, las series temporales de los reservorios se dispusieron por cada mes del año, y se correlacionaron con la precipitación retardada de 0 a 11 meses. Los resultados de estos análisis mostraron que los valores mensuales de precipitación no se asocian significativamente con los valores mensuales posteriores de los reservorios de agua –superficiales y sub-superficiales–, y no se encuentran diferencias entre los períodos pre- y post-2001. Estos resultados son otro indicio de que extremos mensuales de precipitación no son un indicador adecuado, en cuanto a su uso de manera aislada, de las inundaciones de

los meses posteriores.

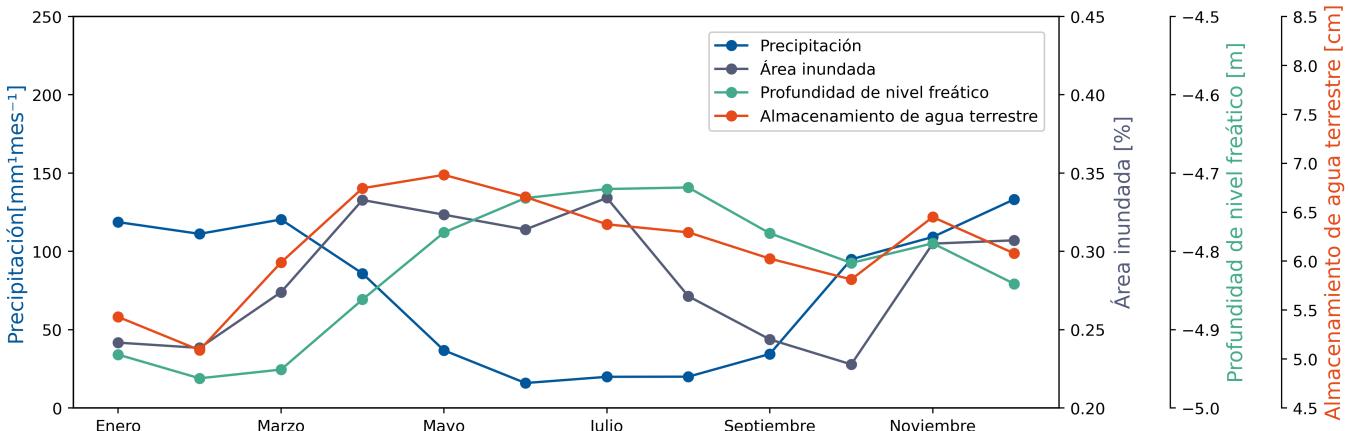


Figura 4.5: Ciclos anuales de área inundada, profundidad de nivel freático, almacenamiento de agua terrestre y precipitación. El periodo correspondiente es 1986-2020, excepto para el almacenamiento de agua terrestre que corresponde al periodo 2002-2020.

Siendo que los reservorios de agua se encuentran en fase, las correlaciones retardadas entre estos se calcularon sobre la serie de anomalía mensual de cada subperiodo (Tabla 4.2). En este caso resultó que los valores mensuales de profundidad de nivel freático y área inundada están correlacionados de forma significativa ($p\text{-value} < 0.01$) hasta un *lag* de 5 meses para el periodo pre-2001. En cuanto al periodo post-2001, las correlaciones entre dichas variables son significativas hasta 11 meses de *lag* –un año–. También resulta que para cada *lag* considerado –de 0 a 11 meses–, el valor de la correlación es mayor durante el periodo post-2001. Por otro lado, la correlación significativa entre la profundidad de napa freática y el almacenamiento de agua terrestre en el periodo post-2001, y la asociación también significativa de estas con el área inundada, sugieren que en la actualidad los reservorios sub-superficiales son componentes relevantes del comportamiento de las inundaciones de la región, incluso a escala de varios meses.

Siendo que los meses de máxima inundación son de abril a julio, y de máxima precipitación de noviembre a marzo (Figura 4.5), se calculó la correlación de Spearman entre la precipitación acumulada de noviembre a marzo y los reservorios de agua en los meses de abril, mayo, junio y julio, por separado, como se expone en la Tabla 4.3. Este análisis muestra que la precipitación acumulada presenta una correlación significativa con el área inundada tanto en el periodo pre-2001 como en el post-2001, y que esta

| | Nivel de napa freática | | Área inundada | | Área inundada | |
|------------------------|------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|-------------|
| | Área inundada | | Almacenamiento de agua terrestre | | Almacenamiento de agua terrestre | |
| | Pre-2001 | Post-2001 | Pre-2001 | Post-2001 | Pre-2001 | Post-2001 |
| 0 meses de <i>lag</i> | 0.50 | 0.83 | - | 0.62 | - | 0.63 |
| 1 mes de <i>lag</i> | 0.46 | 0.78 | - | 0.59 | - | 0.61 |
| 2 meses de <i>lag</i> | 0.42 | 0.73 | - | 0.56 | - | 0.58 |
| 3 meses de <i>lag</i> | 0.37 | 0.68 | - | 0.55 | - | 0.57 |
| 4 meses de <i>lag</i> | 0.33 | 0.64 | - | 0.52 | - | 0.53 |
| 5 meses de <i>lag</i> | 0.28 | 0.60 | - | 0.49 | - | 0.50 |
| 6 meses de <i>lag</i> | 0.23 | 0.57 | - | 0.48 | - | 0.47 |
| 7 meses de <i>lag</i> | 0.20 | 0.55 | - | 0.47 | - | 0.46 |
| 8 meses de <i>lag</i> | 0.16 | 0.54 | - | 0.48 | - | 0.47 |
| 9 meses de <i>lag</i> | 0.14 | 0.52 | - | 0.49 | - | 0.48 |
| 10 meses de <i>lag</i> | 0.11 | 0.52 | - | 0.49 | - | 0.49 |
| 11 meses de <i>lag</i> | 0.09 | 0.51 | - | 0.49 | - | 0.49 |

Tabla 4.2: Correlación de Spearman de forma retardada (“laggeada”) en los periodos 1986-2001 y 2002-2020, entre las anomalías mensuales de los reservorios de agua enumerados. El *lag* (retardo) temporal fue de 0 meses (sin retardo) a 11 meses. Las correlaciones significativas con *p-value* < 0.01 están marcadas en negrita. En el caso de las correlaciones que incluyen el almacenamiento de agua terrestre, éstas se calculan sobre el periodo posterior a 2001 debido a la disponibilidad de estos datos.

asociación es más fuerte en el periodo post-2001. En el caso de la asociación entre la precipitación acumulada y el nivel freático, es no significativa en el período pre-2001, pero significativa en el post-2001, correspondiéndose a correlaciones superiores a 0.5. Las correlaciones con el almacenamiento de agua terrestre resultaron no significativas.

| | Precipitación acumulada | | Precipitación acumulada | | Precipitación acumulada | |
|-------|-------------------------|-------------|-------------------------|-------------|----------------------------------|-----------|
| | Área inundada | | Nivel de napa freática | | Almacenamiento de agua terrestre | |
| | Pre-2001 | Post-2001 | Pre-2001 | Post-2001 | Pre-2001 | Post-2001 |
| Abril | 0.44 | 0.74 | 0.07 | 0.57 | - | 0.00 |
| Mayo | 0.56 | 0.71 | 0.10 | 0.54 | - | 0.07 |
| Junio | 0.59 | 0.70 | 0.16 | 0.51 | - | 0.17 |
| Julio | 0.54 | 0.65 | 0.18 | 0.50 | - | 0.20 |

Tabla 4.3: Correlación de Spearman en los periodos 1986-2001 y 2002-2020 entre la precipitación acumulada de noviembre a marzo y los reservorios de agua de abril, mayo, junio y julio. Las correlaciones significativas de *p-value* < 0.01 están marcadas en negrita. En el caso de las correlaciones que incluyen el almacenamiento de agua terrestre, estas se calculan para el periodo post-2001 debido a la disponibilidad de sus datos.

Estos resultados son consistentes con los de Kuppel y otros (2015), quienes encontraron que las anomalías de precipitación acumulada de 6 meses –el mes actual y los 5 anteriores– son útiles para describir el comportamiento temporal de las inundaciones en zonas adyacentes a la región de estudio de este trabajo. En este sentido, ambos trabajos coinciden en el uso de extremos de precipitación acumulada para el análisis de inundaciones donde la acumulación de excesos graduales de precipitación y el estado freático son relevantes. Por lo tanto, los índices de precipitación para describir el comportamiento de las inundaciones de la región son útiles al incorporar la precipitación acumulada estacionalmente, debido a los mecanismos lentos involucrados.

4.4. Conclusiones

El IPCC utiliza los cambios en los extremos de precipitación diaria para inferir los cambios en las inundaciones. En respuesta, este trabajo subraya la importancia de un análisis regional más profundo, en algunas áreas del mundo donde las inundaciones han aumentado sin cambios en el régimen de la precipitación.

La región aquí estudiada se encuentra en la Llanura Pampeana Argentina, y ha experimentado el ascenso del nivel freático y un aumento del área inundada sin que se haya producido un cambio en el régimen de sus precipitaciones. Estudios previos han destacado las prácticas agrícolas, especialmente la expansión del cultivo de soja, como impulsoras de estos fenómenos. Se analizó esta transición hidrológica separando el periodo de estudio en dos, considerando que tanto el área inundada como el nivel freático presentaron un punto de cambio en el mismo año, 2001. Se muestra que en ninguno de los dos períodos –pre-2001 y post-2001– se tiene asociaciones significativas entre las anomalías mensuales de precipitación y el área inundada. Sin embargo, existe relación significativa entre la precipitación acumulada y el área inundada en ambos períodos. Esta asociación es más fuerte en el periodo post-2001. Además, se expone que las asociaciones del área inundada, el nivel freático y la precipitación acumulada cambiaron del periodo pre-2001 al post-2001. En cuanto al nivel freático, su asociación con la precipitación acumulada sólo es significativa y notable en el periodo post-2001. En ambos períodos, el nivel freático y el área inundada presentan una asociación significativa, sin

embargo en el periodo post-2001 esta asociación es más fuerte. La Figura 4.6 resume esquemáticamente la relación entre área inundada, nivel freático y precipitación en la región, y cómo esta cambió del periodo pre-2001 al post-2001.

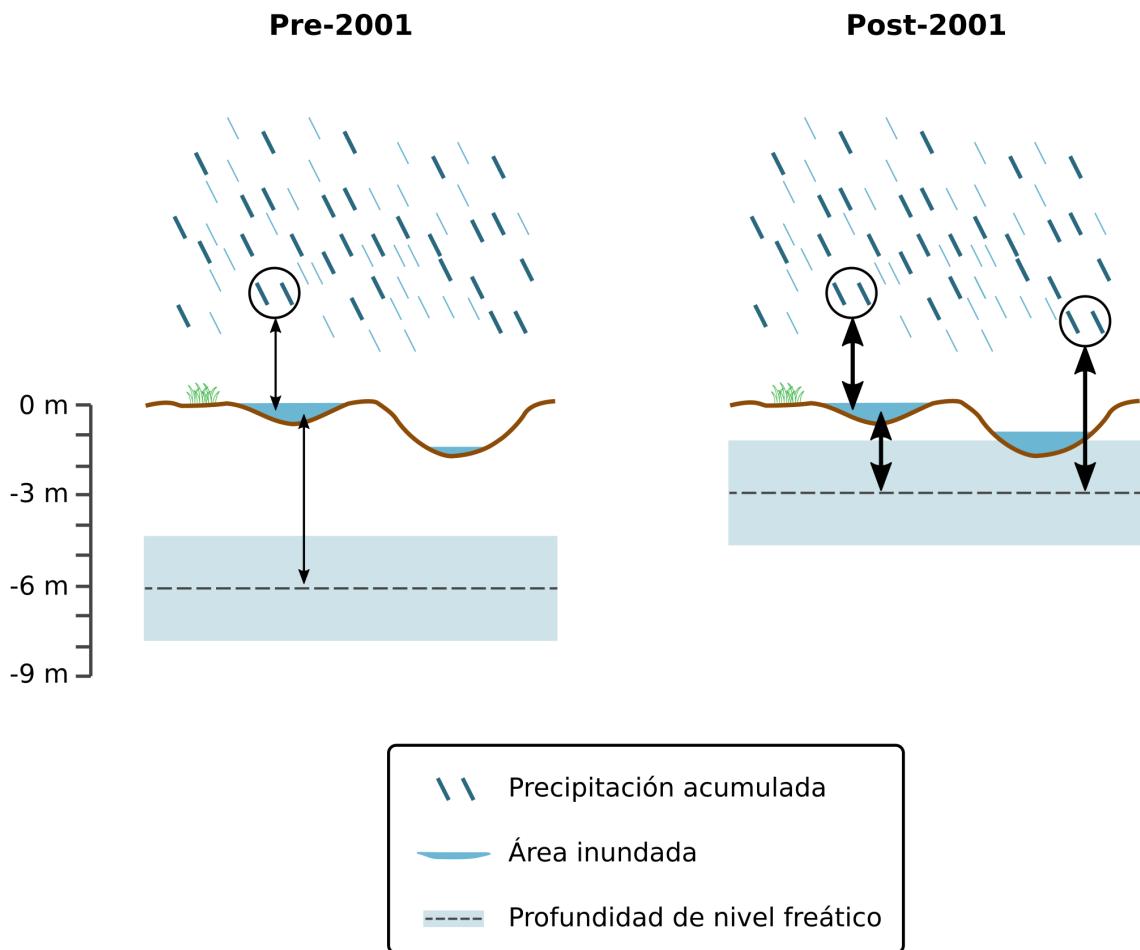


Figura 4.6: Representación esquemática de la asociación entre precipitación acumulada, área inundada y nivel freático en los períodos previo y posterior al 2001. Del periodo pre-2001 al post-2001 las correlaciones entre el nivel freático y el área inundada, y las correlaciones entre la precipitación acumulada de noviembre a marzo y el área inundada de abril, mayo, junio y julio, se han hecho más fuertes (flechas más gruesas). Además, en el periodo post-2001, a diferencia del pre-2001, existe una correlación significativa entre la precipitación acumulada y el nivel freático.

Estos argumentos no niegan en absoluto la importancia y la utilidad de la evaluación de los cambios en los extremos de precipitación diaria, utilizada por el IPCC como indicador de los cambios en el comportamiento de inundaciones a escala global. Sin embargo, al replicar dichos procedimientos a nivel regional y local, las inundaciones

lentas y persistentes aquí analizadas son potencialmente posicionadas en un punto ciego, lo que puede dar lugar a que información destinada a responsables políticos, profesionales y tomadores de decisiones resulte errónea e inadecuada.

Este trabajo, además, pone en evidencia la necesidad de considerar cuidadosamente las interacciones entre el desarrollo agrícola y la dinámica hidrológica, subrayando la importancia de estrategias de gestión integradas en regiones clave para la producción agrícola mundial, como la Llanura Pampeana, especialmente en un contexto de aumento de la demanda mundial de alimentos. Un análisis integrado no sólo debería incluir factores climáticos, sino también ambientales y sociales, como la fenología de los cultivos y las decisiones agroproductivas.

Por último, se resalta la importancia de emplear múltiples líneas de evidencia en regiones donde los datos son escasos, en particular, la incorporación de informes locales de instituciones nacionales y subnacionales como otra pieza de conocimiento de valor fundamental.

Capítulo 5

Efecto de la interacción entre reservorios de agua de llanuras agrícolas anegables en la humedad de sus suelos

Este capítulo se basa en la publicación: Cappelletti, L.M., Sörensson, A.A., Salvia, M., Ruscica, R.C., Spennemman, P., Fernandez-Long, M.E., y Jobbágy, E. 2022. Soil moisture estimates over sporadically flooded farmlands: synergies and biases of remote sensing and in situ sources. *International Journal of Remote Sensing* 43, 19–24, 6979–7001. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2152755>

La humedad del suelo (HS) es fundamental en los flujos verticales de agua desde y hacia la atmósfera, la recarga de aguas subterráneas y los flujos laterales a través del suelo. Asimismo, integra la variación temporal de la precipitación y la evapotranspiración, y responde a la topografía y propiedades físicas del suelo que intervienen sobre dichos flujos (Rodríguez-Iturbe y otros, 1999; Laio y otros, 2001; Rodríguez-Iturbe y otros, 2001; Western y otros, 2004; Vereecken y otros, 2008; Seneviratne y otros, 2010). Este siguiente capítulo emplea la variable humedad de suelo para explorar de manera integral la interacción entre reservorios, mecanismos de entrada y salida de agua del

suelo de llanuras agrícolas de napa poco profundas. Esto se realizó utilizando estimaciones satelitales y mediciones *in situ* de HS como fuentes de información complementarias entre sí. En este contexto y haciendo hincapié en el uso de múltiples líneas de evidencia, aquí también se tiene como objetivo exponer sinergias y sesgos entre sensores remotos y equipos *in situ* al estudiar la humedad del suelo de llanuras agrícolas propensas a inundarse. La región de estudio que aquí se toma es parte de las Llanuras Argentinas.

5.1. Introducción

En los últimos años, se ha avanzado en el estudio de la humedad del suelo superficial (HSS), definida normalmente como la humedad del suelo de los centímetros superiores del suelo, y de gran interés por ser más accesible de estimar que la humedad no superficial del suelo (e.g., Brocca y otros, 2017; Chen y otros, 2019; Peng y otros, 2021). La HSS está relacionada con el inicio y la persistencia de sequías, inundaciones y olas de calor (e.g., Bonan y Stillwell-Soller, 1998; Lorenz y otros, 2010; Chakrabarti y otros, 2014; Martínez-Fernández y otros, 2016; Ganguli y otros, 2020), procesos hidrológicos cruciales para la agricultura (e.g., Rosenzweig y otros, 2002; Mladenova y otros, 2017), el funcionamiento de los ecosistemas (e.g., Porporato y otros, 2003; Manzoni y otros, 2012) y la salud humana (e.g., Bomblies y Eltahir, 2009).

Datos satelitales de humedad del suelo superficial son estimados y distribuidos por misiones como SMOS y SMAP (Sección 2.2.1). Estos programas proporcionan productos globales de HSS correspondientes a una profundidad de penetración media de 5 cm. La resolución espacial original de estos sistemas es de aproximadamente 40 km y su tiempo de revisita es de 2-3 días, aunque en la práctica los registros de datos pueden presentar lagunas de varios meses, debido al mal funcionamiento de los sensores o a actividades de mantenimiento, especialmente durante sus primeros años de vida útil. Se ha hecho un gran progreso en el desarrollo para validar los datos de las misiones SMOS y/o SMAP utilizando HSS *in situ* como datos de referencia (e.g., Gumuzzio y otros, 2016; Portal y otros, 2020), como así en el uso de métodos y métricas que no requieren la disponibilidad de un conjunto de datos HSS de referencia de alta calidad (e.g., Gruber y otros, 2016). Sin embargo, varios de estos estudios eluden las causas

subyacentes de las lagunas de datos de los diferentes productos.

Comprender los atributos de las misiones satélites y de las redes in situ actualmente operativas es relevante para la implementación y empleo de productos novedosos de HSS, como es el caso del proyecto SAOCOM (Satélite Argentino de Observación Con Microondas; Thibeault y otros, 2015). El primer satélite de esta misión fue lanzado en 2018, y el segundo en 2020. El programa SAOCOM es gestionado y operado por la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina (CONAE), y su principal objetivo es evaluar, vigilar y mitigar riesgos (<https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae/misiones-espaciales/saocom>, consultado el 18 de junio de 2024). Adicionalmente, la CONAE ha instalado una red de HSS in situ en la parte central de Argentina, que actualmente cubre un área de 2,500 km² dedicada a la agroproducción. Estas mediciones han estado disponibles progresivamente desde el 2012 aproximadamente. La red ha sido utilizada por Thibeault y otros (2015), Colliander y otros (2017), Spennemann y otros (2020) y Maertens y otros (2021) para evaluar salidas de modelos de superficie terrestre y productos satelitales. No obstante, al examinar las ubicaciones de los dispositivos in situ en el marco de esta tesis, se advirtió que varios se encontraban instalados cerca de residencias rodeadas de vegetación perenne, cuya dinámica a lo largo del año es más uniforme respecto a la de los cultivo anuales que predominan en la región. Este sesgo de ubicación podría afectar los resultados de estudios que pretenden validar datos de satélites y de modelos de superficie empleando la información de dicha red.

El anegamiento es una condición común en los paisajes llanos de todo el mundo –como lo es la región que aquí se estudia– que tiene el potencial de influir en el ciclo de secado del suelo al prolongar la duración de los pulsos de humedecimiento. Las napas freáticas poco profundas son clave en el control de los procesos hidrológicos del suelo, y en las planicies sedimentarias sus efectos no se restringen a zonas ribereñas o tierras bajas, sino que afectan a áreas más extensas (Ferone y Devito, 2004; Wang y otros, 2009; Pirastru y Niedda, 2013; Jobbágy y otros, 2021). En concreto, los cambios en el HSS se deben principalmente a la infiltración de precipitación y a la evapotranspiración, pero las napas freáticas poco profundas también añaden humedad mediante el transporte capilar (Pirastru y Niedda, 2013). Esta interacción puede mantener los

suelos húmedos durante largos períodos, favoreciendo la saturación de la superficie del suelo. Así, la región de estudio es un laboratorio natural ideal para examinar rangos amplios de HSS y para analizar los pulsos de secado y humedecimiento del suelo, en un contexto de interacciones complejas debido a la presencia y acción simultánea de precipitaciones, napas freáticas, efectos de percolación y evapotranspiración. Trabajos anteriores, como los de Fernández-Long y otros (2021) y Ruscica y otros (2020), han explorado la dinámica de la humedad y del secado del suelo en la región, a partir de valores mensuales o de estación calendario de varios años. En este trabajo, se exploran estaciones de cultivo, en lugar de las estaciones calendario, en términos de tasas de entrada y salida de agua del suelo en escalas temporales más cortas, en particular de tipo diario.

En dicho contexto, este capítulo busca dar respuesta a los siguientes cuestionamientos. En primer lugar, ¿cuáles son las situaciones o condiciones que provocan lagunas de datos en los registros de la HSS y cuál puede ser el impacto de no tenerlas en cuenta en el cálculo de estadísticas representativas?. En segundo lugar, ¿pueden estas lagunas proporcionar información sobre las condiciones de HSS de la región o sobre características intrínsecas del producto?. En tercer lugar, se espera que la dinámica de los cultivos y las inundaciones se exprese en la dinámica de la humedad del suelo a escala temporal anual y diaria, sin embargo las estaciones *in situ* fueron instaladas cerca de viviendas y no en campos cultivados propensos a inundarse. En este sentido, se evalúa el sesgo introducido por la ubicación de los dispositivos *in situ* en una cobertura de suelo que no es representativa de la región. Esta última cuestión es clave para las planicies sedimentarias que presentan sistemas hidrológicos estancados y aguas subterráneas poco profundas (Fan y otros, 2013), particularmente en aquellos casos en los que la agricultura es la cobertura dominante. Para abordar estas preguntas científicas, se emplean datos de HSS de una red *in situ* perteneciente a CONAE (dispositivos instalados a 5 cm de profundidad) y de las misiones satelitales SMOS y SMAP (profundidad de penetración media de aproximadamente 5 cm).

5.2. Materiales y metodología

5.2.1. Sitio y periodo de estudio

El área de estudio de este capítulo se ubica en el sudeste de la provincia de Córdoba, a (-32.70, -33.17) de latitud y (-62.25, -62.77) de longitud (Figura 5.1a). La estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional más cercana se encuentra en Marcos Juárez, a una distancia de 45 km. Dicha estación indica que el clima medio en esta zona inundable alcanza temperaturas máximas de 31°C en enero y mínimas de 4°C en julio, y se caracteriza por veranos húmedos (alrededor de $4.2 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$ de precipitación) e inviernos secos (por debajo de $1 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$), como se ya se indicó en la Sección 2.3 y se muestra en la Figura 5.1b. El suelo de esta región se utiliza mayoritariamente para la agricultura sin irrigación. El mismo se encuentra cubierto casi exclusivamente por cultivos anuales, dominados por soja y maíz como cultivos de verano, acompañados en menor medida por trigo como cultivo de invierno.

