

BASE DE DATOS “NAPA”: PRIMERA SÍNTESIS DE LA DINÁMICA FREÁTICA PAMPEANA DESDE 1950 AL PRESENTE

SIMON ALSINA¹, MARCELO DANIEL NOSETTO^{1-2-*}, ESTEBAN GABRIEL JOBBÁGY¹

Recibido: 29/4/2020

Recibido con revisiones: 25/9/2020

Aceptado: 25/9/2020

RESUMEN

En gran parte de la región pampeana argentina el techo de la zona saturada del perfil de suelo/sedimento (*i.e.* napa freática) se encuentra cercana a la superficie e influencia diversos aspectos de los (agro)ecosistemas. A pesar de jugar un papel clave en la producción agropecuaria, no existe una base de datos unificada que permita conocer la variabilidad espacial y temporal de la profundidad de la napa freática (*i.e.* distancia vertical desde la superficie) en la región. En este trabajo confeccionamos la base de datos NAPA a partir de la compilación y curado de observaciones de profundidad freática y describimos sus principales tendencias espaciales y temporales. Luego del proceso de curado se contabilizaron 438 series, de las cuales 45 cuentan con más de 30 años de medición. Las mismas se distribuyen mayoritariamente en la Pampa Interior (89,7%), seguida por la Pampa Deprimida (4,8 %). Del análisis de la base de datos surge que para el período 1978-2017 la profundidad media de la región fue de 3,88 m; siendo la Pampa Ondulada la que mostró la mayor profundidad (6,7 m) y la Pampa Deprimida la menor (2,7 m). El análisis temporal mostró una clara tendencia de ascenso del nivel freático durante el período de estudio en la mayor parte de la región. La Pampa Ondulada mostró el mayor ascenso freático, alcanzando 3 m en los últimos 10 años. Asimismo, en el más corto plazo (< 1 mes), se observó una tendencia de incremento en las tasas de ascenso y descenso del nivel freático (*i.e.* mayor dinamismo). Creemos que esta base de datos constituye una valiosa herramienta de consulta y análisis para distintos actores del territorio pampeano. Su actualización y expansión espacial se presenta como un desafío que es necesario afrontar a fin de mejorar la comprensión hidrológica del territorio.

Palabras clave: agua subterránea, Pampa, planicie, inundación

DATABASE “NAPA”: FIRST SYNTHESIS OF THE PAMPEAN WATER-TABLE DYNAMIC SINCE 1950 TO THE PRESENT

ABSTRACT

In most of the Argentine Pampas, the top of the saturated zone of the soil/sediment profile (*i.e.* water-table) is close to the ground surface and influences various aspects of (agro)ecosystems. Despite playing a key role in agricultural production, there is no an unified database that allows knowing the spatial and temporal variability of the water-table depth (*i.e.* the vertical distance from the surface) in the region. In this work, we created the database NAPA from the compilation and curation of water-table depth observations and we described the main spatial and temporal trends. After the curing process, 438 series were considered, with 45 series having more than 30 years of measurement. They are mostly located in the Inland Pampa (89.7%), followed by the Flooding Pampa (4.8%). The analysis of the database indicated that the average water-table depth of the region approached 3.88 m for the 1978-2017 period, with the Rolling Pampa showing the deepest (6.7 m) and the Flooding Pampa (2.7 m) the shallowest water-tables. The temporal analysis showed a clear trend of water-table to rise during the study period in most of the region. The Rolling Pampa showed the highest water-table rise, reaching 3 m in the last 10 years. In addition, in the shorter term (<1 month), a positive trend was also observed for the rates of water-table rise and fall (*i.e.* higher dynamism). We believe that this database constitutes a valuable research and analysis tool for the different stakeholders of the Pampas. Its updating and spatial expansion is a challenge that must be addressed in order to improve the hydrological understanding of the territory.

Keywords: groundwater, Pampa, plain, flooding

¹ Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada San Luis (IMASL), CONICET y Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina.

² Cátedra de Climatología Agrícola, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro verde, Argentina

* Autor de contacto: marcelo.nosetto@gmail.com

INTRODUCCIÓN

Las napas freáticas, término que suele asignarse al techo de la zona saturada de los perfiles de suelo o sedimentos, juegan un papel importante en los ecosistemas cuando se encuentran cerca de la superficie del suelo (a menos de 10 m de profundidad), favoreciendo el intercambio recíproco de agua y solutos con los suelos y la vegetación. Conocer como varía en el tiempo y en el espacio la profundidad de las napas freáticas ayuda a comprender el funcionamiento de los ecosistemas y los sistemas hidrológicos, particularmente en las llanuras, donde las mismas pueden conectarse con la superficie en una fracción muy grande del territorio (Kruse & Zimmerman, 2002; Kuppel *et al.*, 2015).

La falta de información acerca de la profundidad y dinámica de las napas freáticas suele ser el resultado de la escasa atención que recibe este componente de los paisajes por quienes estudian los ecosistemas y los suelos, generalmente enfocados en la parte más superficial de los perfiles y en el compartimiento no saturado del almacenamiento hídrico; y quienes estudian los recursos hídricos subterráneos, típicamente concentrados en los mantos acuíferos de buen rendimiento que sólo en algunas situaciones incluyen a las napas freáticas. Se vuelve imprescindible poder contar con información sistematizada de la profundidad de las napas freáticas en aquellas regiones en las que los ecosistemas resultan claramente influenciados por ellas, y donde las mismas representan un componente activo de la dinámica hidrológica superficial, como es el caso de la Llanura Pampeana (Engel *et al.*, 2005; Nosetto *et al.*, 2009; Aragón *et al.*, 2010). En esta contribución se presenta la primer base de datos unificada de niveles freáticos pampeanos ("NAPA", Nivel del Agua freática de la Pampa Argentina) aprovechando múltiples fuentes