El análisis se centra en el periodo comprendido entre abril de 2015 y noviembre de 2019, limitado principalmente por la disponibilidad de datos de la misión SMAP (Sección 2.2.1). Para caracterizar las temporadas de cultivo de este área de estudio, se utilizó el ciclo anual del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de la misión MODIS (Figura 5.1b, Sección 2.2.1). La temporada de barbecho (temporada de inactividad para los cultivos de verano) se definió del 1 de mayo al 30 de agosto, y la temporada de cultivo activo del 1 de diciembre al 30 de marzo. Aunque los cultivos de invierno crecen durante esta ventana temporal, se cultivan en una pequeña fracción del área de estudio (esto explica el máximo secundario en la serie de NDVI que ocurre en agosto-octubre, Figura 5.1b). El periodo de estudio incluye cuatro temporadas de crecimiento (primavera y verano austral) y cinco temporadas de barbecho.

5.2.2. Fuentes de información de humedad de suelo

Mediciones in situ

Se utilizó una red de 14 dispositivos in situ de humedad del suelo (Stevens Hydra Probe II). Estos sensores proporcionan mediciones cada hora a 5 cm de profundidad

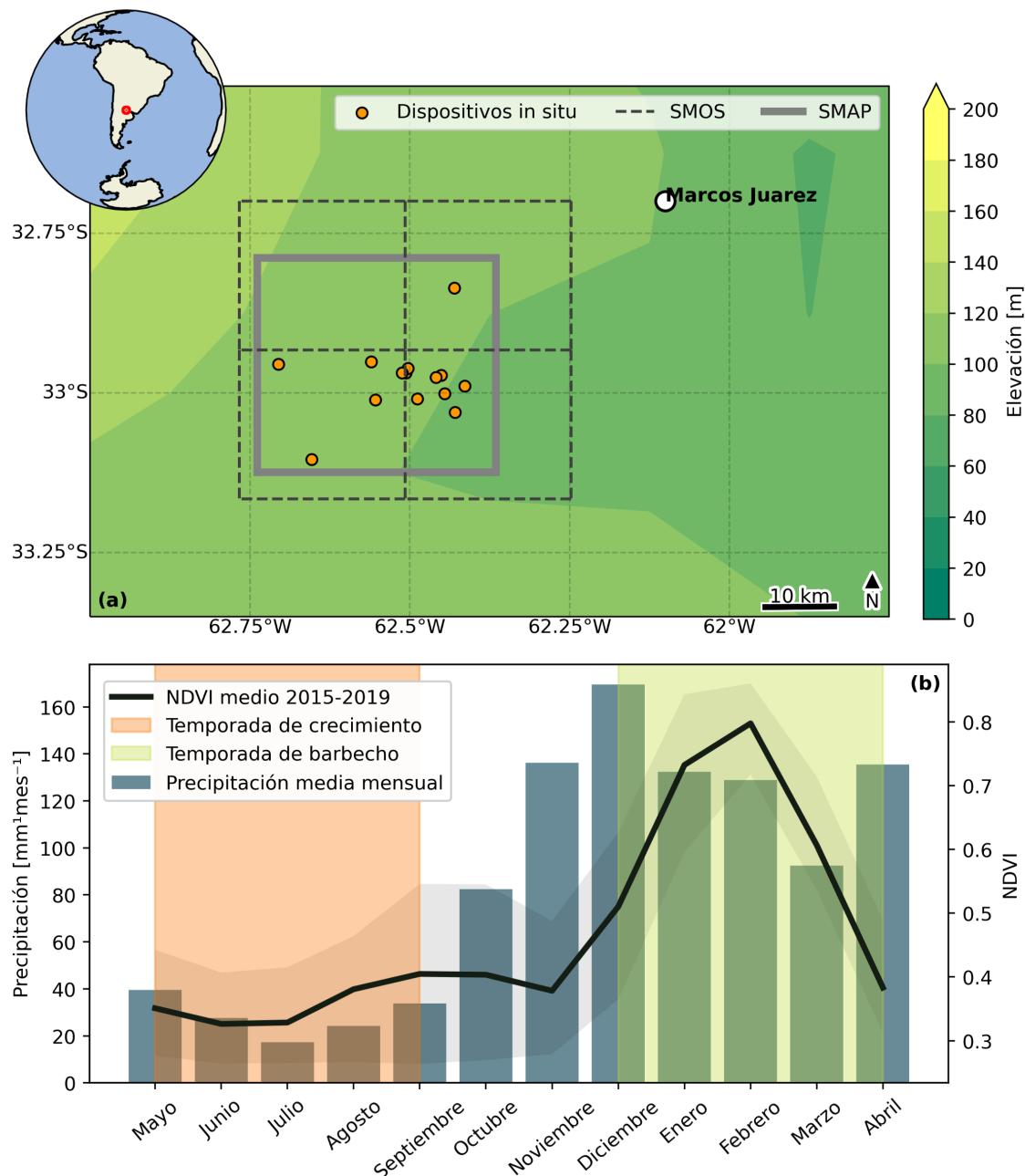


Figura 5.1: (a) Mapa topográfico [m] del dominio de estudio y distribución de las fuentes de información: sitios in situ (14), píxeles SMOS (4) y píxel SMAP (1). (b) Ciclo anual de precipitación en el período 2015-2019. También se muestran los valores medios, máximos y mínimos mensuales de NDVI del período 2015-2019.

con una precisión de $\pm 0.01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. En este estudio, se utilizó un valor de HSS por día de los 14 sitios (Figura 5.1a). En particular, se emplearon las mediciones de las 7 AM para coincidir con las pasadas de los satélites SMOS y SMAP por el sitio de estudio. Los datos de HSS in situ fueron proporcionados por CONAE.

Con el fin de facilitar el acceso a los dispositivos in situ para su mantenimiento, los mismos se instalaron cerca de granjas/fincas/residencias ($< \sim 250 \text{ m}$), que suelen estar situadas a elevaciones relativamente altas –respecto a la planicie que caracteriza a la región–, fuera de la cobertura dominante –cultivo– y cercanos a vegetación perenne –e.g., árboles y pastos–. La Figura 5.2 muestra la ubicación de algunos de los sitios analizados en fotografías tomadas en distintas épocas del año.



Figura 5.2: Ubicación de algunos de los sitios in situ que se incluyeron en el estudio (Google Earth, 2022).

Estimaciones satelitales

Se emplearon estimaciones de HSS de dos misiones satelitales. Una es la misión SMOS, y la otra es la misión SMAP. En la Sección 2.2.1 se encuentra la descripción de las mismas. La cobertura sobre el área de estudio es de aproximadamente 2 observaciones cada 3 días, considerando individualmente los modos de pasada ascendente o descendente de los sensores. En este trabajo se utilizaron los datos de las pasadas descendentes de SMAP y las pasadas ascendentes de SMOS, que corresponden a las 6 AM hora solar local.

5.2.3. Precipitación, NDVI y producto de ocurrencia de agua

Los eventos de precipitación en el periodo de estudio se examinaron utilizando datos de precipitación acumulada diaria ($\text{mm}^1\text{día}^{-1}$) de la misión TRMM (Sección 2.2.1). La precipitación diaria se calculó sobre la región de estudio, que está cubierta por 4 píxeles TRMM.

Las temporadas de crecimiento de los cultivos se identificaron utilizando el producto de NDVI de la misión MODIS (Sección 2.2.1).

Para examinar la distribución espacio-temporal de las inundaciones de la región de estudio, se hizo uso del producto *Water Occurrence* (ocurrencia de agua) que describe la frecuencia en la que agua abierta se encontró presente en la superficie en un periodo determinado, con una resolución espacial de 30 m y una resolución temporal cuasi-mensual. Este producto es uno de los brindados por parte del dataset *Global Surface Water* (Sección 2.2.1).

5.2.4. Tratamiento de datos de humedad del suelo: filtrado y cálculo de medias

Los procedimientos descritos a continuación se aplicaron utilizando datos HSS expresados como $\text{m}_\text{agua}^3 \text{m}_\text{suelo}^{-3}$ (m^3m^{-3} en adelante). La HSS volumétrica también será expresada como θ , dependiendo el contexto. Los 14 sitios in situ se encuentran dentro de un área cubierta por 4 píxeles SMOS y 1 píxel SMAP (Figura 5.1a). Para garantizar que las estimaciones de HSS satelitales se enconrasen dentro del rango dinámico válido

de cada misión, se eliminaron aquellos valores por fuera de los umbrales de HSS mayor y menor según los metadatos de cada una de las misiones.

Se generó una serie temporal de θ para cada fuente de información, estableciendo un procedimiento para decidir si calcular o no la media diaria de un determinado día. Para ello, se consideraron dos requisitos: (1) sólo permitir las fechas que presenten al menos un número mínimo de estaciones/píxeles para calcular la media y (2) perder un bajo número de días con datos. El procedimiento se basó en el análisis de la distribución de frecuencia de la disponibilidad de datos de cada fuente de información (véase la Tabla 5.1). De los 1705 días del periodo completo, las mediciones *in situ* estuvieron totalmente ausentes en menos del 3 %, y disponibles para al menos 7 dispositivos en el 83 % de las fechas (la Figura 5.3 muestra la serie temporal HSS para cada dispositivo *in situ*). Esta condición de un número mínimo de dispositivos disponibles se utilizó para el cálculo de la media, ya que los datos de 6 o menos dispositivos sólo cubren el 14 % de las fechas. En el caso de SMOS, el 53 % del número total de días no presentaban datos en ninguno de los píxeles, y el 36 % de los días tenían estimaciones para los 4 píxeles considerados. Para evitar datos espurios, en el caso de SMOS la media se calculó sobre los días que presentan estimaciones del número total de píxeles. Para SMAP se estudia un único píxel, para el que se dispone de datos para el 46 % de los días del periodo de interés (tanto SMOS como SMAP tienen \sim 53 % de días sin ninguna estimación).

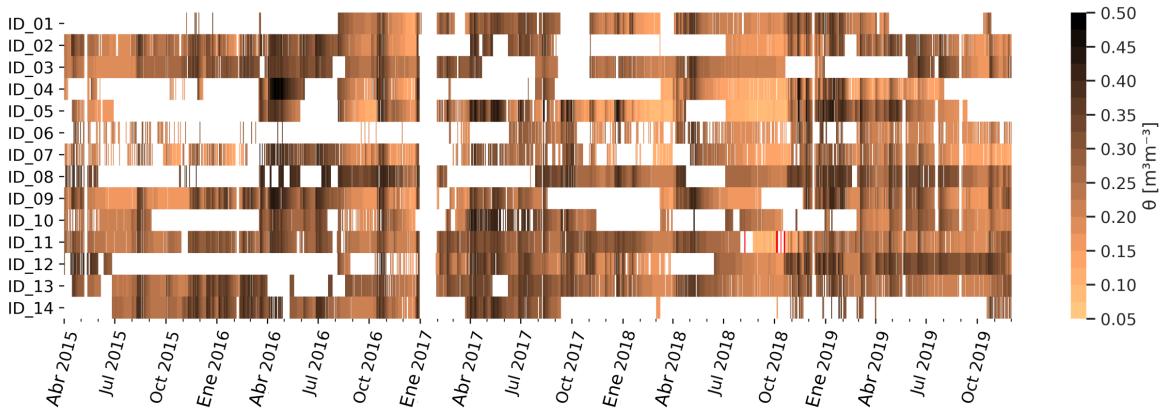


Figura 5.3: Series temporales diarias *in situ* de θ [m^3m^{-3}]. Los valores se corresponden a registros los registros de las 7 AM.

Para explorar el impacto de las lagunas de datos en las series de HSS, se consideró un periodo de más de un año en el que SMOS tiene una baja frecuencia de datos

| | | Abril 2015-Noviembre 2019 1705 días | | |
|---------------|-----------------------------------|--|---|---|
| Fuente de HSS | Dispositivos / píxeles analizados | Días sin disponibilidad de datos para ningún dispositivo/píxel | Días con disponibilidad de datos en todos los píxeles | Días con disponibilidad de datos para al menos siete dispositivos |
| In situ | 14 | 43 (3 %) | - | 1413 (83 %) |
| SMOS | 4 | 904 (53 %) | 617 (36 %) | - |
| SMAP | 1 | 921 (54 %) | 784 (46 %) | - |

Tabla 5.1: Resumen de la disponibilidad de datos del periodo de estudio por fuente de información.

disponibles (periodo BF) en comparación con el resto del periodo de estudio (periodo AF), y en el que tanto las series temporales *in situ* como SMAP presentan datos. Las fechas sin datos en SMOS se llenaron con valores generados a partir de las series temporales *in situ* y SMAP, obteniendo así dos nuevas series: SMOS rellenada por los datos *in situ* (SMOS_{insitu}) y la otra por los datos SMAP (SMOS_{smap}). Uno de los puntos clave para construir las series SMOS_{insitu} y SMOS_{smap} fue definir cómo obtener los valores para reconstruir el registro de SMOS durante el periodo BF. Dado que el coeficiente de correlación de Pearson (R) entre los datos diarios SMOS e *in situ*/SMAP para todo el periodo de estudio es de R = 0.79 y R = 0.78 (*p-value* < 0.01), respectivamente, los valores “de relleno” se calcularon mediante una regresión lineal. Las regresiones se implementaron a lo largo de todo el periodo de estudio. Como los valores “de relleno” se utilizaron para reconstruir la serie SMOS, estos fueron los datos considerados como la variable dependiente, y los datos *in situ*/SMAP como la independiente para calcular cada una de las ecuaciones lineales. El otro punto a definir fue a cuáles fechas del periodo BF se les asignaría un valor “de relleno”. Esto se estableció a partir de la exploración de la distribución de los datos SMOS durante el periodo AF, que mostró que las fechas con datos suelen estar separadas por una única fecha sin datos. Utilizando estos criterios, se estimaron las fechas para las que el periodo BF debería contar con datos. Las series SMOS_{insitu} y SMOS_{smap} se construyeron llenando estas fechas con los correspondientes valores de HSS, calculados mediante las regresiones lineales estimadas y el dato de HSS *in situ*/SMAP de dicha fecha.

5.2.5. Tasas de humedecimiento y secado del suelo superficial

La tasa de secado del suelo en eventos en que la matriz porosa pierde contenido de agua se ha utilizado para caracterizar la dinámica del HSS (Rondinelli y otros, 2015; Shellito y otros, 2016). Dado que la región de estudio es propensa a inundaciones y encharcamientos, se analizó el contenido de agua del suelo más allá del enfoque de secado luego de un evento de lluvia. En este contexto, se calcularon las tasas discretas $-d\theta/dt$ de humedecimiento (TH) y secado (TS) del suelo en todo el periodo, mediante el método de diferencias finitas dado por (Shellito y otros, 2016):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_{n+1} - \theta_n}{t_{n+1} - t_n}$$

donde n y $n + 1$ son datos consecutivos dentro del periodo de estudio, θ es la HSS diaria y t es la fecha correspondiente a θ . En el caso de la información satelital HSS, los datos consecutivos no corresponden a días inmediatos entre si, debido a los tiempos de revisita de los satélites (Sección 5.2.2). Siguiendo a Shellito y otros (2016), las tasas $d\theta/dt$ solo se calcularon cuando $t_{n+1} - t_n \leq 3$ días, para evitar tasas de valores espurios. Cada tasa corresponde a un día $-t_n-$ del periodo. Las tasas $d\theta/dt$ positivas representan pulsos de humedecimiento y las negativas indican pulsos de secado.

5.3. Resultados

5.3.1. Series temporales de humedad de suelo: múltiples fuentes de información benefician el entendimiento de las lagunas de datos

La Figura 5.4 muestra las series temporales diarias de θ generadas para cada fuente de datos. Los periodos de alto/bajo contenido en agua del suelo coinciden en los distintos productos HSS. Estos periodos también son consistentes con la ocurrencia de precipitaciones superiores a $10 \text{ mm}^1\text{día}^{-1}$ (Figura 5.4a), umbral de precipitación mínima utilizado por Ruscica y otros (2020) para definir los pulsos de humedecimiento.

La serie temporal *in situ* experimenta lagunas de datos que no presentan un patrón claro. Esta situación se produce debido a la irregularidad de cada dispositivo individual en cuanto a intervalos de datos ausentes o disponibles, como puede verse en la Figura 5.3. Según los metadatos de los dispositivos, las lagunas se atribuyen a fallas técnicas.

La frecuencia de datos θ en la serie temporal de SMOS durante el periodo marzo 2016-mayo 2017 es inferior a la frecuencia global de 3 días (Figura 5.4b) esperada por la misión (Kerr y otros, 2010). SMOS es sensible a la interferencia de radiofrecuencia (*radio-frequency interference*, RFI), por lo que la misión desarrolla continuamente he-

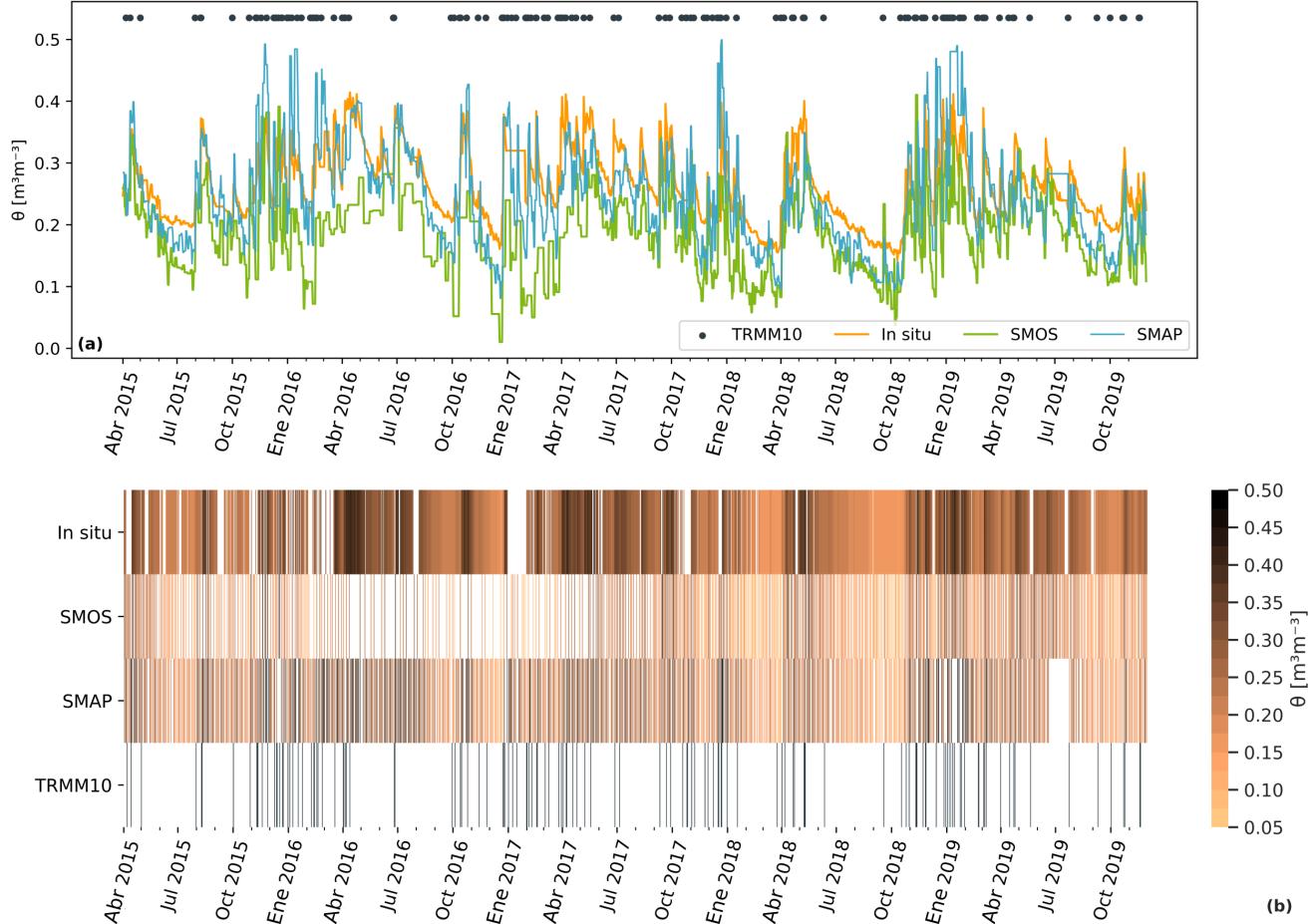


Figura 5.4: Series temporales diarias de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] de las tres fuentes de información analizadas tras calcular la media de los sitios in situ/píxeles, como se describe en la Sección 5.2.4. El panel (a) presenta las series temporales en el formato usual. El panel (b) presenta las series temporales de forma tal de facilitar la identificación de lagunas en los registros de datos. En ambos paneles, la etiqueta TRMM10 indica la presencia de precipitaciones superiores a $10 \text{ mm}^1 \text{día}^{-1}$.

rramientas para localizar, mitigar y monitorizar la misma (Oliva y otros, 2016). Una de estas herramientas es la probabilidad de interferencia de radiofrecuencia, disponible para la misma cuadrícula espacio-temporal del producto de HSS de SMOS. Haciendo uso de este producto, se calculó la probabilidad de RFI de marzo de 2016-mayo de 2017, por un lado, y para el resto del periodo, por otro. Esta magnitud se contrastó con el porcentaje de datos de θ disponibles para los mismos periodos. De marzo de 2016 a mayo de 2017, la región de estudio cuenta con un 71.75 % de datos θ SMOS y una probabilidad de RFI de 0.33. Para el resto del periodo, la disponibilidad de datos θ SMOS es del 94.54 % con una probabilidad RFI asociada de 0.07. Esto sugiere que la baja cantidad de datos θ SMOS durante marzo de 2016-mayo de 2017 se debe a interferencias de radiofrecuencia sobre la zona de estudio. SMAP no muestra este comportamiento, posiblemente porque el sistema satelital SMAP cuenta con filtrado y mitigación de RFI a bordo (Al Bitar y otros, 2017). Este periodo fue anómalamente húmedo, según los datos tanto θ in situ como θ SMAP, lo que puede representar un sesgo importante en las condiciones de humedad estimadas por SMOS, dado que el intervalo de baja frecuencia de datos θ representa una cuarta parte del periodo completo de estudio.

Para ejemplificar el impacto que este tipo de sesgo puede tener en las estadísticas representativas de HSS, se comparó la serie temporal SMOS con las series temporales reconstruidas SMOS_insitu y SMOS_smap. Dado que la temporada de cultivo fue la que presentó menos datos SMOS en el periodo BF, se ejemplificó la situación usando dicha temporada. Se encontró que para estadísticas de primer orden la laguna de datos introduce sesgo. En el caso de la media diaria de la temporada de cultivo 2016-17 de SMOS, esta resulta ser de $0.11 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, mientras que tanto para SMOS_insitu como SMOS_smap es de $0.15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$. En cuanto a la desviación estándar diaria, es de $0.05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ para SMOS, mientras que tanto para SMOS_insitu como SMOS_smap es de $0.07 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$.

SMAP presenta dos largas lagunas de datos en su registro: durante enero de 2019, y del 20 de junio de 2019 al 23 de julio de 2019. Esta última laguna fue causada por la entrada del sistema SMAP en Modo Seguro, en el que todos los instrumentos se apagaron y no se recogieron datos (<https://nsidc.org/data/smap/news>, consultado el 18

de junio de 2024). Sin embargo, durante la primera laguna mencionada, se registraron intensas inundaciones en la región reportadas por varias instituciones provinciales y nacionales (Departamento de Información Agropecuaria, Bolsa de Cereales de Córdoba, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Servicio Meteorológico Nacional). Además, tanto los datos *in situ* como los SMOS revelan un alto contenido de agua en el suelo durante enero de 2019. En vista de la ocurrencia simultánea de baja frecuencia de datos y alto contenido de agua en el suelo en dicho periodo, se examinó el valor máximo del rango dinámico de HSS SMAP. El umbral máximo considerado válido por la misión SMAP es de $0.50 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, y datos de HSS de valor superior a este fueron eliminados durante la etapa de preprocesamiento (Sección 5.2.4). El análisis de los datos SMAP sin preprocesamiento, es decir, los que incluyen valores mayores al límite superior registrado como válido, reveló que la laguna de datos en enero de 2019 no ocurre, permitiendo identificar la respuesta del sistema SMAP al contenido elevado y prolongado de agua en el suelo.

5.3.2. Comparación entre mediciones *in situ* y estimaciones satelitales: ¿qué nos dice una fuente de datos sobre la otra?

Dinámica de la humedad del suelo superficial

Los diagramas de dispersión de θ *in situ* y θ satelital para todo el período de estudio (Figuras 5.5a y 5.5d), así como para las temporadas de barbecho (Figuras 5.5b y 5.5e) y de crecimiento (Figuras 5.5c y 5.5f) muestran que SMOS tiene muy pocos registros por encima de la línea 1:1 respecto a las mediciones *in situ*. Por el contrario, SMAP muestra valores mayores que SMOS por cada medición *in situ*. Este efecto, que es más notable al aumentar la HSS *in situ*, está en línea con el estudio de Portal y otros (2020), donde los autores mostraron que SMAP es generalmente más húmedo que SMOS en una región productora de cereales de secano de la Península Ibérica. El comportamiento notado también es coherente con otros trabajos, como las contribuciones de Cui y otros (2017) y Dall'Amico y otros (2011), en los que se reporta una subestimación de las estimaciones de humedad del suelo de SMOS con respecto a las mediciones *in situ*,

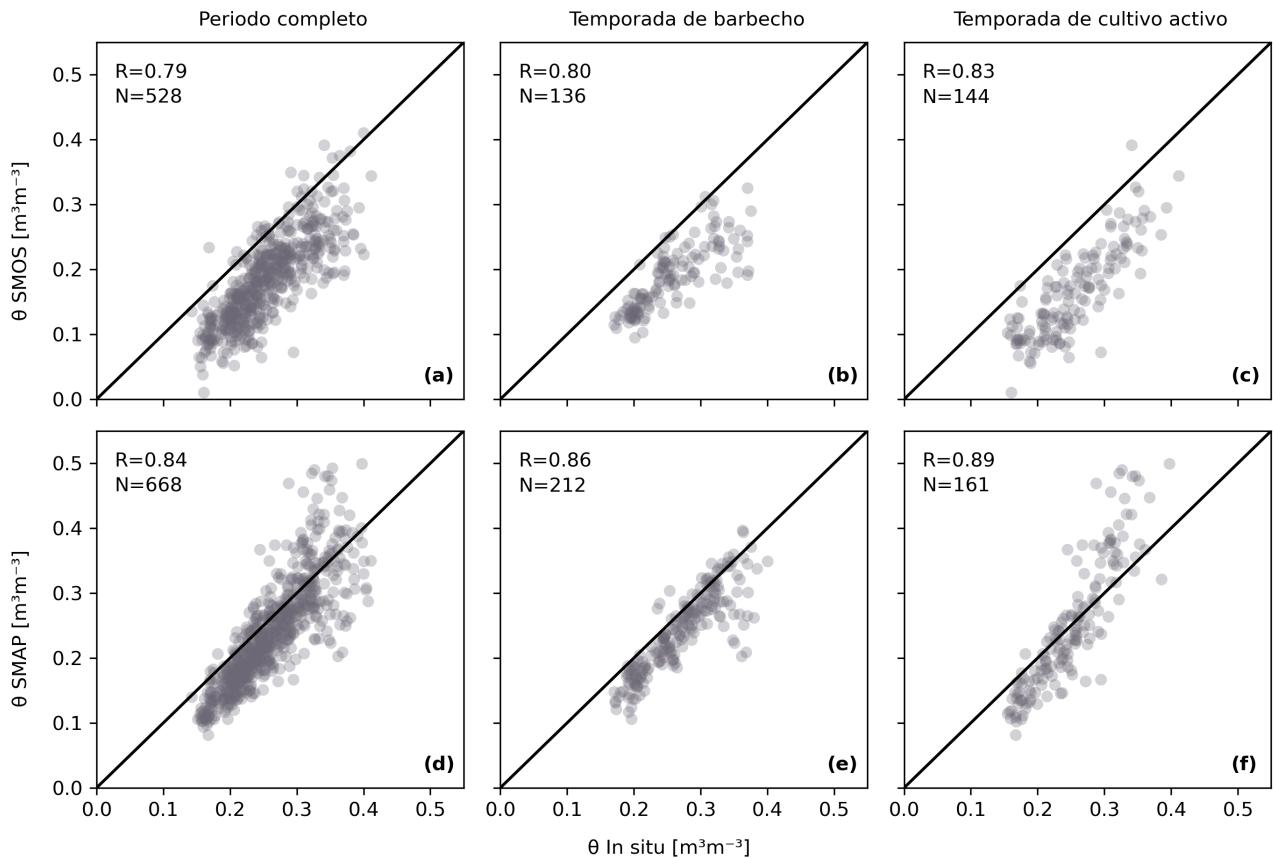


Figura 5.5: Diagrama de dispersión entre los datos in situ y las estimaciones satelitales θ [$m^3 m^{-3}$]. Se marca la línea de identidad 1:1. Paneles (a), y (d) refieren al periodo completo. Paneles (b) y (e) a la temporada de barbecho, (c) y (f) a la temporada de cultivo activo. De arriba a abajo: SMOS y SMAP. Cada diagrama de dispersión incluye el número de muestras (N) y el correspondiente coeficiente de correlación de Pearson (R) para $p\text{-value} < 0.01$.

es decir, un sesgo seco por parte de los datos SMOS.

Los coeficientes de correlación permiten advertir que SMAP se ajusta mejor que SMOS a los datos in situ. En el estudio de Yang y otros (2020), SMOS y SMAP se evalúan frente a mediciones de HSS de varios dispositivos in situ en las Grandes Llanuras de Estados Unidos. Considerando una red ubicada en una cubierta de cultivo de secano, los autores informaron un rendimiento superior de SMAP descendente ($R = 0.90$, $N = 566$) respecto a SMOS ascendente ($R = 0.80$, $N = 598$), resultado coherente con el que aquí se obtuvo (Figuras 5.5a y 5.5d).

Comparando las temporadas de crecimiento y barbecho, el rango dinámico de θ es más amplio en la temporada de cultivo. Esta última coincide con la estación de lluvias

–por ello el umbral superior de θ es mayor respecto al de la temporada de barbecho–, cuando las temperaturas son más cálidas, y los cultivos están muy activos, es decir, la evapotranspiración es elevada –la pérdida de agua de la matriz porosa a través de este mecanismo hace que el umbral inferior de θ de la temporada de cultivo sea menor–. Las dos temporadas identificadas presentan dinámicas diferentes, lo cual se advierte en los gráficos de dispersión. En todos los casos, el ajuste es superior cuando se separan las temporadas de barbecho y de crecimiento, en comparación a tratar el periodo completo de manera conjunta (Figura 5.5). Ambas fuentes satelitales muestran una concordancia ligeramente mejor con los datos θ in situ para la temporada de cultivo respecto a la de barbecho.

Para comprender mejor la dinámica de θ durante las temporadas de cultivo identificadas, se calcularon las funciones de densidad de probabilidad (*probability density functions*, PDFs) de θ durante la temporada barbecho (Figura 5.6a) y la de crecimiento (Figura 5.6b), para los datos in situ, SMOS y SMAP. Las PDFs de las tres fuentes de θ durante la temporada de barbecho muestran una distribución bimodal, mientras que las PDFs de la temporada de cultivo tienen un comportamiento unimodal. El comportamiento bimodal de la temporada de barbecho se debe a los dos años secos (2015 y 2018) y a los dos años húmedos (2016 y 2017) contenidos en el período (análisis no mostrado).

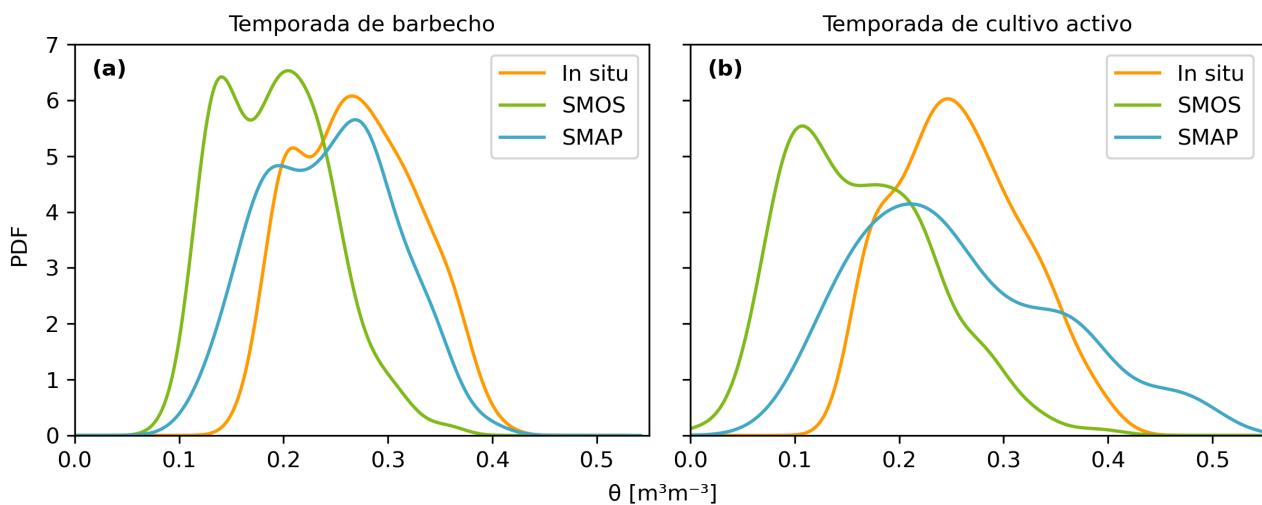


Figura 5.6: Distribución de densidad de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] de las fuentes de información analizadas. Panel (a) refiere a la temporada de barbecho, el (b) a la temporada de cultivo activo.

En los productos satelitales, los valores más comunes de las PDFs –es decir, la moda– son mayores en la temporada de barbecho respecto a la de crecimiento (Tabla 5.2), lo que sugiere una mayor retención de humedad en la primera. Sin embargo, las PDFs de los sistemas satélites en la temporada de cultivo tienen una distribución sesgada a la derecha (*right-skewed distribution*), con valores θ máximos más altos que en la de barbecho (Figura 5.6). Esta diferencia entre las temporadas de barbecho y de crecimiento no está presente en los datos *in situ*.

Tasas de humedecimiento y secado del suelo superficial

La moda de las PDFs de los datos satelitales es alrededor de $0.10 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ más baja para la temporada de cultivo activo que para la de barbecho (Figura 5.6), es decir, durante la estación seca el valor diario de humedad del suelo más frecuente es superior al de la estación lluviosa (Figura 5.1b). Los datos *in situ* presentan la misma moda tanto para la temporada de cultivo como para la de barbecho, lo que indica una diferencia respecto a los productos satelitales. Para examinar las tasas diarias de entrada y salida de agua del suelo, se calcularon las tasas de humedecimiento y secado (Sección 5.2.5). La Figura 5.7 muestra las tasas $d\theta/dt$ de todas las fuentes para todo el periodo (Figuras 5.7a, 5.7d y 5.7g), para la temporada de barbecho (Figuras 5.7b, 5.7e y 5.7h) y para la temporada de cultivo (Figuras 5.7c, 5.7f y 5.7h). En todos los paneles de la Figura 5.7, el límite superior de $d\theta/dt > 0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$ –tasa de humedecimiento– indica la magnitud de la mayor entrada de agua en el suelo en un día, mientras que el límite inferior de $d\theta/dt < 0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$ –tasa de secado– indica la máxima pérdida de agua del suelo en un día.

La Figura 5.7 muestra que, tanto en las mediciones *in situ* como en las estimaciones de satélite, las tasas bajas –valores cercanos a $0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$ – son las más comunes. Además, las tres fuentes de información muestran que cuanto menor es el contenido de agua en la matriz porosa, mayor es su capacidad de humedecimiento –cuando θ se approxima a $0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, aumenta el número de ocurrencias del valor $d\theta/dt > 0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$ –. Por el contrario, valores más altos de θ muestran tasas más frecuentes de $d\theta/dt < 0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$. Esto significa que un mayor contenido de agua en el suelo aumenta la capacidad de secado del mismo. En este sentido, los productos concuerdan entre sí y

| Temporada de barbecho | | Temporada de cultivo activo | | |
|-----------------------|--|--|--|--|
| | Moda de la distribución de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] | Máximo valor de la distribución de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] | Moda de la distribución de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] | Máximo valor de la distribución de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] |
| In situ | 0.26 | 0.40 | 0.25 | 0.41 |
| SMOS | 0.20 | 0.35 | 0.10 | 0.40 |
| SMAP | 0.27 | 0.40 | 0.20 | 0.50 |

Tabla 5.2: Resumen de las modas y valores máximos de las PDFs de θ [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] de las temporadas de barbecho y de cultivo activo (Figura 5.6).

reflejan el comportamiento que se espera a partir de consideraciones teóricas (Brooks, 1965; Van Genuchten, 1980).

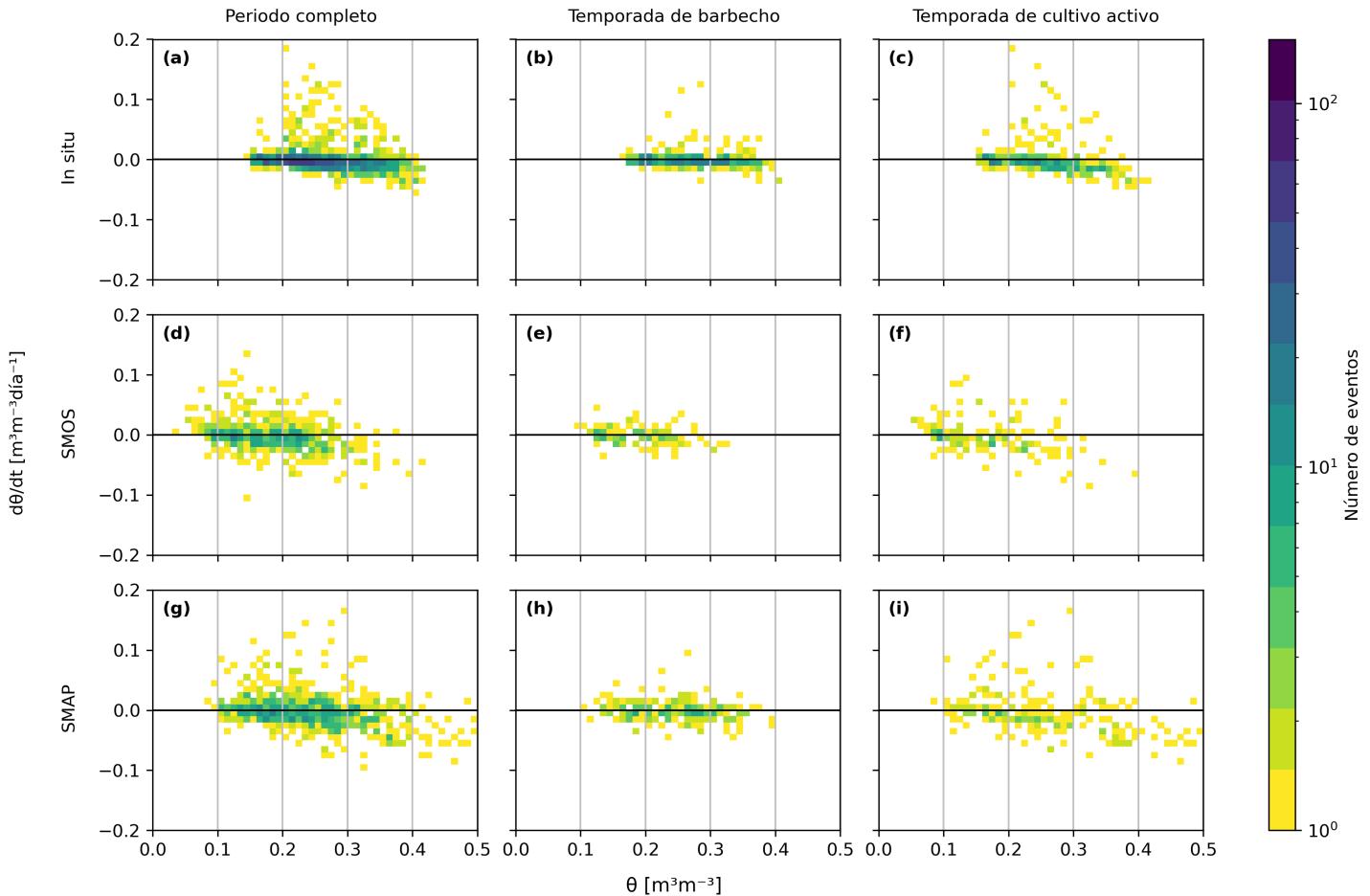


Figura 5.7: Mapas de calor de la tasa $d\theta/dt$ [$m^3 m^{-3} \text{día}^{-1}$] en función de θ [$m^3 m^{-3}$] de las mediciones in situ, y de las estimaciones SMOS y SMAP. La barra de color indica el número de muestras en escala logarítmica, incluidas en un área de $0.01 m^3 m^{-3} \text{día}^{-1} \times 0.01 m^3 m^{-3}$. Los paneles (a), (d) y (g) refieren al período completo; (b), (e) y (h) a la temporada de barbecho; y (c), (f) e (i) a la temporada de cultivo activo.

Dado que la temporada de cultivo es parte del periodo de lluvias y que las tasas de humedecimiento se corresponden a las entradas de agua en el suelo, es de esperar que las tasas de humedecimiento durante la temporada de cultivo sean superiores a la de barbecho, como muestra la Figura 5.7 para todas las fuentes. Las tasas de secado in situ en valor absoluto son inferiores a $0.05 m^3 m^{-3} \text{día}^{-1}$, tanto en la temporada de cultivo como en la de barbecho. En cambio, las tasas de secado satelitales en valor absoluto alcanzan los $0.10 m^3 m^{-3} \text{día}^{-1}$ en la temporada de cultivo. La cola derecha de las PDFs satelitales en la temporada de cultivo muestra la ocurrencia de valores

elevados de HSS que no se dan en el periodo de barbecho (Figura 5.6 y Tabla 5.2). Además, la temporada de cultivo presenta tasas de secado mayores en valor absoluto, situación que se acentúa con el aumento de θ (Figuras 5.7e y 5.7f; Figuras 5.7h y 5.7i). Sin embargo, el alto contenido de agua del suelo superficial durante la temporada de cultivo (Figuras 5.7f y 5.7f; Figuras 5.7h y 5.7i) no implica automáticamente altas tasas de secado, ya que también ocurren altos valores de θ acompañados de tasas de secado bajas –cercaas a $0 \text{ m}^3\text{m}^{-3}\text{día}^{-1}$ –.

5.4. Discusión

En este capítulo se analizó la dinámica diaria de la humedad del suelo superficial medidas por dispositivos *in situ* y estimadas por sistemas satelitales, durante diferentes temporadas de cultivo –cultivo activo y barbecho–, sobre las Pampas Argentinas. Esta región presenta temporadas de cultivo distintivas, y es propensa a inundaciones y anegamientos que duran de días a meses, como se expuso y discutió en capítulos anteriores. Cada una de las bases de datos de HSS empleadas tiene características intrínsecas, como el rango dinámico de HSS, la frecuencia temporal de adquisición, como así también la duración, la frecuencia y la causa de las lagunas de datos. Considerando estas características, se estudió el posible impacto de no tener en cuenta las lagunas de datos en los registros de HSS al calcular estadísticas plurianuales y los sesgos generados por la ubicación de los dispositivos *in situ* en una cubierta de suelo que no es representativa de la región.

Durante el periodo de estudio 2015-2019, en el registro de datos SMAP se encontraron lagunas resultantes del filtrado de señales HSS elevadas. Empleando informes de instituciones provinciales y nacionales junto con las fuentes de datos SMOS e *in situ*, se encontró que estos valores, que en zonas no propensas a anegarse serían demasiado altos para ser considerados posibles y, por lo tanto, para ser registrados, no son espurios sino que en realidad son típicos de la zona de estudio de esta tesis. Este ejemplo muestra que las largas lagunas de datos de HSS pueden ser causadas por el filtro de producto, lo que genera un punto ciego para periodos de alta humedad que se encuentran comúnmente en entornos sedimentarios planos como las Llanuras Pam-

peanas (McColl y otros, 2017). En el caso de la serie temporal de SMOS, esta presenta un período de más de un año con muy baja frecuencia de datos debido a interferencias de radiofrecuencia. Este periodo fue anómalamente húmedo según los datos tanto *in situ* como de SMAP. Se encontró que ignorando la falta de datos SMOS para periodos en la escala estacional, se introducen sesgos en estadísticas simples. Esto último puede dar lugar a que se extraigan conclusiones erróneas. En el ejemplo aquí analizado, la temporada infra-muestreada mostraba condiciones medias más secas y una variabilidad diaria menor que las series temporales reconstruidas. Estos casos ponen en evidencia la importancia de utilizar varias fuentes de datos siempre que sea posible, y de tener en cuenta estas lagunas a la hora de calcular estadísticas plurianuales. Esto es especialmente importante en los estudios que abarcan pocos años, como suele ocurrir con las misiones satelitales.

El análisis combinado de las PDFs de HSS por satélite (Figura 5.6) y su correspondiente $d\theta/dt$ (Figura 5.7) muestra que un mayor contenido de agua en el suelo aumenta la capacidad de secado del mismo. A pesar de ello, los valores más altos de HSS durante la temporada de cultivo no se traducen necesariamente en tasas de secado elevadas, sino que también ocurren tasas de secado bajas. Esto indica la presencia de diferentes mecanismos que gobiernan el secado del suelo a θ altos. Por un lado, existe un elevado consumo de agua por la demanda atmosférica –capacidad de la atmósfera para evaporar agua de la superficie, influenciada por factores como temperatura, viento y humedad relativa– y por los cultivos en crecimiento¹. Por otro lado, la presencia de bajas tasas de secado cuando la humedad del suelo es muy alta, puede deberse a la presencia de anegamiento en la región, como consecuencia de la interacción entre las altas tasas de humedecimiento y los suelos de textura fina de la región. Esto puede impedir y retrasar la percolación del agua desde el suelo superficial a las capas más profundas por saturación. También el nivel poco profundo de la napa freática puede impedir la percolación, además de contribuir a la HSS por mecanismos de capilaridad,

¹Para proporcionar una estimación de la pérdida de humedad del suelo atribuible a la evapotranspiración (ET), se empleó como referencia de ET máxima posible en la región de estudio, valores de $1 \text{ mm}^1 \text{día}^{-1}$ en invierno y $3.5 \text{ mm}^1 \text{día}^{-1}$ en verano (Sörensson y Ruscica, 2018). La profundidad del suelo a la que se mide la HSS difiere ligeramente entre las fuentes de datos por lo que, como aproximación límite, se consideró que toda pérdida por ET podría haber procedido de los 5 cm superiores del suelo superficial. Así, la tasa de ET de los 5 cm superiores sería $1 \text{ mm}^1_{\text{agua}} \times 5 \text{ cm}^{-1}_{\text{suelo}}$ por día = $0.02 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{día}^{-1}$ en invierno y $3.5 \text{ mm}^1_{\text{agua}} \times 5 \text{ cm}^{-1}_{\text{suelo}}$ por día = $0.07 \text{ m}^3 \text{m}^{-3} \text{día}^{-1}$ en verano.

retrasando el secado aún más. En este contexto, cabe señalar que SMAP alcanza los valores θ más altos y, en ese estado, muestra tanto situaciones de secado lento como de secado rápido récord.

En cuanto a la instalación de los dispositivos *in situ*, su ubicación por fuera de los cultivos anuales (Figura 5.2) implica que están situados en una cubierta vegetal uniforme a lo largo del año. Por lo tanto, las mediciones *in situ* no experimentan la transición brusca en la actividad de la vegetación que ocurre de pasar entre temporada de barbecho y temporada de cultivo activo, a diferencia de la mayor parte de la región de estudio, la cual es captada por los sistemas satelitales. Se refiere a este tipo de sesgo de los datos *in situ* como sesgo a nivel de parcela. La falta de diferencias notables entre las temporadas de barbecho y de crecimiento de los datos *in situ* en cuanto a las modas y formas de las PDFs (Figura 5.6) y los valores de la tasa de secado (Figura 5.7) sugiere que las diferencias de temperatura y evapotranspiración potencial entre las temporadas de barbecho y de crecimiento no tienen un efecto crucial en la dinámica diaria de la humedad del suelo, a diferencia del efecto de la presencia de cultivos. La Figura 5.8 muestra otro sesgo de ubicación de los dispositivos *in situ* al que se refiere como sesgo a nivel de paisaje: los dispositivos *in situ* se instalan en zonas que no son propensas a inundarse. Así, a diferencia de los datos de satélite que provienen de píxeles que incluyen zonas que se inundan al menos una vez durante el periodo de estudio, los datos *in situ* no captan las inundaciones.

La combinación del sesgo a nivel de parcela y el sesgo a nivel de paisaje se ilustra esquemáticamente en la Figura 5.9, y explica las diferencias entre los datos *in situ* y satelitales. Se sugiere que el sesgo a nivel de parcela es la razón por la que los datos *in situ* no representan la diferencia característica entre las temporadas de barbecho y de crecimiento, es decir, la presencia de cultivos. También se propone que el sesgo a nivel de paisaje puede ser la razón por la que los datos *in situ* tampoco consiguen captar la situación de anegamiento, que sólo puede ser captada mediante la amplia integración de los datos de satélite.

Este capítulo, en la misma línea que los anteriores, muestra el valor del uso de múltiples fuentes de información. En este, en particular, se pone en evidencia su utilidad cuando fuentes individuales introducen sus propios sesgos específicos.

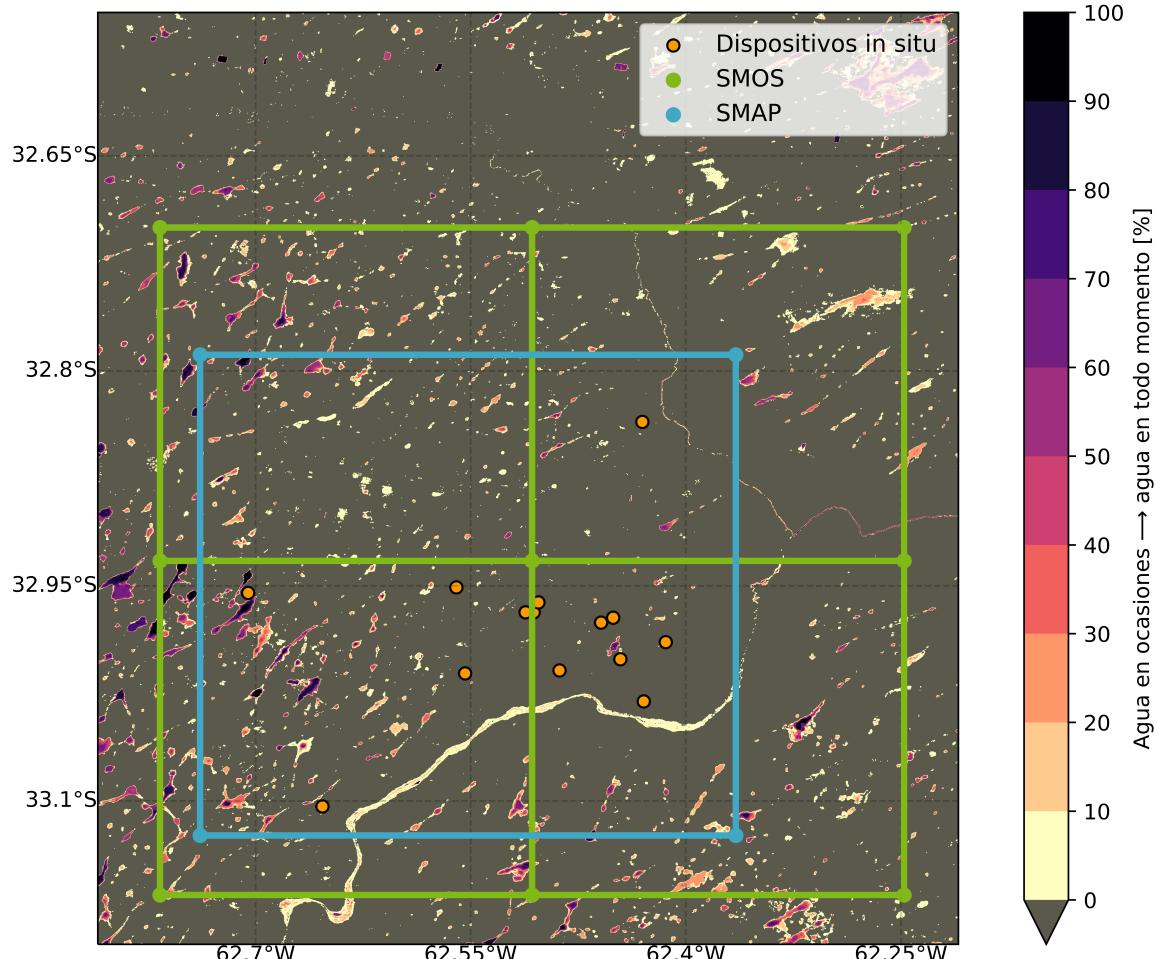


Figura 5.8: Mapeo del producto *Water Occurrence* en la región de estudio en el periodo abril 2015-noviembre 2019 (fuente: EC JRC/Google). Este conjunto de datos proporciona información sobre la frecuencia de presencia de aguas abiertas [%] a través del cálculo de las observaciones disponibles e identificadas como agua a lo largo del periodo de interés. También se muestra la distribución de los sitios in situ, y los píxeles SMOS y SMAP.

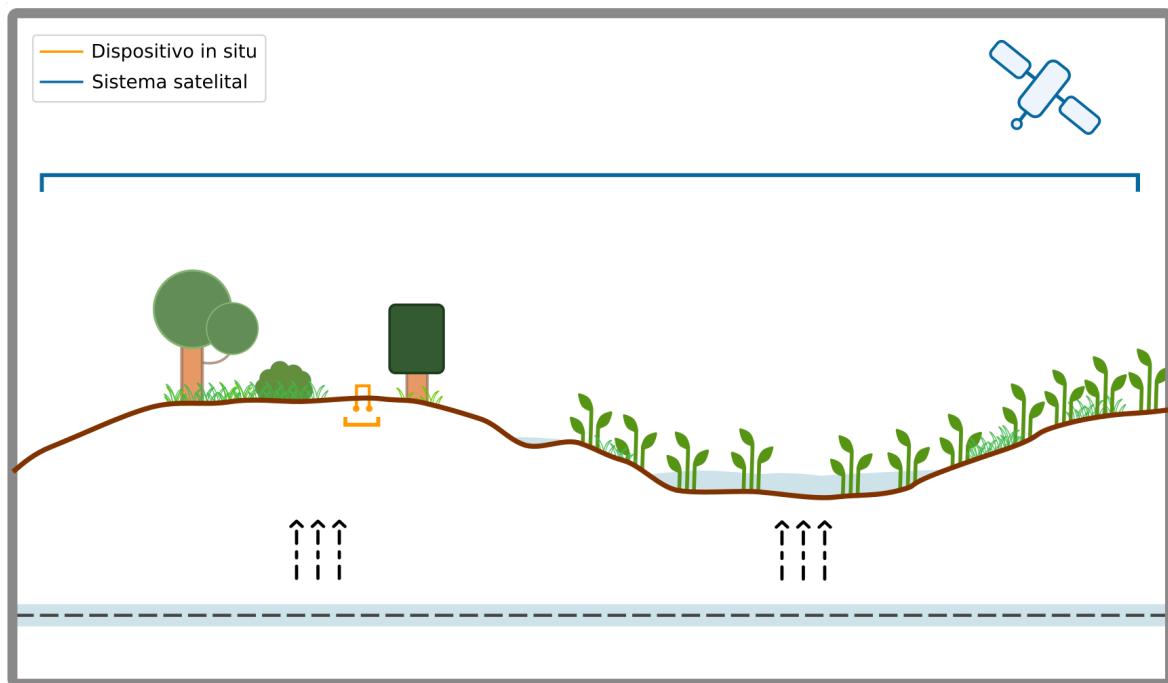


Figura 5.9: Representación esquemática de las características y mecanismos del sitio de estudio que son discernibles por los dispositivos in situ y los sistemas satelitales. En el caso de la red in situ, los dispositivos se encuentran instalados cercanos a residencias, que suelen estar situadas a elevaciones relativamente más altas, menos afectadas por los efectos capilares del nivel freático y, por tanto, menos propensas al encharcamiento, respecto a las áreas dedicadas a cultivo. Además, los dispositivos in situ están expuestos a una dinámica de la vegetación más uniforme a lo largo del año, a diferencia de los sistemas satelitales, que experimentan la transición entre las temporadas de barbecho y de crecimiento activo de los cultivos.

5.5. Conclusiones

La gestión sostenible del suelo y la producción de cultivos requieren información sobre el estado y las tendencias de la humedad del suelo superficial (HSS). Las regiones que presentan la coexistencia de napas poco profundas, bajas pendientes y son propensas a las inundaciones, dan lugar a grandes rangos de HSS, lo que las convierte en valiosos lugares de estudio de esta variable. Sectores de las Pampas Argentinas, las Llanuras del Norte de China y las Grandes Llanuras de Estados Unidos presentan tales similitudes. En este capítulo se evalúan datos de humedad del suelo superficial procedentes de dispositivos *in situ* y de sistema satelitales en un entorno propenso a las inundaciones de las Pampas Argentinas. En esta región de cultivos de secano, cabe esperar altos rangos de variación natural de la humedad tanto a nivel local como regional debido a la elevada variación interanual de las precipitaciones, a la fuerte estacionalidad de los cultivos dada por el cultivo homogéneo del paisaje, y por la napa freática cercana a la superficie.

El uso y la integración de distintas fuentes de información ayuda a la hora de examinar las lagunas de datos para distinguir entre las causadas por fallos técnicos o interferencias de radiofrecuencia, de las lagunas de datos que son portadoras de información. En particular, en el caso de las regiones propensas a las inundaciones, los períodos con altos valores de humedad del suelo pueden no ser tenidos en cuenta por los productos de sistemas satelitales que utilizan filtros adaptados a regiones más secas. En estos casos, las largas lagunas en registros de HSS causadas por el filtrado de dichos datos, pueden generar un punto ciego para etapas de alta humedad de llanuras propensas a inundarse. Además, se debe ser cauteloso a la hora de considerar los datos *in situ* como la referencia más fiable, ya que los sesgos de muestreo, como su instalación en posiciones particulares del paisaje y/o situaciones de la cubierta del suelo, pueden dar lugar a representaciones erróneas de las dinámicas de inundación y cultivo. En este sentido, resulta útil la integración no sesgada de todas las condiciones del paisaje mediante productos de sensoramiento remoto. A la luz de este capítulo y sus resultados, se espera contribuir al análisis de datos de misiones y proyectos actualmente en funcionamiento, así como a futuras misiones dedicadas a la medición y/o estimación

de HSS. En cuanto a la instalación de nuevos dispositivos y redes in situ de HSS, se señala la importancia de ubicarlos en lugares representativos de la región de estudio, en este caso particular, terrenos llanos donde predominan los cultivos y sean propensos a anegarse. Esto no implica que no se deban utilizar los dispositivos in situ ya instalados, pero hay que tener en cuenta los sesgos de localización correspondientes. En cuanto a los sistemas satelitales, los resultados de este capítulo motivan a que nuevos productos, como SAOCOM, podrían incorporar umbrales HSS que incluyan regiones propensas a las inundaciones.

Por último, los resultados aquí presentados ponen de manifiesto la necesidad de trabajar con múltiples fuentes de información, en particular, combinando el uso de mediciones in situ y estimaciones satelitales con informes locales de organismos agro-industriales nacionales, subnacionales y privados, siempre que estén disponibles.

Capítulo 6

Evaluación del modelo de superficie ORCHIDEE para la representación de la hidrología de llanuras agrícolas sujetas a cambios de uso y cobertura de suelo

Este capítulo se basa en los siguientes trabajos: Cappelletti, L.M., Sörensson, A. y Polcher, J. Understanding the transition of agricultural plains hydrological system under land use change: insights from the ORCHIDEE land surface model. Presentado en *9th GEWEX Open Science Conference*, Japón, julio 2024. || Cappelletti, L.M., Sörensson, A., Polcher, J., Schrapffer, A., Fita, L. y Jobbágy, E. Shallow water table in agricultural plains under rapid land use change: Can land surface models capture their dynamics? Presentado en *WCRP Open Science Conference*, Ruanda, octubre 2023.

Los modelos de superficie terrestre son herramientas fundamentales en la investigación climática y ambiental. Permiten simular y entender los procesos que ocurren en la superficie terrestre, como la interacción entre la atmósfera, la hidrología, la vegetación y el suelo. Estos modelos, además, son utilizados como componentes clave en los

modelos del sistema terrestre (*earth system models*), como los empleados por el CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*, <https://wcrp-cmip.org/>, consultado el 18 de junio de 2024), proyecto internacional coordinado por el *World Climate Research Programme* (WCRP). El objetivo principal del CMIP es mejorar la comprensión del clima global y el cambio climático futuro, mediante la comparación de simulaciones de modelos climáticos realizadas por diferentes centros de investigación en todo el mundo. Los modelos de superficie terrestre desempeñan un papel crucial en los modelos del sistema terrestre, ya que se utilizan como límites inferiores para los modelos acoplados –de la atmósfera, los océanos, la criósfera– al incorporar información detallada sobre la vegetación, el suelo, el ciclo del agua y otros procesos de la superficie. Esto permite a los modelos acoplados simular de manera más precisa las interacciones entre la atmósfera y la superficie, mejorando así su capacidad de proyectar cambios climáticos futuros. Esto último no es menor en cuanto al papel de los modelos de superficie terrestre, siendo que los resultados de los modelos del sistema terrestre son utilizados ampliamente en los reportes de evaluación del IPCC para informar a responsables políticos, profesionales, tomadores de decisiones y al público en general sobre la ciencia del cambio climático y sus impactos.

Además de lo mencionado, en el contexto de esta tesis es importante destacar que al integrar un modelo de superficie no sólo se incorpora una fuente más de información, sino también una fuente de análisis de los procesos involucrados en los anegamientos e inundaciones de un sistema que posee consistencia física entre las variables que lo fuerzan (e.g., precipitación y radiación) y las que simula (e.g., evapotranspiración, descarga de ríos).

En particular, y por las razones que se enumeran a continuación, para esta tesis es de interés el modelo de superficie terrestre ORCHIDEE (Sección 2.2.2). Por un lado, se tienen antecedentes de estudios sobre la relación suelo-atmósfera resultantes de la colaboración entre equipos de investigación de Argentina con investigadores y desarrolladores del modelo (e.g.: Ruscica y otros, 2020; Schrapffer y otros, 2020; Raoult y otros, 2022; Schrapffer, 2022; Schrapffer y otros, 2023). Además, presenta ventajas como su alta discretización de transferencia vertical del agua, la incorporación del ciclo fenológico de los cultivos –fundamental para la correcta simulación del ciclo de

agua sobre la Llanura Pampeana— y su capacidad de simular la descarga de río de cuencas cerradas. Sin embargo, ORCHIDEE es un modelo desarrollado principalmente en Francia, y los parámetros que intervienen en los ciclos de cultivo provienen de datos de observación procedentes principalmente de latitudes altas del hemisferio norte (MacBean y otros, 2015). Por otra parte, no cuenta con un módulo explícito de napa, elemento clave en el ciclo hidrológico de la región de estudio. Es en este contexto, que en este capítulo se explora si el modelo de superficie ORCHIDEE es capaz de representar los –o alguno de los– procesos hidrológicos de las llanuras agrícolas con napas freáticas poco profundas de la región y la transición de su comportamiento, como resultado del cambio de uso y cobertura del suelo. Por ejemplo, ¿es capaz ORCHIDEE de representar la disminución de la transpiración de la región?, según sugieren estudios antecedentes, como Pal y otros (2021) y Houspanossian y otros (2023).

6.1. Introducción

A lo largo de esta tesis se expuso y discutió, a partir de antecedentes y resultados propios, que las llanuras agrícolas del Centro de Argentina han sufrido una transformación en su sistema hidrológico. En los últimos cuarenta años se ha vuelto más propensa a las inundaciones y su nivel freático ha pasado de 10 m de profundidad en el pasado a < 4 m en la actualidad (Bollatti y otros, 2017; Alsina y otros, 2020; Houspanossian y otros, 2023), lo cual estaría dado por la sustitución de la vegetación perenne –nativa o cultivada– de raíces profundas por cultivos anuales de raíces menos profundas, como la soja (Amdan y otros, 2013; Pal y otros, 2021; Houspanossian y otros, 2023; Nosetto y otros, 2013, 2015; Giménez y otros, 2016). Esto último se esquematiza en la Figura 6.1. Adicionalmente, los antecedentes mencionados basados en trabajo de campo y simulaciones, sugieren que la menor profundidad de las raíces de los cultivos ha dado lugar a la disminución de la transpiración en la región.

ORCHIDEE no cuenta con un módulo explícito de napa freática, pero sí tiene como variable de salida la descarga de ríos de cuencas hídricas cerradas gracias a su módulo de *routing*. Se toma como cuenca hídrica cerrada a un área de terreno bien delimitada donde el agua drena a un punto común, el cual suele llamarse punto de

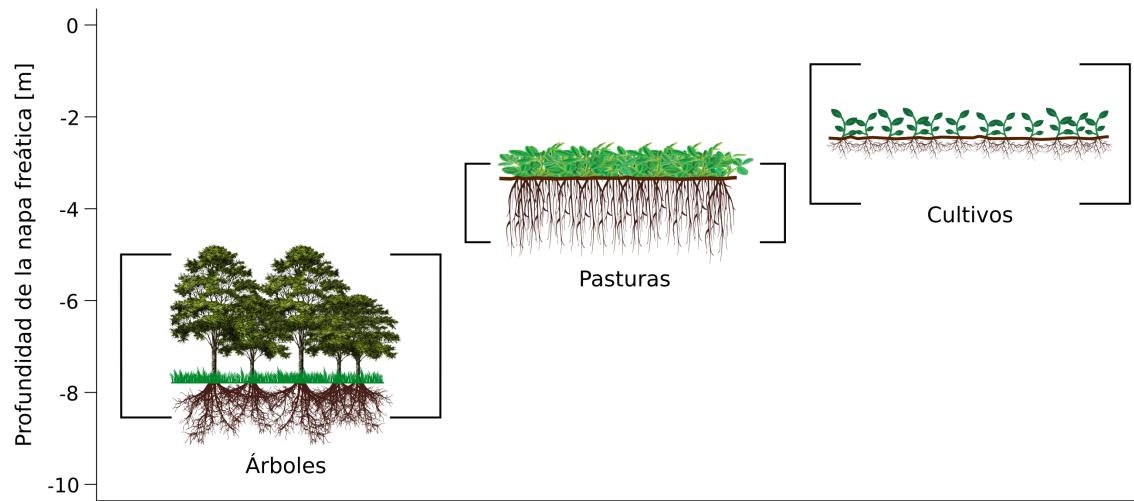


Figura 6.1: Profundidad media del nivel freático en tierras de cultivo, bosques secos nativos o plantaciones de eucaliptos y praderas nativas o pasturas de alfalfa en las llanuras centrales de Sudamérica. Figura basada del estudio de Houspanossian y otros, 2023.

cierre. ORCHIDEE cuenta con puntos de cierre –salida única aforada– para ciertas cuencas. De las cuencas disponibles según ORCHIDEE, la que presenta el punto de cierre más cercano a la región de interés de esta tesis es la de Cruz Alta (Figura 2.1), por lo que el presente capítulo se enfoca en dicha cuenca.

La Figura 6.2 permite advertir que las regiones estudiadas en los capítulos anteriores se encuentran en la parte más llana de la cuenca Cruz Alta, donde el nivel freático ha ascendido. Por otro lado, no se cuenta con datos observacionales de descarga de Cruz Alta. Sin embargo, se tienen datos de Pueblo Andino, una estación que se encuentra río abajo de Cruz Alta (Figura 6.2), a aproximadamente 115 km. Sin despreciar la complejidad del sistema, considerando que ambas subcuencas son parte de la cuenca del Río Carcarañá (Díaz Lozada y otros, 2016) y que los datos observacionales son escasos en la región, para este capítulo se toma la descarga de Pueblo Andino como un indicador cualitativo del comportamiento de la descarga de Cruz Alta.

A nivel local, la descarga de los ríos se ve influenciada por la entrada de aguas subterráneas a la altura de la napa freática, como se esquematiza en la Figura 6.3 (Alley y otros, 1999; <https://pubs.usgs.gov/circ/circ1186/>, consultado el 18 de junio de 2024). Este es el mecanismo principal por el que el agua subterránea se descarga

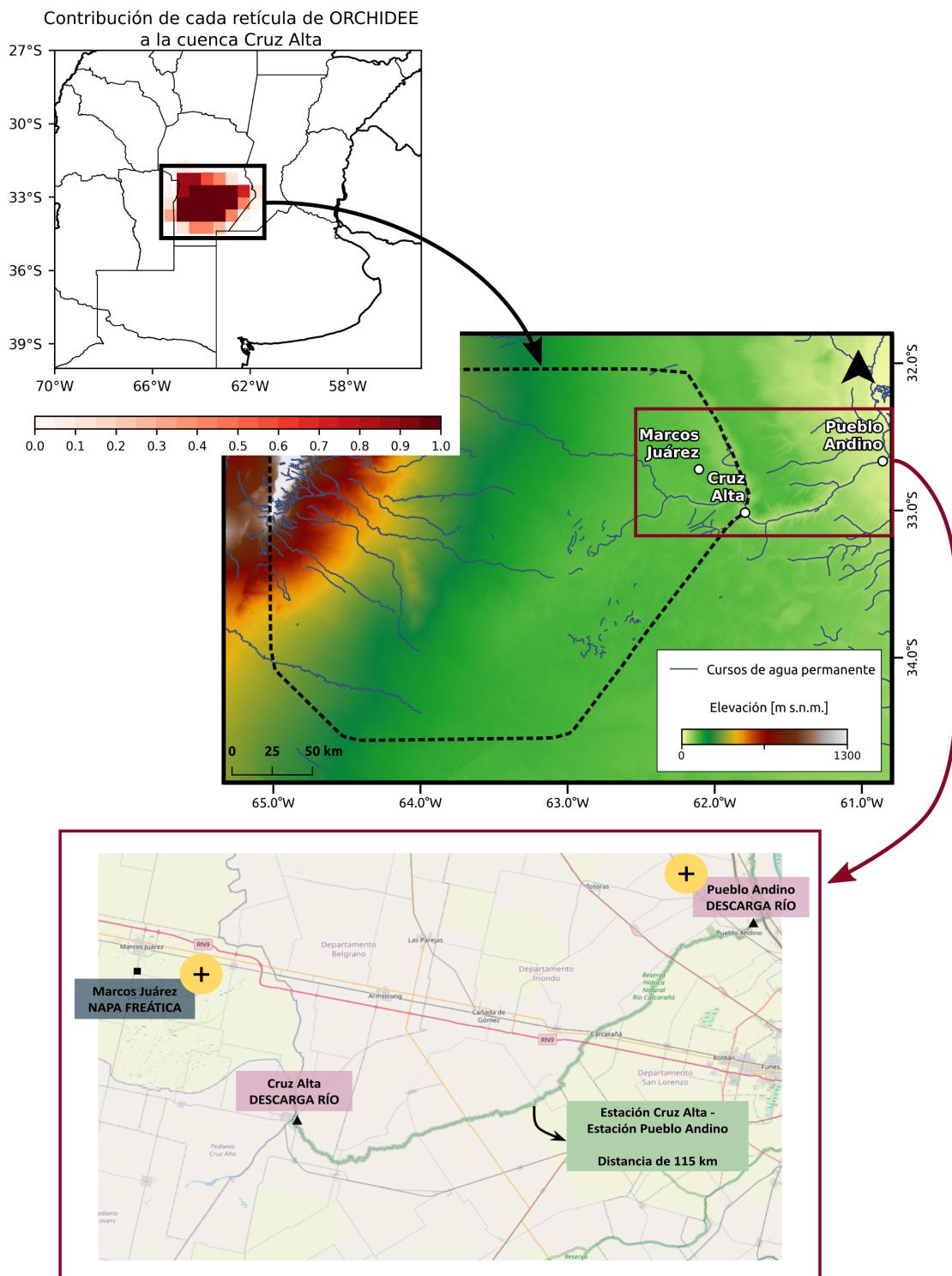


Figura 6.2: En el panel superior se muestra la cuenca de Cruz Alta según el modelo de superficie ORCHIDEE. El panel medio es un acercamiento a dicha cuenca, y se corresponde a un mapa topográfico [m] de la región de la cuenca Cruz Alta –aproximación en línea punteada– junto a la red de aguas permanentes de la región (fuente: IGN-Instituto Geográfico Nacional de Argentina). En el panel inferior se muestra en detalle la localización de los sitios relevantes para este capítulo. En Marcos Juárez y Pueblo Andino, donde se cuenta con datos observacionales de nivel freático y descarga, respectivamente, se expone el signo de las tendencias ($p\text{-value} < 0.01$) en el periodo de estudio de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen

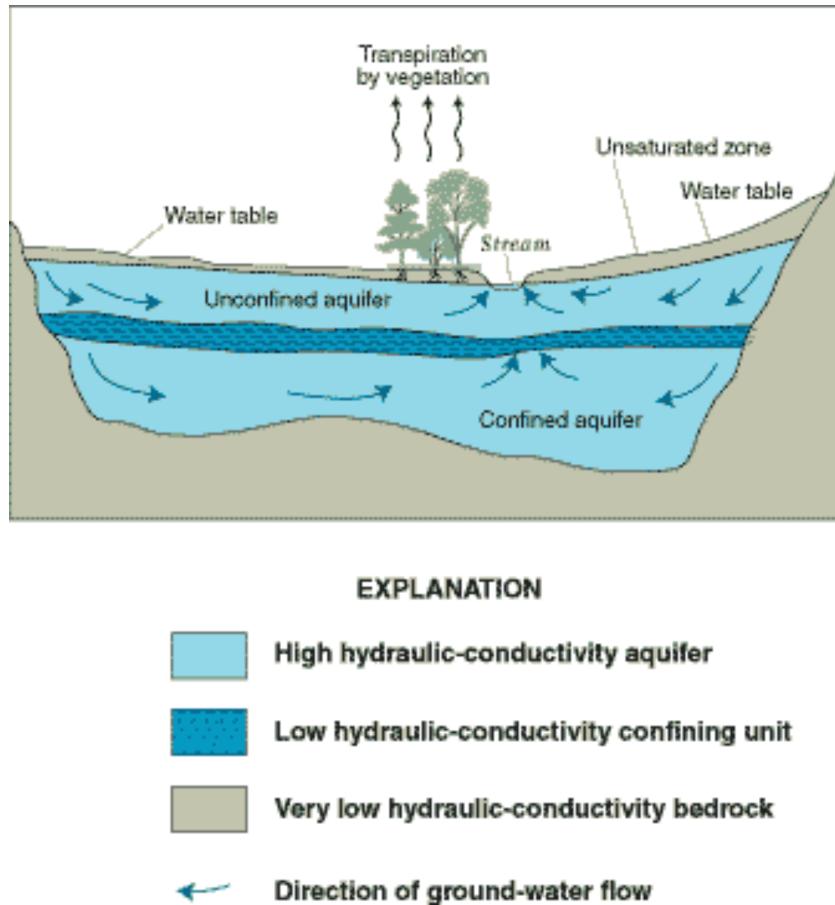


Figura 6.3: Esquema que muestra el sistema de flujo de agua subterránea y su aporte a la descarga de río. A escala local, la entrada de aguas subterráneas a la descarga de ríos se produce al nivel de la napa freática. Las vías de flujo cortas y poco profundas se originan en la napa freática cercana al río. A medida que aumenta la distancia al río, las vías de flujo hacia el mismo son más largas y profundas. Figura tomada de Alley y otros (1999).

a la superficie. En lugares donde el nivel freático es más profundo que la elevación de la superficie del agua del río, el agua del mismo se infiltra hacia el subsuelo, haciendo que su descarga decrezca (Poeter y otros, 2020). Al ascender el nivel freático y acercarse al nivel del río, esto da lugar a que el aporte del agua subterránea al río aumente y, con ello, su descarga. Entonces, según la evidencia observacional con la que se cuenta para esta tesis, se supone que la descarga observacional de Cruz Alta debería haber aumentado en el periodo de estudio, puesto que: 1) en las últimas décadas, el nivel freático ha aumentado considerablemente en la mayor parte de la región central de Argentina, encontrándose cerca de la superficie (< 4 m) actualmente (Alsina y otros, 2020; Whitworth-Hulse y otros, 2023). En particular, según antecedentes y lo que se muestra en el Capítulo 4 de esta tesis, el nivel freático de Marcos Juárez, región lindera a la localización del punto de cierre de la cuenca, ha ascendido en el periodo de estudio. Solo se cuenta con esta estación de nivel freático dentro de la cuenca con registros sobre el periodo de estudio completo, por lo que la misma se toma como una línea de evidencia que apoya la suposición expuesta, pero no es empleada para cuantificar lo que sucede a nivel cuenca. Además, 2) río abajo se tiene la información de la descarga de Pueblo Andino (Figura 6.2), la cual presenta tendencias positivas y significativas, resultado acordes al estudio de Guerra y Nosedto (2024).

En cuanto al balance de agua de una cuenca bien delimitada y con una única salida aforada, este está dado por:

$$\Delta S = P - E - D$$

donde ΔS es el cambio del contenido de agua dentro de la cuenca, P es la precipitación, E es la evapotranspiración, y D es la descarga de río, correspondientes a dicha cuenca. En el caso del modelo ORCHIDEE las componentes simuladas que dan lugar a la evapotranspiración total son la transpiración e intercepción de la vegetación, y la evaporación del suelo desnudo. Además, en dicho modelo el agua no se acumula a escalas mayores a un año ya que no cuenta con un módulo de almacenamiento a largo plazo –como sería la napa–. Por ello, por año hidrológico, para ORCHIDEE se tiene que:

$$\Delta S = 0 = P - E - D$$

Adicionalmente, la precipitación de la cuenca Cruz Alta a nivel anual no presentó cambios significativos en el periodo de estudio (ver Sección 6.2.1). Con ello, considerando que $P-E=D$ anualmente para la cuenca Cruz Alta, y bajo la hipótesis que la evapotranspiración de la cuenca bajó vía la componente de transpiración, la cual se redujo del pasado al presente en la región según antecedentes, sería de esperarse que la descarga de Cruz Alta simulada por ORCHIDEE aumente.

Bajo las consideraciones e hipótesis establecidas anteriormente, en este capítulo se analiza si el sistema de simulación dado por el modelo ORCHIDEE, forzado por diferentes datasets atmosféricos y considerando el cambio del uso y cobertura de suelo ESA-LUH2, es capaz de representar el aumento de la descarga de Cruz Alta por medio de la disminución de la evapotranspiración. También se explora posibles configuraciones y procesos necesarios a incorporar al modelo para que este sea apto para representación de la hidrología de las llanuras agrícolas de Argentina. A continuación se resume las consideraciones mencionadas anteriormente para los análisis llevados a cabo en este capítulo:

- Estudios antecedentes de campo y simulaciones sugieren que el cambio de cobertura y uso de suelo al reemplazar vegetación perenne por cultivos anuales ha dado lugar a disminución de la transpiración en la región
- Para ORCHIDEE se tiene que, por año hidrológico, $P-E=D$
- La precipitación de la cuenca Cruz Alta a nivel anual no presentó cambios significativos en el periodo de estudio
- La descarga de Cruz Alta debería haber aumentado en el periodo de estudio, según la evidencia observacional con la que se cuenta

6.2. Materiales y metodología

Para contestar los interrogantes científicos que competen a este capítulo se realizó un conjunto de experimentos donde las dimensiones principales que se consideran y sobre las se operó son: los forzantes atmosféricos, el ciclo de vegetación y el uso de suelo utilizados por el modelo ORCHIDEE.

6.2.1. Forzantes atmosféricos

Como se expuso en la Sección 2.2.2, ORCHIDEE se utilizó en modo *off-line*, es decir forzado por datos atmosféricos y sin que las variables de la superficie simuladas por el modelo influyan sobre estos datos atmosféricos. Por la incertidumbre que presentan los forzantes atmosféricos al evaluar variables del ciclo hidrológico (Bierkens, 2015; Ehsan Bhuiyan y otros, 2019), particularmente en América del Sur (Sörensson y Ruscica, 2018; Rosales, 2023), se examinó un conjunto de forzantes disponibles (Tabla 6.1). En la Figura 6.4 se muestra por cada uno de estos forzantes la precipitación, la velocidad del viento y la radiación solar incidente, junto a sus tendencias y significancia. En cuanto a la precipitación, para el total de los forzantes atmosféricos esta variable no presenta tendencias significativas ($p\text{-value} > 0.01$) en el periodo de estudio, y solo para GSWP3 el signo de su tendencia es positivo. En el caso de la velocidad del viento, se destaca que GSWP3, WFDEI_CRU y WFDEI_GPCC no presentan tendencias significativas. Para los demás forzantes la tendencia de esta variable es nula. Las tendencias de la radiación solar incidente resultaron ser significativas para todos los forzantes, salvo el caso de GSWP3 y Princeton_GPCC, y de signo positivo. Del total de los forzantes evaluados, para realizar las simulaciones se tomó un subconjunto de ellos que capturase un amplio rango de incertidumbre. Así, el subconjunto utilizado para realizar las simulaciones es: WFDE5_CRU_GPCC, por ser el empleado por el grupo desarrollador del modelo que colaborará en este trabajo; GSWP3, por presentar tendencia no significativa para todas las variables; y CRUJRA, por presentar tendencia de signo negativo en la velocidad del viento, al contrario de WFDE5_CRU_GPCC y GSWP3. WFDE5_CRU_GPCC será llamado WFDE5 de aquí en adelante.

| Forzante atmosférico | Descripción |
|----------------------|--|
| CRU-NCEP | Acorde a Viovy (2018) es un producto global basado en el reanálisis de 6 horas de resolución temporal del NCEP/NCAR (Kahnay y otros, 2018) interpolado a 0.5° . La precipitación se ha corregido utilizando los datos mensuales de CRU TS3.2 (Harris y otros, 2014) a 0.5° de resolución. |
| GSPWP3_v1 | Tercera fase del producto GSWP (Kim, 2017). Se trata de un producto global de 3 horas de resolución temporal basado en el reanálisis 20th Century de resolución espacial de 2° (Compo y otros, 2011), reducido a una escala de 0.5° . La precipitación se corrige con los datos mensuales de GPCC (Schneider y otros, 2017). |
| Princeton_GPCC | Producto global resolución espacial 0.25° . El conjunto de datos se construye fusionando el reanálisis NCEP/NCAR y un grupo de conjuntos de datos globales basados en observaciones (Sheffield y otros, 2006; Duan y otros, 2016). La precipitación se corrige con datos mensuales de GPCC. |
| WFDEI_CRU | Según Weedon y otros (2014) es un forzante atmosférico de 0.5° de resolución espacial. Se basa en el reanálisis ERA-Interim (ERA-5, Dee y otros, 2011) de 3 horas e interpolado a una resolución espacial de 0.5° . La precipitación se ha corregido utilizando los datos de CRU TS3 a 0.5° de resolución. |
| WFDE5_CRU | Producto global de 0.5° de resolución espacial. Es una combinación del reanálisis ERA-5 (Hersbach y otros, 2020), que es un reanálisis de 3 horas interpolado a una resolución espacial de 0.5° . La precipitación se ha corregido utilizando los datos de CRU TS3 a 0.5° de resolución espacial. |
| CRUJRA | Producto global de resolución temporal de 6 horas y espacial de 0.5° , el cual está basado en el Japanese Reanalysis de la Agencia Meteorológica Japonesa (Kobayashi y otros, 2015) y corregido por el producto CRU TS3. |
| WFDEI_GPCC | WFDEI_GPCC corresponde a la versión de WFDEI cuya precipitación ha sido corregida con el conjunto de datos GPCC. |
| WFDE5_CRU_GPCC | Datos globales de resolución temporal de 3 horas y espacial de 0.5° . Es una combinación del reanálisis ERA-5 (Hersbach y otros, 2020) y los datos climatológicos de CRU TS3. La precipitación se corrige con los datos mensuales de GPCC. |

Tabla 6.1: Forzantes atmosféricos evaluados para la selección del subconjunto que se utilizará para realizar las simulaciones analizadas en este capítulo.

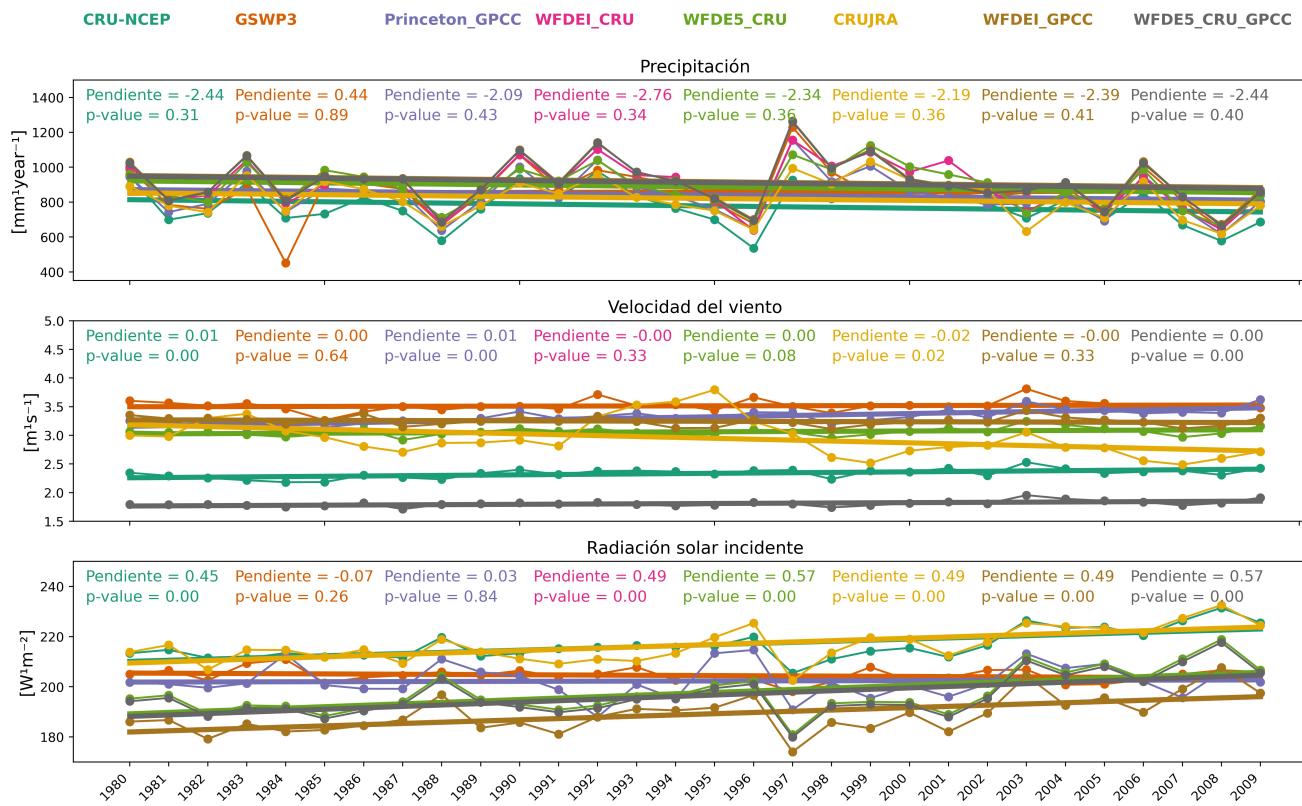


Figura 6.4: Precipitación, velocidad del viento y radiación solar incidente de la cuenca Cruz Alta de los ocho forzantes examinados para la selección del subconjunto a emplear en este estudio para realizar las simulaciones. Se grafican en su periodo común de disponibilidad. Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia (en las unidades que corresponda) y significancia de cada variable de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen.

6.2.2. Ciclo de vegetación

La Figura 6.5 muestra el *Leaf Area Index* [-] (LAI, índice de área foliar) *default* de la cuenca Cruz Alta simulado por ORCHIDEE con el NDVI [-] de MODIS de la misma región. A partir de la misma se puede advertir que el ciclo de vegetación *default* simulado no se corresponde con el observado. Para modificar el ciclo de vegetación de ORCHIDEE por uno representativo de la región, se modificaron parámetros del módulo de dinámica de vegetación. En cuanto a la cobertura del suelo, de las 15 PFTs que describe ESA-LUH2, se hizo foco en cuatro de ellas: por un lado, C3-pastura y C4-pastura, correspondiendo a las pasturas de la región, y por otro, C3-agricultura y C4-agricultura, correspondiendo a los cultivos. Con ello, se impusieron las siguientes configuraciones sobre el LAI de ORCHIDEE: 1) que los parámetros de las PFTs C3-agricultura y C4-agricultura sean los mismos, ya que la soja (C3) y el maíz (C4) son los cultivos dominantes de la región, y en cuanto al ciclo hidrológico se comportan de manera similar (Mercau y otros, 2016). La diferencia entre las categorías C3 y C4 sí se debería tener en cuenta si se evaluará el ciclo de carbono (Mercau y otros, 2016). 2) Se modificaron los parámetros SENESCENCE_TYPE, PHENO_GDD_CRIT_C, GDD_SENESCENCE y LEAFFALL del modelo para reajustar la dinámica del LAI a las prácticas agrícolas de la región, según se muestra en la Tabla 6.2. El parámetro SENESCENCE_TYPE [-] se corresponde al tipo de senescencia foliar –envejecimiento que experimentan las hojas de las plantas, el cual da lugar a su degradación y muerte. PHENO_GDD_CRIT_C [-] y GDD_SENESCENCE [días] son parámetros relacionados a los grados-día de crecimiento de la planta –representa el reloj térmico que controla la manifestación de las diferentes etapas fenológicas de su desarrollo–. GDD_SENESCENCE define el mínimo de grados-día de crecimiento para que se dé lugar a la senescencia. En cuanto a PHENO_GDD_CRIT_C permite definir el valor crítico de grados-día de crecimiento. Con estos dos últimos parámetros se manipula el comienzo de la etapa de incremento del LAI –etapa de crecimiento– y la tasa a la que esto ocurre. En cuanto a LEAFFALL [días] se corresponde a la duración de la muerte de las hojas, con lo cual se manipula la temporada de bajo LAI, en el caso de nuestra región de estudio, la temporada de barbecho (<http://forge.ipsl.jussieu.fr/orchidee/wiki/Documentation/OrganicParameters>, último acceso 13 de junio de

2024). En la Figura 6.5 se muestra el LAI *default* del modelo sobre la cuenca, el NDVI utilizado como referencia para modificar el LAI *default*, y el LAI resultante adaptado a la región según los parámetros de la Tabla 6.2. Con estas dos configuraciones de LAI (*default* y adaptado), se realizaron corridas para los tres forzantes.

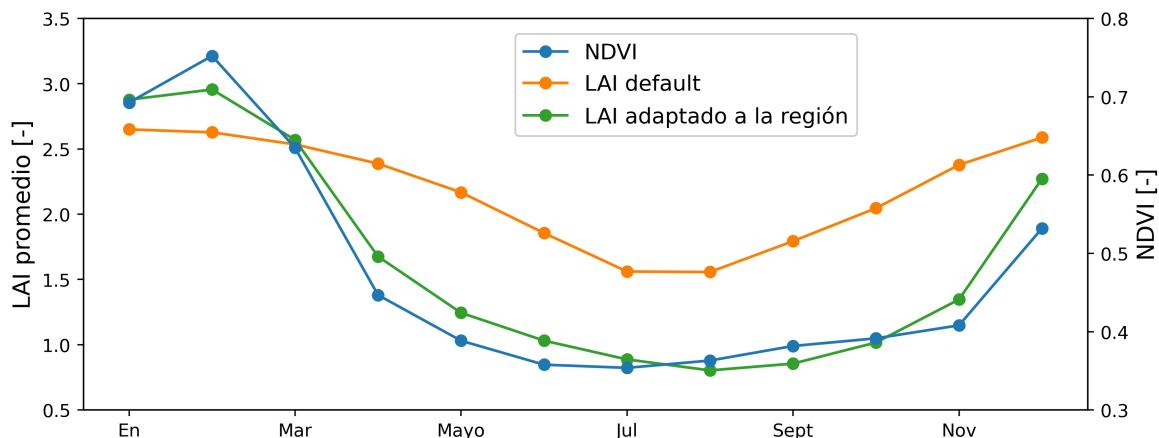


Figura 6.5: Ciclo anual del LAI *default* de la cuenca de Cruz Alta, junto al LAI resultante de adaptar el *default* a la región por medio del ciclo anual de NDVI correspondiente, también mostrado en la figura.

| LAI de ORCHIDEE <i>default</i> de la cuenca Cruz Alta | | LAI de ORCHIDEE adaptado a la cuenca Cruz Alta |
|--|----------------|---|
| C3-agricultura | C4-agricultura | C3-agricultura y C4-agricultura |
| SENESCENCE_TYPE [-] | <i>default</i> | <i>default</i> |
| PHENO_GDD_CRIT_C [-] | 320 | 700 |
| GDD_SENESCENCE [días] | 950 | 4000 |
| LEAFFALL [días] | 10 | 10 |

Tabla 6.2: Valores de los parámetros SENESENCE_TYPE [-], PHENO_GDD_CRIT_C [-], GDD_SENESENCE [días] y LEAFFALL [días] del modelo ORCHIDEE para la implementación del LAI del modelo *default* y del adaptado según el NDVI de la región de interés.

6.2.3. Uso de suelo

ORCHIDEE prescribe por año y por punto de retícula la fracción máxima de cada PFT según la base ESA-LUH2 (Sección 2.2.2). La Figura 6.6 muestra la evolución temporal de las PFTs de pastura y cultivo según dicha base.

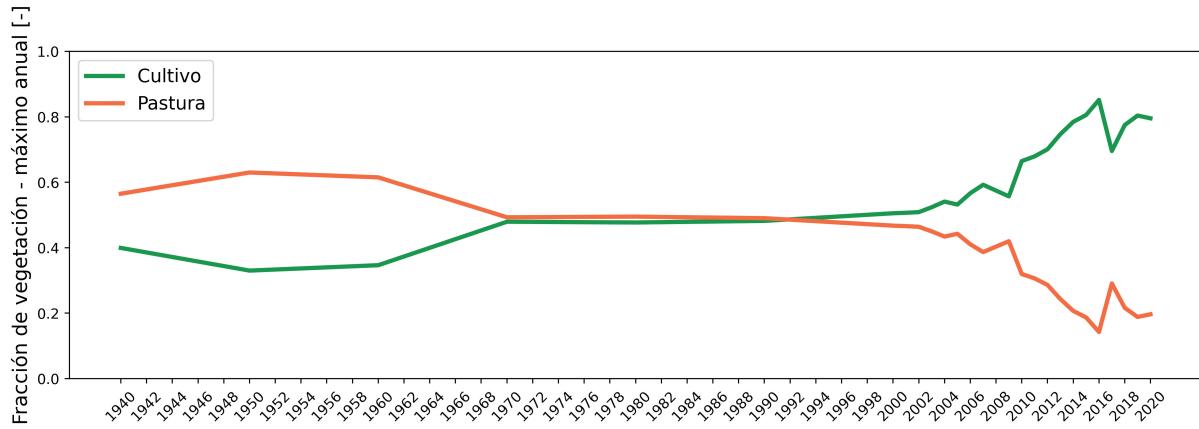


Figura 6.6: Fracción anual máxima de cultivo y pastura de la cuenca Cruz Alta según la base ESA-LUH2 que emplea ORCHIDEE para sus simulaciones. El tipo de vegetación cultivo está dado por la suma de las PFTs C3-agricultura y C4-agricultura, mientras que el tipo pastura está dado por la suma de las PFTs C3-pastura y C4-pastura

6.2.4. Experimentos realizados

Para construir un conjunto de simulaciones se ha corrido ORCHIDEE con diferentes configuraciones del ciclo de vegetación y uso del suelo, para el subconjunto seleccionado de forzantes meteorológicos. Las simulaciones resultantes presentan resolución temporal mensual y resolución espacial de 0.5° , durante el período 1980-2013, el cual está condicionado por el periodo común de disponibilidad de los forzantes atmosféricos. Los análisis en forma anual fueron realizados tomando el año hidrológico de la región, que empieza en julio de cierto año y termina en junio del siguiente, según la precipitación de la región (Figura 4.5), por lo que las series que aquí se analizan se corresponden al periodo 1980-2012.

Experimentos que evalúan el sistema de simulación comparando el empleo del ciclo de vegetación *default* frente al ciclo de vegetación adaptado a las prácticas agrícolas de la región

Empleando el LAI *default* y el LAI adaptado con cada uno de los tres forzantes atmosféricos se han obtenido seis simulaciones. Así, para tres de las seis simulaciones el ciclo de vegetación está dado por el *default*, mientras que para las tres restantes el ciclo de vegetación se corresponde al adaptado a las prácticas de la región.

Experimentos que evalúan el sistema de simulación comparando el uso y cobertura del suelo del pasado respecto al del presente

Para separar la componente climática de la de uso y cobertura del suelo y explorar si, como se espera según la hipótesis, la transpiración del pasado es mayor que la del presente, se analizaron simulaciones sin evolución temporal de las PFTs. Para ello se implementaron corridas para los tres forzantes, por un lado manteniendo fijas las condiciones de fracción de vegetación de 1950 para todo el periodo de estudio –i.e., no se permitió la evolución temporal de fracción de las PFTs–, y por otro lado, corridas análogas pero para las condiciones fijas de fracción de vegetación de 2016. Como se expone en la Figura 6.6, 1950 y 2016 son casos extremos y contrarios de uso y cobertura del suelo de la región según ESA-LUH2: 1950 representando el pasado, con predominio de pasturas; y 2016 representando la actualidad, con el predominio de los cultivos.

Empleando el LAI adaptado a la región, con los tres forzantes mencionados y las dos configuraciones de fracción de vegetación fija a lo largo del periodo de estudio (1950 y 2016), se obtienen seis simulaciones. Así, para tres de las seis simulaciones resultantes la fracción anual máxima de cada PFT es la misma a la de 1950 –predominio de pastura durante todo el periodo de estudio–. En cuanto a las tres simulaciones restantes, la fracción anual de cada PFT es la misma a la de 2016 –predominio de los cultivos durante todo el periodo de estudio–.

6.2.5. Resultados y discusión**Experimentos que evalúan el sistema de simulación comparando el empleo del ciclo de vegetación *default* frente al ciclo de vegetación adaptado a las prácticas agrícolas de la región**

La Figura 6.7 y la Figura 6.8, muestran la partición de la evapotranspiración de ORCHIDEE resultante de, por un lado, simular empleando el ciclo de vegetación *default*, y por otro, simular con el ciclo de vegetación adaptado a las prácticas agrícolas del Centro de las Pampas Argentinas. En esta región de escasas observaciones, los forzantes meteorológicos, así como información sobre el uso y cobertura del suelo y su cambio a lo largo de las décadas, constituyen importantes fuentes de incertidumbre.

Por ejemplo, la evapotranspiración media simulada y su tendencia durante las tres últimas décadas dependen en gran medida de los forzantes meteorológicos. Se advierte que de la simulación de LAI *default* respecto al LAI adaptado, la tendencia del forzante WFDE5 pasa a ser negativa, pero manteniendo su no significancia ($p\text{-value} > 0.1$). En el caso de CRUJRA la tendencia aumenta en valor absoluto, manteniendo su signo negativo y siendo significativa ($p\text{-value} < 0.1$). En cuanto a GSWP3 el valor de la tendencia disminuyó, pero la misma pasa a ser no significativa.

Respecto a la hipótesis de la disminución de la transpiración, las simulaciones que mejor se le corresponden son aquellas en las que se emplea la vegetación adaptada en lugar de la predeterminada por el sistema de simulación, pero no en todos los casos esto ocurre de manera significativa. Es notable que los cambios en la transpiración –en cuanto al signo de la tendencia según cada forzante–, no se traslada al comportamiento de la evapotranspiración, y esto se debe a la compensación por parte de la evaporación del suelo desnudo. Al disminuir la transpiración, se esperaría mayor contenido de agua del suelo, pero esta es consumida por medio de la evaporación del suelo desnudo, la cual es mayor para la simulación del LAI adaptado respecto a la simulación de LAI *default*. Una posible explicación de ello, es que la evapotranspiración de ORCHIDEE estaría gobernada por la demanda atmosférica. Otra posible razón sería una sobreestimación de la fracción de suelo desnudo por parte del sistema de simulación frente a la disminución del LAI al ser adaptado.

Al comparar la descarga de Cruz Alta de cada uno de estos experimentos se tiene que tanto para las simulaciones con el LAI *default* como el LAI adaptado a la región, la descarga de Cruz Alta presenta tendencia negativa y no significativa ($p\text{-value} > 0.1$) para los tres forzantes (Figura 6.9 y Figura 6.10). Es notable que la descarga simulada de Cruz Alta alcanza, en general, valores absolutos más altos para los tres forzantes al emplear el LAI adaptado, respecto a las simulaciones con LAI *default*.

Las comparaciones expuestas muestran que ocurre un cambio sobre la transpiración de la región al simular con el LAI adaptado, lo cual, repercute en la descarga simulada de la cuenca. Sin embargo, esto no es suficiente para que la transpiración del pasado sea mayor que la del presente de manera significativa, y que eso tenga un impacto tal de obtener una tendencia positiva en la descarga de Cruz Alta, de acuerdo a las líneas

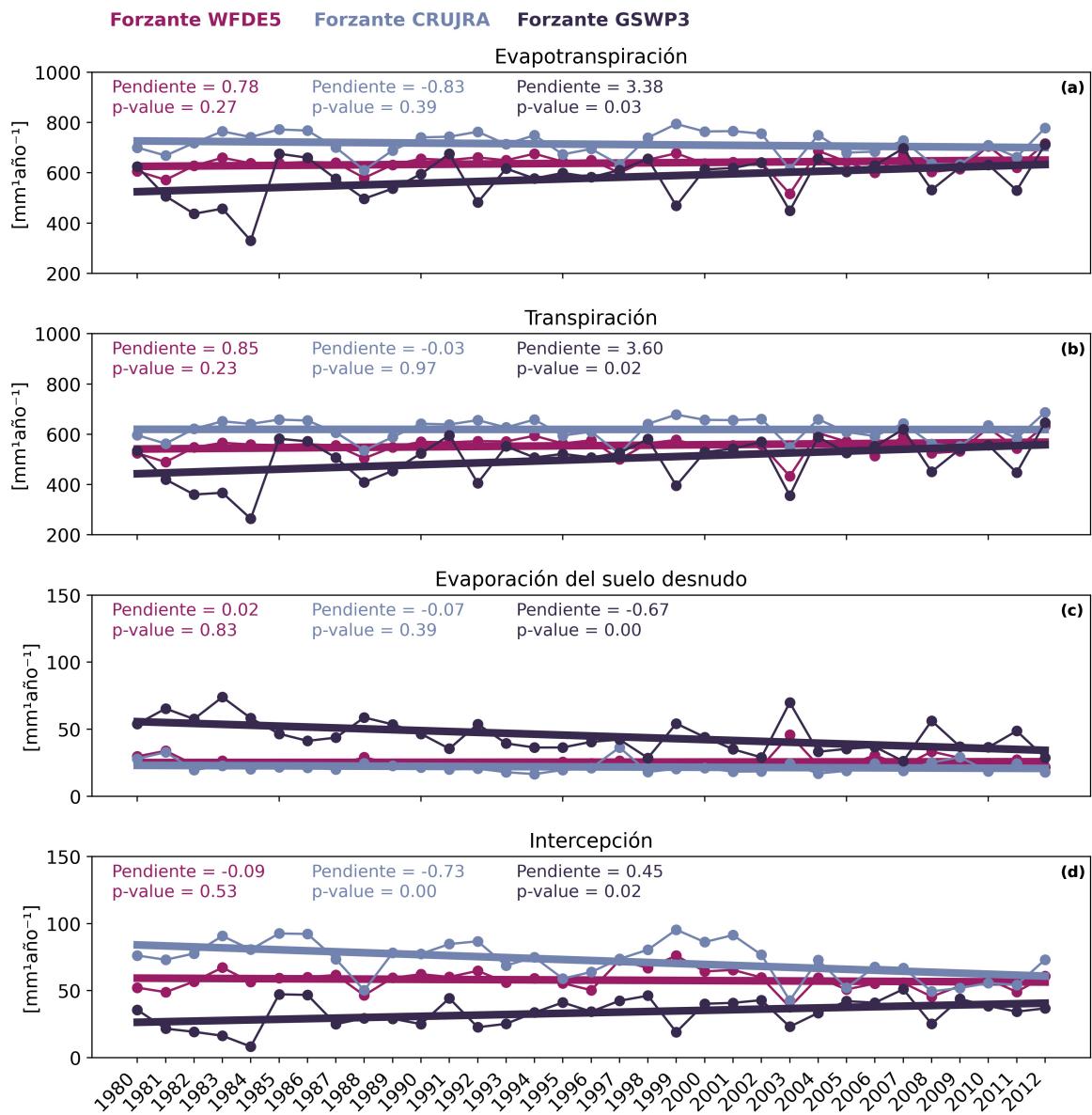


Figura 6.7: Partición de la evapotranspiración de la cuenca Cruz Alta durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes empleados la evapotranspiración, la transpiración, la evaporación del suelo desnudo y la intercepción, simuladas utilizando el LAI *default*. Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia de cada componente [mm¹año⁻¹] y significancia asociada de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen.

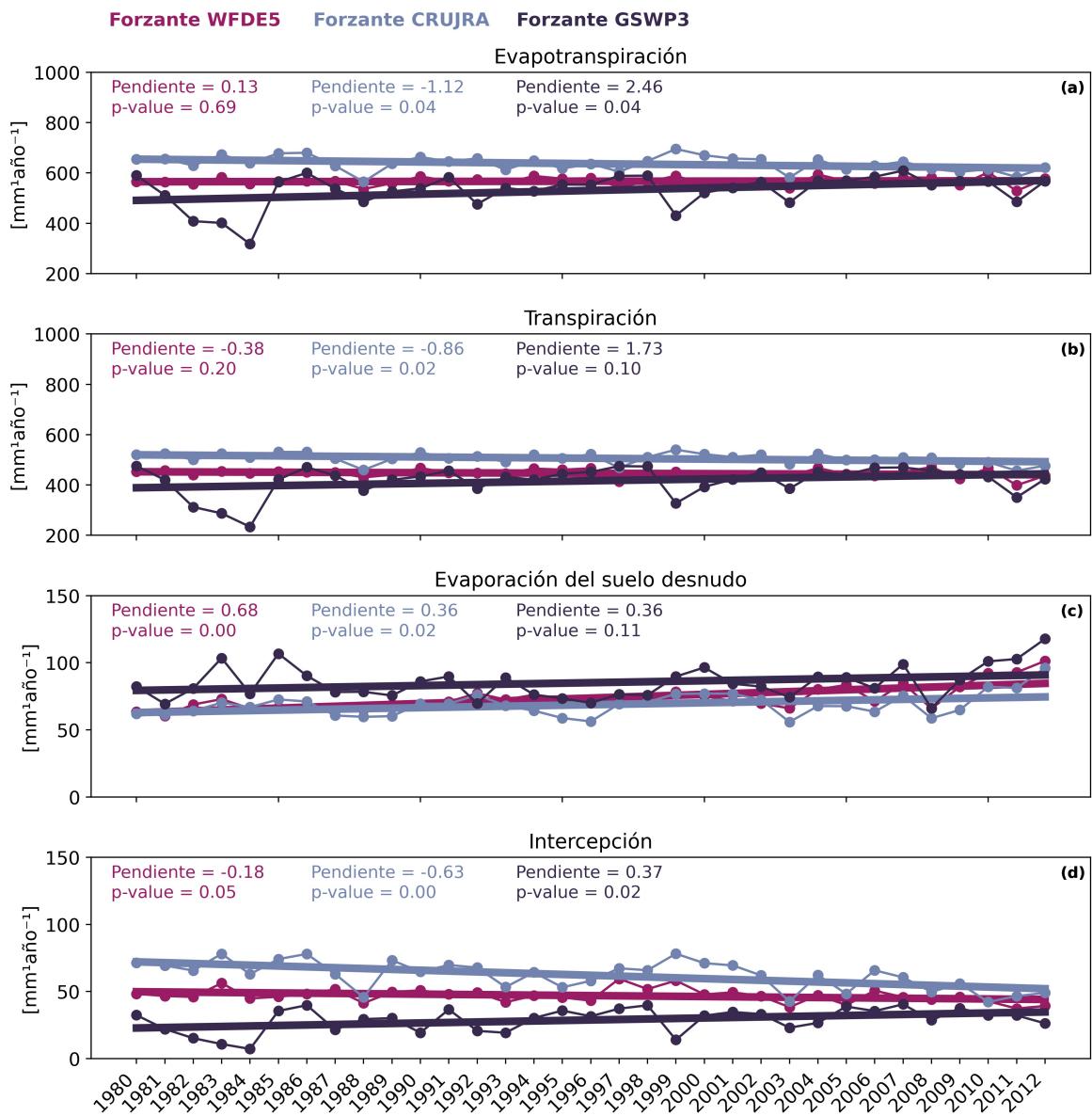


Figura 6.8: Partición de la evapotranspiración de la cuenca Cruz Alta durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes empleados la evapotranspiración, la transpiración, la evaporación del suelo desnudo y la intercepción, simuladas utilizando el LAI adaptado a la región. Por cada forzante, se muestra la pendiente de la tendencia de cada componente [mm¹año⁻¹] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen.

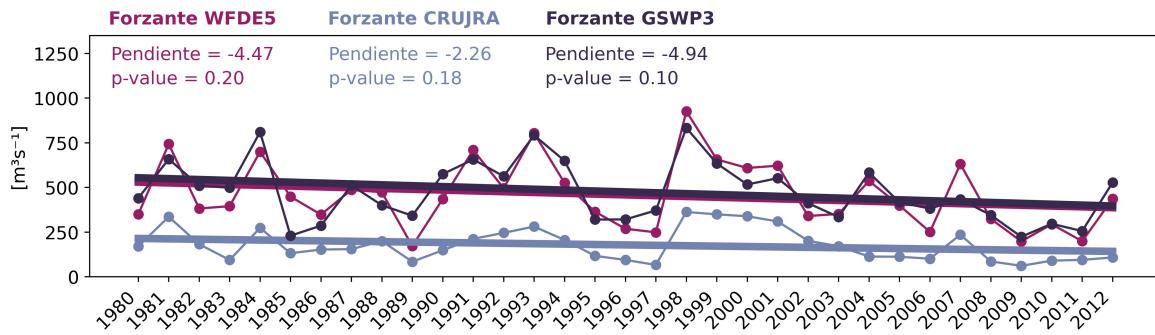


Figura 6.9: Descarga de la cuenca Cruz Alta en su punto de cierre durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes las salidas simuladas utilizando el LAI *default*. Por cada forzante, se expone la pendiente de la tendencia de descarga [$m^3 s^{-1}$] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen.

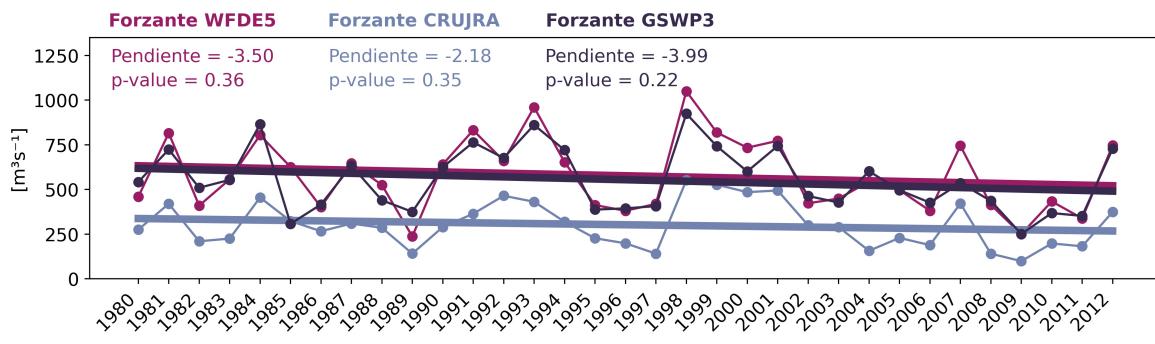


Figura 6.10: Descarga de la cuenca de Cruz Alta en su punto de cierre durante el periodo de estudio. Se muestra para los tres forzantes las salidas simuladas utilizando el LAI adaptado a la región. Por cada forzante, se expone la pendiente de la tendencia de descarga [$m^3 s^{-1}$] y significancia asociada, de acuerdo con la prueba de Mann-Kendall Theil-Sen.

de evidencia observacionales con las que se cuenta para este trabajo.

Experimentos que evalúan el sistema de simulación comparando el uso y cobertura del suelo del pasado respecto al del presente

Considerando los resultados expuestos, para avanzar en la resolución de la disparidad simulación-observación y lograr desentrañar la incertidumbre debida a los forzantes meteorológicos respecto a la precisión del modelo, se compararon las simulaciones de los tres forzantes fijando la fracción de PFTs de 1950 –representación del pasado, predominan pasturas– y la de 2016 –representación del presente, predomina la agricultura–.

En la Figura 6.11 se muestra el resumen de los experimentos de esta sección, en el cual se advierte que, para los tres forzantes, la transpiración asociada a la simulación

donde predomina la PFT de pastura (de aquí en adelante llamada simulación 1950) es mayor, en todo el periodo de estudio, que la correspondiente a la simulación donde predomina la PFT agricultura (de aquí en adelante llamada simulación 2016). Siendo que en ambas simulaciones se considera una configuración de vegetación estática durante todo el periodo, se evaluó si la diferencia de las medias de las simulaciones 1950 y 2016 es discernible dentro de la variabilidad climática muestreada en estos análisis (1980-2013). Para ello, se comparó la evapotranspiración y sus componentes de la simulación 1950 respecto a la de 2016 empleando la diferencia de medias respecto al desvío estándar (en particular se tomó dos desviaciones para considerar un intervalo de confianza del 95 %). De acuerdo a este análisis, se tiene que la diferencia entre las series de transpiración de las simulaciones 1950 y 2016 es significativa en el caso de los forzantes WFDE5 y CRUJRA, pero no para GSWP3. Este último resultado se derivaría de la alta variabilidad que presenta GSWP3 respecto a los otros dos forzantes. Con ello, se tiene que para los tres forzantes la transpiración que refiere a la pastura es mayor que la que refiere a los cultivos, acorde a la hipótesis planteada, aunque esta diferencia es significativa para dos de los tres forzantes. Entonces, por la disminución en la transpiración y, con ello, la baja en la pérdida de agua del suelo mediante este mecanismo, es de esperarse que los experimentos que refieren al uso de suelo de 2016 se asocien a un mayor almacenamiento de agua respecto a los de 1950. Sin embargo, esto no necesariamente sería así para el sistema de simulación analizado, ya que para la evapotranspiración simulada, el cambio de vegetación de 1950 por el de 2016 no implica diferencia significativa en el caso de los tres forzantes (Figura 6.11). Esto estaría relacionado, como se explicó anteriormente, con el peso de la demanda atmosférica sobre la evapotranspiración de ORCHIDEE o la sobreestimación de fracción de suelo desnudo. Para los tres forzantes se tiene que la evaporación del suelo desnudo es mayor para 2016 que para 1950 de manera significativa, comportamiento contrario a la transpiración.

| 1950: promedio \pm desviación estandar $\text{mm}^{\text{año}}^{-1}$ 2016: promedio \pm desviación estandar $\text{mm}^{\text{año}}^{-1}$ Promedio ₁₉₅₀ - Promedio ₂₀₁₆ $\hat{>} 2\sigma$ (95%)? | WFDE5 | GSPW3 | CRUJRA |
|--|---|---|---|
| Evapotranspiración | 572.62 \pm 18.42 561.22 \pm 17.18 $X_{1950} - X_{2016} = 11.40 < 2\sigma$ | 540.24 \pm 66.32 518.94 \pm 64.31 $X_{1950} - X_{2016} = 21.30 < 2\sigma$ | 644.22 \pm 29.14 627.48 \pm 28.13 $X_{1950} - X_{2016} = 16.74 < 2\sigma$ |
| Transpiración | 466.65 \pm 17.00 428.79 \pm 16.52 $X_{1950} - X_{2016} = 37.86 > 2\sigma$ | 442.56 \pm 61.17 390.70 \pm 58.30 $X_{1950} - X_{2016} = 51.86 < 2\sigma$ | 528.67 \pm 18.79 483.85 \pm 18.85 $X_{1950} - X_{2016} = 44.82 > 2\sigma$ |
| Evaporación de suelo desnudo | 56.19 \pm 3.38 87.61 \pm 6.14 $ X_{1950} - X_{2016} = 31.42 > 2\sigma$ | 66.77 \pm 8.23 101.40 \pm 13.07 $ X_{1950} - X_{2016} = 34.62 > 2\sigma$ | 50.98 \pm 5.63 84.16 \pm 9.23 $ X_{1950} - X_{2016} = 33.18 > 2\sigma$ |
| Intercepción | 49.73 \pm 5.10 44.77 \pm 4.37 $X_{1950} - X_{2016} = 4.96 < 2\sigma$ | 30.86 \pm 9.14 26.80 \pm 8.77 $X_{1950} - X_{2016} = 4.07 < 2\sigma$ | 64.58 \pm 10.75 59.46 \pm 9.03 $X_{1950} - X_{2016} = 5.11 < 2\sigma$ |

Figura 6.11: Resumen de los experimentos realizados comparando las simulaciones que emplean la fracción vegetación de 1950 para todo el periodo de estudio y las que emplean la de 2016. Se muestran las componentes de la evapotranspiración de las simulaciones 1950 y de 2016 para los tres forzantes. Se expone por cada experimento y componente la diferencia de los promedios de 1950 y de 2016, cuyo valor se compara con dos desviaciones estándar con el fin de evaluar si las simulaciones 1950 y 2016 son distinguibles entre si para un intervalo de confianza del 95 %. Aquellas diferencias que cumplan con esto último son señaladas en negrita y resaltado naranja.

6.3. Reflexiones y perspectivas sobre las limitaciones del modelo ORCHIDEE, forzado por diferentes datasets atmosféricos y considerando el cambio de uso y cobertura del suelo ESA-LUH2 para reproducir la transición hidrológica del núcleo agroproductivo de la Pampas Argentinas

En este capítulo se ha puesto en evidencia que el sistema de simulación representa mejor los mecanismos sugeridos de disminución de la transpiración al emplearse el ciclo de vegetación adaptado a las prácticas agrícolas de la región, en lugar de la pre-determinada. Además, de manera coherente a estudios previos, las simulaciones donde predomina la pastura presentan mayor transpiración que aquellas donde predominan los cultivos. Sin embargo, para los experimentos llevados a cabo, la evapotranspiración simulada no cambia su comportamiento, y la descarga simulada no muestra el mismo comportamiento que se esperaría del observado, según lo discutido.

A continuación, se listan limitantes del sistema de simulación para la representación del cambio hidrológico de la región de estudio:

- La significancia de los cambios varían según el forzante atmosférico. Esto muestra la complejidad del desajuste entre el cambio hidrológico observado y los resultados del sistema de simulación, en el que posiblemente se confunde la *performance* del modelo ORCHIDEE con la incertidumbre de los forzantes atmosféricos.
- El sistema de simulación podría estar gobernado por la demanda atmosférica o estar sobreestimando la fracción de suelo desnudo, y por ello los cambios en la transpiración no se traducen directamente en cambios en la evapotranspiración.
- Otro punto a tener en cuenta es que la base ESA-LUH2 no es representativa de la región, según antecedentes. De acuerdo con datos de uso del suelo a largo plazo

6.3. REFLEXIONES Y PERSPECTIVAS SOBRE LAS LIMITACIONES DEL MODELO ORCHIDEE,

de INTA Marcos Juárez, que se exponen en la Figura 6.12 (Pal y otros, 2021), desde fines de los 70s a fines de los 90s se tiene un dominio de los cultivos anuales sobre la vegetación perenne de la región, cuya diferencia de fracción varía entre 0.4 a 0.6, mientras que para la fuente ESA-LUH2 (Figura 6.6) esta diferencia no supera los 0.1 (i.e., ESA-LUH2 no muestra diferencia notable entre la presencia y dominio de cultivos sobre las pasturas). Siguiente a ese periodo, de principio de los 2000 al presente, según INTA Marcos Juárez el dominio de los cultivos anuales sobre las pasturas perennes pasa a estar representado por una diferencia de aproximadamente 0.9, mientras que para la base ESA-LUH2 esta diferencia es, como máximo, 0.65 (i.e., ESA-LUH2 subestima el dominio de los cultivos anuales por sobre las pasturas perennes).

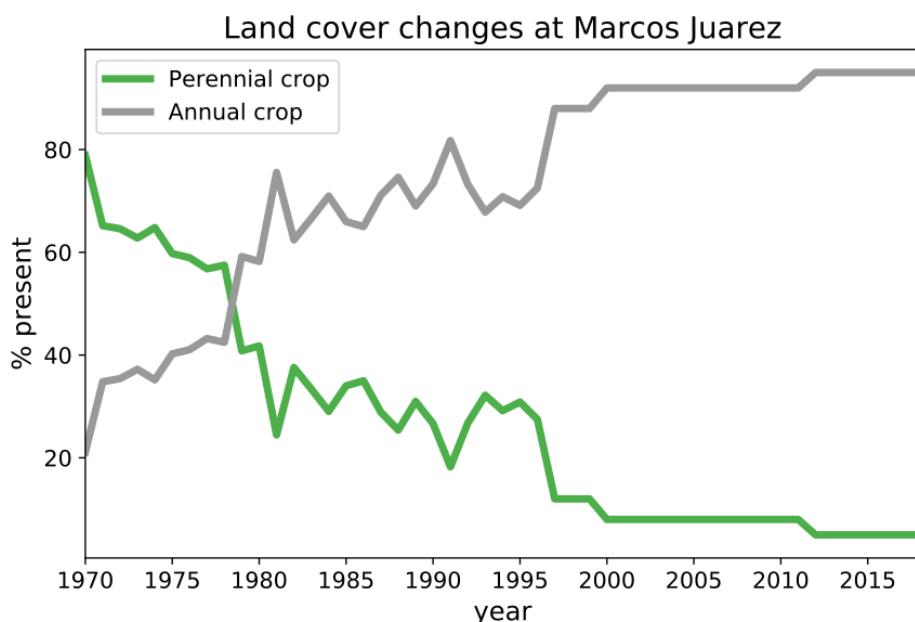


Figura 6.12: Registro a largo plazo de uso y cobertura de la tierra, que indica el cambio de vegetación perenne a cultivos anuales. Gráfico tomado del estudio de Pal y otros (2021), el cual se realizó con datos suministrados por INTA Marcos Juárez.

- El cambio de uso y cobertura de la región estuvo dado principalmente por la sustitución de vegetación perenne de raíces profundas, dominada por pasturas, por cultivos anuales de raíces menos profundas, como la soja. Uno de los cultivos perennes más utilizados en el pasado, y que sufrió una marcada reducción de su área ocupada, es la alfalfa. Una de las características distintivas de la alfalfa

es la capacidad de exploración en el suelo de sus raíces, dado por un profundo y abundante sistema radicular que puede llegar hasta los 6 m (Cancio, 2016). En cuanto a la soja, la profundidad que pueden alcanzar sus raíces es de 2 m (Rafaela, 2017). En este sentido, un experimento adicional que se trazó para esta tesis fue el de explorar el impacto sobre la transpiración y la descarga de río de la región al modificar la profundidad de las raíces de las PFTs de interés. Sin embargo, el modelo ORCHIDEE presenta una profundidad de suelo de 2 m y la distribución de densidad de raíces está dada por un descenso exponencial (de Rosnay y Polcher, 1998). Es así que, no solo se tiene un limitante por parte del modelo para representar sistemas radiculares profundos, sino también si estos son abundantes a profundidades aproximadas a los 2 m.

6.4. Conclusiones

La región de estudio de esta tesis presentó cambios significativos en su sistema hidrológico, atribuidos principalmente al reemplazo de vegetación perenne –dominado por pastos– por cultivos anuales de raíces menos profundas –dominado por la soja–. Este cambio se reflejó en un ascenso del nivel freático, en el aumento de inundaciones y en una disminución en la transpiración regional, según evidencia previa de campo y simulaciones.

Este capítulo se centró en analizar si el sistema de simulación dado por el modelo ORCHIDEE, forzado por diferentes datasets atmosféricos y considerando el cambio de uso y cobertura del suelo de la base ESA-LUH2, es capaz capturar dicha transición hidrológica, o parte de la misma, en términos de la descarga de ríos y transpiración. Se obtuvo que las simulaciones con el ciclo de vegetación adaptado a la región mostraron una mejor representación del comportamiento de la transpiración, respecto a las simulaciones realizadas con el ciclo *default*. Sin embargo, a pesar de la disminución en la transpiración simulada, no se obtuvo una tendencia significativa hacia un aumento en la descarga de la región, hipótesis basada en el ascenso del nivel freático en áreas adyacentes al punto de cierre correspondiente y la tendencia en la descarga observada río abajo. En cuanto a la comparación entre simulaciones con fracción de PFT fija de

1950 –predominio de pastura– y 2016 –predominio de cultivos–, esta reveló que, aunque la transpiración asociada a las pasturas es mayor que la asociada a los cultivos, estas diferencias no fueron significativas para todos los forzantes.

Estos hallazgos sugieren que, aunque el sistema de simulación considerado puede capturar ciertos aspectos de los procesos hidrológicos de las llanuras agrícolas de Argentina, aún existen desafíos para modelar con precisión el cambio hidrológico observado. Es importante resaltar que los aspectos sí capturados, según las hipótesis consideradas para este capítulo, fueron resultado de adaptar el ciclo de vegetación del modelo, en lugar de simplemente utilizar la información *default*, la cual está basada en observaciones procedentes principalmente de latitudes altas del hemisferio norte.

Con lo aquí mostrado, se resalta la complejidad del desajuste entre los resultados del sistema de simulación y el cambio hidrológico observado, que posiblemente confunde el rendimiento del modelo –por ejemplo, que su evapotranspiración pareciera estar gobernada por la demanda atmosférica, pese a que sus configuraciones sean modificadas– con la incertidumbre intrínseca de los forzantes y de los datos acerca cambio de uso del suelo.

Capítulo 7

Conclusiones generales

Esta tesis aborda de manera integral el estudio de la transición hidrológica que experimenta la Llanura Pampeana Argentina de 1980 a la actualidad, la cual acompaña los cambios en el uso y cobertura de sus suelos, en particular la sustitución de vegetación perenne por cultivos anuales. La región que aquí se estudia es una llanura extremadamente plana, que forma parte del núcleo agroproductivo del país y es propensa a inundaciones y anegamientos. En los últimos 40 años, ha sufrido el ascenso de su nivel freático, y asociado a ello, el aumento de su área inundada. En este contexto, y debido a la acción simultánea de precipitaciones, napa freática, percolación y evapotranspiración que presenta la región, la misma resulta un laboratorio natural “ideal” para examinar rangos de amplia variabilidad de contenido de agua del suelo superficial y sub-superficial.

En el transcurso de este trabajo, análisis de información sobre la presencia de agua en superficie revelaron que las inundaciones de la región se describen con mayor representatividad si, además de considerar únicamente agua “abierta pura” (*open water*), también se incluye la combinación de agua con otros elementos característicos de la cobertura de la región, en este caso vegetación y/o suelo desnudo (*mixed water*). Se ha demostrado que, aunque la mayoría del agua en superficie se clasifica como *open water*, eventos de precipitación intensa tienden a aumentar la proporción de área dada por *mixed water*. Este hallazgo subraya la importancia de adoptar metodologías de análisis que puedan capturar esta complejidad, especialmente en contextos agrícolas donde las características del agua superficial pueden variar ampliamente, y evidenciando que las

inundaciones a menudo se representan de manera más completa cuando se considera esta variabilidad.

Además, se mostró que la precipitación acumulada de los meses de máxima precipitación –noviembre a marzo– tiene una asociación significativa con los meses de mayor inundación –abril, mayo, junio y julio–. Este análisis reveló que, aunque los cambios en extremos de precipitación diaria y mensual son ampliamente usados por la comunidad climatológica para describir cambios en las inundaciones, su empleo no es útil para describir el cambio de las inundaciones de la región de interés. Sin embargo, la precipitación acumulada sí desempeña un rol crucial en la dinámica de estas inundaciones, relación que se ha intensificado en la actualidad respecto a períodos pasados. Asimismo la asociación entre el ascenso del nivel freático y el incremento de áreas inundadas también ha aumentado en la actualidad, en un contexto donde cambios de cobertura de uso del suelo de la región han acentuado estos procesos hidrológicos. Lo aquí expuesto destaca la importancia de una comprensión profunda de los datos y las limitaciones de las metodologías que se suponen estándar que, como es en este caso, pueden no capturar adecuadamente fenómenos como las inundaciones lentas y persistentes de la región. Adicionalmente, se resalta la necesidad de enfoques regionales más detallados para evaluar estos fenómenos.

El estudio también pone en evidencia que las lagunas de datos en estimaciones de humedad de suelo de programas satelitales pueden ser malinterpretadas si no se combinan con información de diversas fuentes. En este sentido, se mostró que el impacto puede ser desde no revelar eventos de inundación severos para la región según medios e información local, a describir condiciones de bajo contenido de agua del suelo cuando otras bases de datos revelan el comportamiento contrario. El trabajo también muestra y discute que, aunque las mediciones *in situ* suelen tratarse como la base más confiable, esta puede estar sujeta a sesgos debido a la ubicación de los dispositivos en el paisaje y las condiciones del suelo. Por ejemplo, los sensores *in situ* instalados en posiciones particulares pueden no representar con precisión las dinámicas de inundación y cultivo de la región en su totalidad. La integración de múltiples fuentes de información, incluyendo datos satelitales y reportes locales, se mostró fundamental para una interpretación más precisa y completa de las condiciones hidrológicas. Esto es especialmente

relevante en contextos donde las tecnologías satelitales existentes pueden filtrar datos de alta humedad, generando puntos ciegos críticos que podrían dar lugar a conclusiones erróneas.

Otra fuente de información empleada fue un modelo de superficie terrestre desarrollado en el Norte Global, cuya información *default* está basada en observaciones procedentes principalmente de latitudes altas del hemisferio norte. El análisis del modelo, forzado por diferentes datasets atmosféricos y cambios en el uso del suelo, mostró que el sistema de simulación adaptado a las prácticas agrícolas de la región mejoró la representación del comportamiento de la transpiración. Sin embargo, aún enfrenta desafíos para simular con precisión variaciones en la descarga de ríos respecto a la evidencia observacional con la que se cuenta para este trabajo. Esto ilustra la dificultad de trasladar modelos desarrollados en el Norte Global a contextos del Sur Global, donde las condiciones y dinámicas locales pueden ser significativamente diferentes. Este hallazgo refuerza la necesidad de desarrollar y priorizar agendas de investigación locales que aborden los desafíos específicos del Sur Global.

Finalmente, la tesis resalta la necesidad de fortalecer las colaboraciones a nivel subnacional, nacional y regional. Los informes y datos de organismos locales y regionales ofrecen una perspectiva valiosa que las fuentes de información global a menudo no capturan. Integrar estos conocimientos regionales permite una comprensión más holística y precisa de los fenómenos hidrológicos, promoviendo una gestión más efectiva y adaptada a las realidades locales. Se muestra y enfatiza la importancia de un enfoque integrado y regional para abordar desafíos inherentes al ciclo del agua de regiones del Sur Global, reconociendo la necesidad de modelos y estrategias de investigación que reflejen las realidades específicas de cada región. Adicionalmente, y considerando el actual contexto de creciente demanda mundial de alimentos, la tesis subraya la importancia de estrategias de gestión integradas que consideren tanto factores climáticos como ambientales y sociales, así como la fenología de los cultivos y las decisiones agroproductivas.

Bibliografía

- Acharya, T. D., Subedi, A., y Lee, D. H. (2018). Evaluation of water indices for surface water extraction in a landsat 8 scene of nepal. *Sensors*, 18(8):2580.
- Al Bitar, A., Mialon, A., Kerr, Y. H., Cabot, F., Richaume, P., Jacquette, E., Quesney, A., Mahmoodi, A., Tarot, S., y Parrens, M. (2017). The global smos level 3 daily soil moisture and brightness temperature maps. *Earth System Science Data*, 9(1): 293–315.
- Alley, W. M., Reilly, T. E., y Franke, O. L. (1999). *Sustainability of ground-water resources*, volumen 1186. US Department of the Interior, US Geological Survey.
- Alsina, S., Nosetto, M. D., y Jobbágy, E. G. (2020). Base de datos napa: Primera síntesis de la dinámica freática pampeana desde 1950 al presente. *Ciencia del suelo*, 38(2):262–273.
- Amdan, M. L., Aragón, R., Jobbágy, E. G., Volante, J. N., y Paruelo, J. M. (2013). Onset of deep drainage and salt mobilization following forest clearing and cultivation in the chaco plains (argentina). *Water resources research*, 49(10):6601–6612.
- Argentina Investiga (2014). Inundaciones en córdoba: riesgo sanitario y de infraestructura. https://argentinainvestiga.edu.ar/noticia.php?titulo=inundaciones_en_crdoba_riesgo_sanitario_y_de_infraestructura&id=2182#, consultado el 18 de junio de 2024.
- Arst, H., Arst, K. I., y Arst, K. I. (2003). *Optical properties and remote sensing of multicomponental water bodies*. Springer Science & Business Media.

- Baldi, G. y Paruelo, J. M. (2008). Land-use and land cover dynamics in south american temperate grasslands. *Ecology and Society*, 13(2).
- Baldissera Pacchetti, M., Jebeile, J., y Thompson, E. (2024). For a pluralism of climate modeling strategies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(7):E1350–E1364.
- Barsugli, J. J., Guentchev, G., Horton, R. M., Wood, A., Mearns, L. O., Liang, X.-Z., Winkler, J. A., Dixon, K., Hayhoe, K., y Rood, R. B. (2013). The practitioner's dilemma: How to assess the credibility of downscaled climate projections. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(46):424–425.
- Benítez, V. D., Forgioni, F. P., Lovino, M. A., Sgroi, L., Doyle, M. E., y Müller, G. V. (2024). Capability of satellite data to estimate observed precipitation in southeastern south america. *International Journal of Climatology*, 44(3):792–811.
- Bierkens, M. F. (2015). Global hydrology 2015: State, trends, and directions. *Water Resources Research*, 51(7):4923–4947.
- Bollatti, P., Bodrero, M., y Escolá, F. (2017). ¡Atención! Napas altas: el desafío de actuar en conjunto. *INTA Agencia de Extensión Rural Marcos Juárez*.
- Bolsa de Cereales de Córdoba (2019). Inundaciones en Córdoba: riesgo sanitario y de infraestructura. <https://www.bccba.org.ar/informes/situacion-de-inundaciones-en-el-sudeste-de-la-provincia-de-cordoba/>, consultado el 18 de junio de 2024.
- Bomblies, A. y Eltahir, E. A. (2009). Assessment of the impact of climate shifts on malaria transmission in the sahel. *EcoHealth*, 6:426–437.
- Bonan, G. B. y Stillwell-Soller, L. M. (1998). Soil water and the persistence of floods and droughts in the mississippi river basin. *Water Resources Research*, 34(10):2693–2701.
- Boschetti, M., Nutini, F., Manfron, G., Brivio, P. A., y Nelson, A. (2014). Comparative analysis of normalised difference spectral indices derived from modis for detecting surface water in flooded rice cropping systems. *PloS one*, 9(2):e88741.

- Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., y Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: Open questions and new opportunities. *Water*, 9(2): 140.
- Brooks, R. H. (1965). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University.
- Campoy, A., Ducharne, A., Cheruy, F., Hourdin, F., Polcher, J., y Dupont, J. (2013). Response of land surface fluxes and precipitation to different soil bottom hydrological conditions in a general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19):10–725.
- Cancio, H. (2016). Cultivo de alfalfa. Technical report, EEA Alto Valle, INTA.
- Capdevila, J., Francisca, F. M., y Zanni, E. (2016). Patologías estructurales asociadas al ascenso de la napa freática en el sureste de la provincia de Córdoba. *Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*.
- Cappelletti, L. M., Sörensson, A. A., Salvia, M., Ruscica, R. C., Spennemann, P., Fernandez-Long, M. E., y Jobbág, E. (2022). Soil moisture estimates over sporadically flooded farmlands: Synergies and biases of remote sensing and in situ sources. *International Journal of Remote Sensing*, 43(19-24):6979–7001.
- Cavazos, T., Bettolli, M. L., Campbell, D., Sánchez Rodríguez, R. A., Mycoo, M., Arias, P. A., Rivera, J., Reboita, M. S., Gulizia, C., Hidalgo, H. G., Alfaro, E. J., Stephenson, T. S., Sörensson, A. A., Cerezo-Mota, R., Castellanos, E., Ley, D., y Mahon, R. (2024). Challenges for climate change adaptation in Latin America and the Caribbean region. *Frontiers in Climate*, 6. doi: 10.3389/fclim.2024.1392033.
- Chakrabarti, S., Bongiovanni, T., Judge, J., Zotarelli, L., y Bayer, C. (2014). Assimilation of SMOS soil moisture for quantifying drought impacts on crop yield in agricultural regions. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9):3867–3879.
- Chen, S., She, D., Zhang, L., Guo, M., y Liu, X. (2019). Spatial downscaling methods of soil moisture based on multisource remote sensing data and its application. *Water*, 11(7):1401.

- Colliander, A., Jackson, T. J., Bindlish, R., Chan, S., Das, N., Kim, S., Cosh, M., Dunbar, R., Dang, L., y Pashaian, L. (2017). Validation of smap surface soil moisture products with core validation sites. *Remote sensing of environment*, 191:215–231.
- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M. C., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Maugeri, M., Mok, H. Y., Nordli, O., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D., y Worley, S. J. (2011). The twentieth century reanalysis project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654):1–28.
- Cui, C., Xu, J., Zeng, J., Chen, K.-S., Bai, X., Lu, H., Chen, Q., y Zhao, T. (2017). Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison of smap, smos, fy3b, amsr2, and esa cci over two dense network regions at different spatial scales. *Remote Sensing*, 10(1):33.
- Dall'Amico, J. T., Schlenz, F., Loew, A., y Mauser, W. (2011). First results of smos soil moisture validation in the upper danube catchment. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5):1507–1516.
- De Rosnay, P., Bruen, M., y Polcher, J. (2000). Sensitivity of surface fluxes to the number of layers in the soil model used in gcms. *Geophysical research letters*, 27(20): 3329–3332.
- de Rosnay, P. y Polcher, J. (1998). Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a gcm. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2(2/3): 239–255.
- De Rosnay, P., Polcher, J. d., Bruen, M., y Laval, K. (2002). Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large-scale land surface processes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107 (D11):ACL–3.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., y Bauer, d. P. (2011). The era-interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, 137(656):553–597.

Díaz Lozada, J. M., Garcia Rodriguez, C. M., Herrero, H. S. J., Heredia Ligorria, A. I., Lopez, F., Castelló, E., y Brarda, J. P. (2016). Caracterización experimental y numérica de eventos de crecida extraordinarios en la cuenca del río carcarañá, argentina.

Dinku, T., Hailemariam, K., Maidment, R., Tarnavsky, E., y Connor, S. (2014). Combined use of satellite estimates and rain gauge observations to generate high-quality historical rainfall time series over ethiopia. *International Journal of Climatology*, 34 (7):2489–2504.

Doblas-Reyes, F., Sörensson, A., Almazroui, M., Dosio, A., Gutowski, W., Haarsma, R., Hamdi, R., Hewitson, B., Kwon, W., y Lamptey, B. (2021). Linking global to regional climate change climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., y Disse, M. (2016). Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in adige basin (italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of the Total Environment*, 573:1536–1553.

Ducoudré, N. I., Laval, K., y Perrier, A. (1993). Sechiba, a new set of parameterizations of the hydrologic exchanges at the land-atmosphere interface within the lmd atmospheric general circulation model. *Journal of Climate*, pp. 248–273.

Ehsan Bhuiyan, M. A., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Polcher, J., Albergel, C., Dutra, E., Fink, G., Martínez-de La Torre, A., y Munier, S. (2019). Assessment of precipitation error propagation in multi-model global water resource reanalysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(4):1973–1994.

- Entekhabi, D., Yueh, S., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Allen, A., Bindlish, R., Brown, M., Chan, S., Colliander, A., y Crow, W. T. (2014). Smap handbook–soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space.
- ESA-CCI (2017). Esa: Land cover cci product user guide version 2.0.
- FADA (2021). Monitor de exportaciones agroindustriales: primer semestre 2021. <https://fundacionfada.org/informes/monitor-de-exportaciones-agroindustriales-primer-semestre-2021>. consultado el 18 de junio de 2024.
- Fan, Y., Li, H., y Miguez-Macho, G. (2013). Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339(6122):940–943.
- Federación de Centros y Entidades Gremiales de Acopiadores de Cereales (2016). Córdoba, la húmeda: millones de hectáreas se vuelven improductivas. <http://www.acopiadores.com/noticia/19970/cordoba-la-humeda-millones-de-hectareas-se-vuelven-improductivas>, consultado el 18 de junio de 2024.
- Fernández-Long, M. E., Peretti, M., Carnelos, D., Della-Chiesa, T., y Spescha, L. (2021). Characterization of the seasonal variation of soil moisture in argentina. *International Journal of Climatology*, 41:E537–E547.
- Ferone, J. y Devito, K. (2004). Shallow groundwater–surface water interactions in pond–peatland complexes along a boreal plains topographic gradient. *Journal of Hydrology*, 292(1-4):75–95.
- Ferral, A., Luccini, E., Aleksinkó, A., y Scavuzzo, C. M. (2019). Flooded-area satellite monitoring within a ramsar wetland nature reserve in argentina. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 15:100230.
- Fetter, C. W. (1994). *Applied hydrogeology*. Waveland Press.
- Field, C. B. y Barros, V. R. (2014). *Climate change 2014–Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects*. Cambridge University Press.

- Fisher, A., Flood, N., y Danaher, T. (2016). Comparing landsat water index methods for automated water classification in eastern australia. *Remote Sensing of Environment*, 175:167–182.
- Foga, S., Scaramuzza, P. L., Guo, S., Zhu, Z., Dilley Jr, R. D., Beckmann, T., Schmidt, G. L., Dwyer, J. L., Hughes, M. J., y Laue, B. (2017). Cloud detection algorithm comparison and validation for operational landsat data products. *Remote sensing of environment*, 194:379–390.
- Ganguli, P., Nandamuri, Y. R., y Chatterjee, C. (2020). Analysis of persistence in the flood timing and the role of catchment wetness on flood generation in a large river basin in india. *Theoretical and Applied Climatology*, 139:373–388.
- Giménez, R., Mercau, J., Nosetto, M., Páez, R., y Jobbág, E. (2016). The ecohydrological imprint of deforestation in the semiarid chaco: insights from the last forest remnants of a highly cultivated landscape. *Hydrological Processes*, 30(15):2603–2616.
- Gómez, M., Blarasín, M., Cabrera, A., y Matteoda, E. (2006). Variaciones de nivel freático y contaminación del acuífero en la zona de coronel moldes, córdoba. En *1º Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, Argentina*.
- Gruber, A., Su, C.-H., Zwieback, S., Crow, W., Dorigo, W., y Wagner, W. (2016). Recent advances in (soil moisture) triple collocation analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45:200–211.
- Gstaiger, V., Huth, J., Gebhardt, S., Wehrmann, T., y Kuenzer, C. (2012). Multisensoral and automated derivation of inundated areas using terrasar-x and envisat asar data. *International journal of remote sensing*, 33(22):7291–7304.
- Guerra, J. C. y Nosetto, M. D. (2024). Hydrological changes in a plain basin in central argentina following expansion of rainfed agriculture and climate change. *Ecohydrology*, p. e2679.
- Gumuzzio, A., Brocca, L., Sánchez, N., González-Zamora, A., y Martínez-Fernández,

- J. (2016). Comparison of smos, modelled and in situ long-term soil moisture series in the northwest of spain. *Hydrological Sciences Journal*, 61(14):2610–2625.
- Gutiérrez, J., Ranasinghe, R., Ruane, A., Vautard, R., Arnell, N., y Coppola, E. (2021). Annex vi: Climatic impact-driver and extreme indices. *Climate change*, pp. 2205–2214.
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., y Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the cru ts3. 10 dataset. *International journal of climatology*, 34(3):623–642.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., y Schepers, D. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.
- Hewitson, B., Waagsaether, K., Wohland, J., Kloppers, K., y Kara, T. (2017). Climate information websites: an evolving landscape. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(5):e470.
- Houspanossian, J., Giménez, R., Whitworth-Hulse, J. I., Noetto, M. D., Tych, W., Atkinson, P. M., Rufino, M. C., y Jobbágy, E. G. (2023). Agricultural expansion raises groundwater and increases flooding in the south american plains. *Science*, 380 (6652):1344–1348.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K.-L., Joyce, R. J., y Kidd (2019). Gpm imerg final precipitation l3 half hourly 0.1° degree $\times 0.1^\circ$ degree v06. Technical report, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K.-L., Joyce, R. J., Kidd, C., Nelkin, E. J., Sorooshian, S., Stocker, E. F., y Tan, J. (2020). Integrated multi-satellite retrievals for the global precipitation measurement (gpm) mission (imerg). *Satellite precipitation measurement: Volume 1*, pp. 343–353.
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K. P., y Stocker, E. F. (2007). The trmm multisatellite precipitation

- analysis (tmpa): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of hydrometeorology*, 8(1):38–55.
- Hurtt, G. C., Chini, L. P., Frolking, S., Betts, R. A., Feddema, J., Fischer, G., Fisk, J. P., Hibbard, K., Houghton, R. A., Janetos, A., Jones, C. D., Kindermann, G., Kinoshita, T., Klein Goldewijk, K., Riahi, K., Shevliakova, E., Smith, S., Stehfest, E., Thomson, A., Thornton, P., van Vuuren, D. P., y Wang, Y. P. (2011). Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. *Climatic Change*, 109(1–2):117–161. doi: 10.1007/s10584-011-0153-2.
- IDECOR (2018). Coberturas agrícolas 2017/2018. mapas córdoba. infraestructura de datos espaciales de la provincia de córdoba. gobierno de la provincia de córdoba. <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/22>, consultado el 18 de junio de 2024.
- IDECOR (2023a). Cobertura y uso de suelo 2022-2023. mapas córdoba. infraestructura de datos espaciales de la provincia de córdoba. gobierno de la provincia de córdoba. <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/482>, consultado el 18 de junio de 2024.
- IDECOR (2023b). Coberturas agrícola estivales 2022-2023. mapas córdoba. infraestructura de datos espaciales de la provincia de córdoba. gobierno de la provincia de córdoba. <https://mapascordoba.gob.ar/viewer/mapa/462>, consultado el 18 de junio de 2024.
- Iriondo, M. y Drago, E. (2004). The headwater hydrographic characteristics of large plains: The pampa case. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 4:7–16.
- Ishak, E. y Rahman, A. (2019). Examination of changes in flood data in australia. *Water*, 11(8):1734.
- Jobbág, E. G., Aguiar, S., Piñeiro, G., y Garibaldi, L. A. (2021). Impronta ambiental de la agricultura de granos en argentina: revisando desafíos propios y ajenos.

- Jobbág, E. G., Lorenzo, S., Buono, N., Páez, R., Diaz, Y., Marchesini, V., y Nosetto, M. D. (2021). Plants versus streams: Their groundwater-mediated competition at “el morro” a developing catchment in the dry plains of argentina. *Hydrological Processes*, 35(5):e14188.
- Jobbagy, E. G., Nosetto, M. D., Santoni, C. S., y 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.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., y Woollen, J. (2018). *The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project*. Routledge.
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M.-J., Font, J., Reul, N., y Gruhier, C. (2010). The smos mission: New tool for monitoring key elements ofthe global water cycle. *Proceedings of the IEEE*, 98 (5):666–687.
- Kim, H. (2017). Global soil wetness project phase 3 atmospheric boundary conditions (experiment 1). (*No Title*).
- Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebita, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., y Endo, H. (2015). The jra-55 reanalysis: General specifications and basic characteristics. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 93(1):5–48.
- Kocsis, T., Kovács-Székely, I., y Anda, A. (2020). Homogeneity tests and non-parametric analyses of tendencies in precipitation time series in keszthely, western hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 139(3):849–859.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., y Prentice, I. C. (2005). A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1).

- Kuppel, S., Houspanossian, J., Nosetto, M. D., y Jobbágy, E. (2015). What does it take to flood the pampas?: Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resources Research*, 51(4):2937–2950.
- Laio, F., Porporato, A., Ridolfi, L., y Rodriguez-Iturbe, I. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: II. probabilistic soil moisture dynamics. *Advances in water resources*, 24(7): 707–723.
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., Bettadpur, S. V., Byun, S. H., Dahle, C., y Dobslaw, H. (2020). Extending the global mass change data record: Grace follow-on instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12):e2020GL088306.
- Landerer, F. W. y Swenson, S. (2012). Accuracy of scaled grace terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48(4).
- Lawn, R. e Imrie, B. (1994). Exploiting physiology in crop improvement: matching genotypes to the environment.
- Li, L., Su, H., Du, Q., y Wu, T. (2021). A novel surface water index using local background information for long term and large-scale landsat images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 172:59–78.
- Li, L., Vrieling, A., Skidmore, A., Wang, T., Muñoz, A.-R., y Turak, E. (2015). Evaluation of modis spectral indices for monitoring hydrological dynamics of a small, seasonally-flooded wetland in southern spain. *Wetlands*, 35:851–864.
- Li, X., Li, Z., Fu, W., y Li, F. (2024). The influence of shallow groundwater on the physicochemical properties of field soil, crop yield, and groundwater. *Agriculture*, 14 (3):341.
- Longino, H. E. (2004). How values can be good for science. *Science, values, and objectivity*, pp. 127–142.
- Lorenz, R., Jaeger, E. B., y Seneviratne, S. I. (2010). Persistence of heat waves and its link to soil moisture memory. *Geophysical Research Letters*, 37(9).

- Ma, Z., Liu, Z., Zhao, Y., Zhang, L., Liu, D., Ren, T., Zhang, X., y Li, S. (2020). An unsupervised crop classification method based on principal components isometric binning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(11):648.
- MacBean, N., Maignan, F., Peylin, P., Bacour, C., Bréon, F.-M., y Ciais, P. (2015). Using satellite data to improve the leaf phenology of a global terrestrial biosphere model. *Biogeosciences*, 12(23):7185–7208.
- Maertens, M., De Lannoy, G. J., Apers, S., Kumar, S. V., y Mahanama, S. P. (2021). Land surface modeling over the dry chaco: the impact of model structures, and soil, vegetation and land cover parameters. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(7): 4099–4125.
- Manzoni, S., Schimel, J. P., y Porporato, A. (2012). Responses of soil microbial communities to water stress: results from a meta-analysis. *Ecology*, 93(4):930–938.
- Maraun, D. y Widmann, M. (2018). *Statistical downscaling and bias correction for climate research*. Cambridge University Press.
- Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Sánchez, N., Gumuzzio, A., y Herrero-Jiménez, C. (2016). Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the smos derived soil water deficit index. *Remote Sensing of Environment*, 177:277–286.
- Martínez Alvarez, D. L. (2012). *Historia de la soja en la Argentina: Introducción y adopción del cultivo*, pp. 11–31.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, S., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M., y Scheel Monteiro, P. M. (2021). Ipcc, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., y Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2):100–104.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (ndwi) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7):1425–1432.

McKenzie, F. C. y Williams, J. (2015). Sustainable food production: constraints, challenges and choices by 2050. *Food Security*, 7:221–233.

Mercau, J. L., Nosetto, M. D., Bert, F., Giménez, R., y Jobbágy, E. G. (2016). Shallow groundwater dynamics in the pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management*, 163:159–168.

Ministerio de Agricultura y Ganadería, Gobierno de la Provincia de Córdoba (2023). Cartas de suelos de córdoba. ministerio de agricultura y ganadería, gobierno de la provincia de córdoba. <https://suelos.cba.gov.ar/>, consultado el 18 de junio de 2024.

Ministerio de Interior, Obra Pública y Vivienda, Gobierno de la Provincia de Córdoba (2016). Sistematización de desagües urbanos en el tejido urbano de monte buey, provincia de córdoba. ministerio de interior, obra pública y vivienda, gobierno de la provincia de córdoba. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sistematizacion_de_desague_urbanos_en_el_ejido_urbaro_de_montebuey.pdf, consultado el 18 de junio de 2024.

Mladenova, I. E., Bolten, J. D., Crow, W. T., Anderson, M. C., Hain, C. R., Johnson, D. M., y Mueller, R. (2017). Intercomparison of soil moisture, evaporative stress, and vegetation indices for estimating corn and soybean yields over the us. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10 (4):1328–1343.

Morrison, M. A. (2023). Enhancing the actionability of gewex projects: Designing responsible and collaborative processes. *Global Energy and Water Cycle Experiment (GEWEX) Quarterly Newsletter*, 33(3).

- Nosetto, M. D., Acosta, A., Jayawickreme, D., Ballesteros, S., Jackson, R., y Jobbágy, E. (2013). Land-use and topography shape soil and groundwater salinity in central argentina. *Agricultural Water Management*, 129:120–129.
- Nosetto, M. D., Paez, R. A., Ballesteros, S., y Jobbágy, E. (2015). Higher water-table levels and flooding risk under grain vs. livestock production systems in the subhumid plains of the pampas. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 206:60–70.
- Ogilvie, A., Belaud, G., Delenne, C., Bailly, J.-S., Bader, J.-C., Oleksiak, A., Ferry, L., y Martin, D. (2015). Decadal monitoring of the niger inner delta flood dynamics using modis optical data. *Journal of Hydrology*, 523:368–383.
- Oleksiak, A. (2008). *Suivi par télédétection de la dynamique de crue du delta intérieur du Niger pour l'élaboration d'un modèle de fonctionnement hydraulique*. Tesis doctoral, Master 2 profesional TGAE: Télédétection et Géomatique Appliquées à l....
- Oliva, R., Daganzo, E., Richaume, P., Kerr, Y., Cabot, F., Soldo, Y., Anterrieu, E., Reul, N., Gutierrez, A., y Barbosa, J. (2016). Status of radio frequency interference (rfi) in the 1400–1427 mhz passive band based on six years of smos mission. *Remote sensing of environment*, 180:64–75.
- O'Neill, P., Chan, S., Njoku, E., Jackson, T., Bindlish, R., y Chaubell, J. (2019). Smap l3 radiometer global daily 36 km ease-grid soil moisture, version 6.[indicate subset used]. *Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center*. doi: <https://doi.org/10.5067/EVYDQ32FNWTH>.
- Pablos, M., Piles, M., González-Haro, C., y Team, B. (2019). Bec smos land products description.
- Pal, S., Dominguez, F., Bollatti, P., Oncley, S. P., Yang, Y., Alvarez, J., y Garcia, C. M. (2021). Investigating the effects of land use change on subsurface, surface, and atmospheric branches of the hydrologic cycle in central argentina. *Water Resources Research*, 57(11):e2021WR029704.

- Pascale, A. J. y Damario, E. A. (2004). *Bioclimatología agrícola y agroclimatología*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires (Argentina). Facultad de Agronomía.
- Passucci, V., Carmona, F., y Rivas, R. (2017). Identificación de zonas anegadas y no anegadas mediante técnicas de teledetección. *Estudios Ambientales*, 5.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., y Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., y Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633):418–422.
- Peng, J., Albergel, C., Balenzano, A., Brocca, L., Cartus, O., Cosh, M. H., Crow, W. T., Dabrowska-Zielinska, K., Dadson, S., y Davidson, M. W. (2021). A roadmap for high-resolution satellite soil moisture applications—confronting product characteristics with user requirements. *Remote Sensing of Environment*, 252:112162.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2):126–135.
- Pirastru, M. y Niedda, M. (2013). Evaluation of the soil water balance in an alluvial flood plain with a shallow groundwater table. *Hydrological Sciences Journal*, 58(4):898–911.
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., y Mackay, D. (2020). Groundwater in our water cycle—getting to know earth's most important fresh water source. the groundwater project, guelph, ontario, canadá.
- Porporato, A., D'odorico, P., Laio, F., y Rodriguez-Iturbe, I. (2003). Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. i. modeling scheme. *Advances in water resources*, 26(1):45–58.
- Portal, G., Jagdhuber, T., Vall-llossera, M., Camps, A., Pablos, M., Entekhabi, D., y Piles, M. (2020). Assessment of multi-scale smos and smap soil moisture products across the iberian peninsula. *Remote Sensing*, 12(3):570.

- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M. C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Song, X.-P., Pickens, A., Shen, Q., y Cortez, J. (2022). Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nature Food*, 3(1):19–28.
- Pulkkinen, K., Undorf, S., Bender, F., Wikman-Svahn, P., Doblas-Reyes, F., Flynn, C., Hegerl, G. C., Jönsson, A., Leung, G.-K., y Roussos, J. (2022). The value of values in climate science. *Nature Climate Change*, 12(1):4–6.
- Rafaela, I. E. E. A. (2017). Información técnica de cultivos de verano. campaña 2017-2018. Technical report, Ediciones INTA.
- Ranasinghe, R., Ruane, A. C., Vautard, R., Arnell, N., Coppola, E., Cruz, F. A., Dessai, S., Islam, A. S., Rahimi, M., Ruiz Carrascal, D., Sillmann, J., Sylla, M. B., Tebaldi, C., Wang, W., y Zaaboul, R. (2021). *Chapter 12: Climate change information for regional impact and for risk assessment*, pp. 1767–1926. Cambridge University Press.
- Raoult, N., Ruscica, R. C., Salvia, M. M., y Sörensson, A. A. (2022). Soil moisture dry-down detection is hindered by model-based rescaling. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19:1–5.
- Reboratti, C. (2010). Un mar de soja: la nueva agricultura en Argentina y sus consecuencias. *Revista de geografía Norte Grande*, pp. 63 – 76.
- Reynolds, C., Jackson, T., y Rawls, W. (2000). Estimating soil water-holding capacities by linking the food and agriculture organization soil map of the world with global pedon databases and continuous pedotransfer functions. *Water Resources Research*, 36(12):3653–3662.
- Rizzo, G., Edreira, J. I. R., Archontoulis, S. V., Yang, H. S., y Grassini, P. (2018). Do shallow water tables contribute to high and stable maize yields in the us corn belt? *Global food security*, 18:27–34.
- Rodríguez-Iturbe, I., D'odorico, P., Porporato, A., y Ridolfi, L. (1999). On the spatial and temporal links between vegetation, climate, and soil moisture. *Water Resources Research*, 35(12):3709–3722.

- Rodriguez-Iturbe, I., Porporato, A., Laio, F., y Ridolfi, L. (2001). Plants in water-controlled ecosystems: active role in hydrologic processes and response to water stress: I. scope and general outline. *Advances in Water Resources*, 24(7):695–705.
- Rondinelli, W. J., Hornbuckle, B. K., Patton, J. C., Cosh, M. H., Walker, V. A., Carr, B. D., y Logsdon, S. D. (2015). Different rates of soil drying after rainfall are observed by the smos satellite and the south fork in situ soil moisture network. *Journal of Hydrometeorology*, 16(2):889 – 903. doi: 10.1175/JHM-D-14-0137.1.
- Rosales, D. A. (2023). *Evapotranspiración modelada en Sudamérica : influencia del cambio climático y del uso de suelo*. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- Rosenzweig, C., Tubiello, F. N., Goldberg, R., Mills, E., y Bloomfield, J. (2002). Increased crop damage in the us from excess precipitation under climate change. *Global Environmental Change*, 12(3):197–202.
- Rössler, O., Fischer, A. M., Huebener, H., Maraun, D., Benestad, R. E., Christodoulides, P., Soares, P. M., Cardoso, R. M., Pagé, C., y Kanamaru, H. (2019). Challenges to link climate change data provision and user needs: Perspective from the cost-action value. *International Journal of Climatology*, 39(9):3704–3716.
- Ruiz, A., Coyos, T., Pagnan, L., y Errasquin, L. (2017). Momento de aplicación de nitrógeno y aporte de fertilización foliar sobre el rendimiento y la calidad en trigo. la experiencia de la chacra justiniano posse. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*.
- Ruscica, R. C., Polcher, J., Salvia, M. M., Sörensson, A. A., Piles, M., Jobbágy, E. G., y Karszenbaum, H. (2020). Spatio-temporal soil drying in southeastern south america: The importance of effective sampling frequency and observational errors on drydown time scale estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 41(20):7958–7992.
- Ryberg, K. R., Hodgkins, G. A., y Dudley, R. W. (2020). Change points in annual peak streamflows: Method comparisons and historical change points in the united states. *Journal of Hydrology*, 583:124307.

- Schneider, U., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., Rustemeier, E., Ziese, M., y Becker, A. (2017). Evaluating the hydrological cycle over land using the newly-corrected precipitation climatology from the global precipitation climatology centre (gpcc). *Atmosphere*, 8(3):52.
- Schneider, U., Hänsel, S., Finger, P., Rustemeier, E., y Ziese, M. (2022). Gpcc full data monthly product version 2022 at 0.25°: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on gts-based and historical data. *Global Precipitation Climatology Centre at Deutscher Wetterdienst*.
- Schapffer, A. (2022). *High-resolution numerical analysis of land-river-floodplains-atmosphere interaction in La Plata Basin*. Tesis doctoral, Institut Polytechnique de Paris; Universidad de Buenos Aires.
- Schapffer, A., Polcher, J., Sörensson, A., y Fita, L. (2023). Introducing a new floodplain scheme in orchidee (version 7885): validation and evaluation over the pantanal wetlands. *Geoscientific Model Development*, 16(20):5755–5782.
- Schapffer, A., Sörensson, A., Polcher, J., y Fita, L. (2020). Benefits of representing floodplains in a land surface model: Pantanal simulated with orchidee cmip6 version. *Climate Dynamics*, 55(5):1303–1323.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324):1379–1389.
- Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., Orlowsky, B., y Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4):125–161.
- Sheffield, J., Goteti, G., y Wood, E. F. (2006). Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *Journal of climate*, 19(13):3088–3111.
- Shellito, P. J., Small, E. E., Colliander, A., Bindlish, R., Cosh, M. H., Berg, A. A., Bosch, D. D., Caldwell, T. G., Goodrich, D. C., McNairn, H., Prueger, J. H., Starks, P. J., van der Velde, R., y Walker, J. P. (2016). Smap soil moisture drying more

- rapid than observed in situ following rainfall events. *Geophysical Research Letters*, 43(15):8068–8075. doi: <https://doi.org/10.1002/2016GL069946>.
- Sitch, S. (2000). *The role of vegetation dynamics in the control of atmospheric CO₂ content*. Lund University.
- Sörensson, A. A. y Ruscica, R. C. (2018). Intercomparison and uncertainty assessment of nine evapotranspiration estimates over south america. *Water Resources Research*, 54(4):2891–2908.
- Spennemann, P. C., Fernández-Long, M. E., Gattinoni, N. N., Cammalleri, C., y Naumann, G. (2020). Soil moisture evaluation over the argentine pampas using models, satellite estimations and in-situ measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 31:100723.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., y Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical research letters*, 31(9).
- Theil, H. (1950). A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. *Indagationes mathematicae*, 12(85):173.
- Thibeault, M., Cáceres, J. M., Dadamia, D., Soldano, A. G., Quirno, M. U., Guerrieri, J. M., Edrosa, R., Palomeque, M., Romaldi, L., y Pucheta, J. (2015). Spatial and temporal analysis of the monte buey saocom and smap core site. En *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 969–971. IEEE.
- Tong, X., Luo, X., Liu, S., Xie, H., Chao, W., Liu, S., Liu, S., Makhinov, A., Makhinova, A., y Jiang, Y. (2018). An approach for flood monitoring by the combined use of landsat 8 optical imagery and cosmo-skymed radar imagery. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 136:144–153.
- U.S. Geological Survey (2015). Landsat—earth observation satellites fact sheet 2015-3081. doi: 10.3133/fs20153081.

- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5): 892–898.
- Vereecken, H., Huisman, J., Bogena, H., Vanderborght, J., Vrugt, J., y Hopmans, J. (2008). On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water resources research*, 44(4).
- Vermote, E., Justice, C., Claverie, M., y Franch, B. (2016). Preliminary analysis of the performance of the landsat 8/oli land surface reflectance product. *Remote Sensing of Environment*, 185:46–56.
- Viovy, N. (1996). Interannuality and co2 sensitivity of the sechiba-bgc coupled svat-bgc model. *Physics and Chemistry of the Earth*, 21(5-6):489–497.
- Viovy, N. (2018). *CRUNCEP version 7-atmospheric forcing data for the community land model*. UCAR/NCAR-Research Data Archive.
- Wang, S., Song, X., Wang, Q., Xiao, G., Liu, C., y Liu, J. (2009). Shallow groundwater dynamics in north china plain. *Journal of Geographical Sciences*, 19:175–188.
- Wang, X., Zhang, G., y Xu, Y. J. (2015). Impacts of the 2013 extreme flood in northeast china on regional groundwater depth and quality. *Water*, 7(8):4575–4592.
- Weedon, G. P., Balsamo, G., Bellouin, N., Gomes, S., Best, M. J., y Viterbo, P. (2014). The wfdei meteorological forcing data set: Watch forcing data methodology applied to era-interim reanalysis data. *Water Resources Research*, 50(9):7505–7514.
- Western, A. W., Zhou, S.-L., Grayson, R. B., McMahon, T. A., Blöschl, G., y Wilson, D. J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 286(1-4): 113–134.
- Whitworth-Hulse, J. I., Jobbágy, E. G., Borrás, L., Alsina, S. E., Houspanossian, J., y Nosetto, M. D. (2023). The expansion of rainfed grain production can generate spontaneous hydrological changes that reduce climate sensitivity. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 349:108440.

- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (ndwi) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International journal of remote sensing*, 27(14):3025–3033.
- Yang, G., Guo, P., Li, X., Wan, H., Meng, C., y Wang, B. (2020). Assessment with remotely sensed soil moisture products and ground-based observations over three dense network. *Earth Science Informatics*, 13:663–679.
- Zárate, M. A. (2003). Loess of southern south america. *Quaternary Science Reviews*, 22(18-19):1987–2006.
- Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z., y Qin, Y. (2017). Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water*, 9(4):256.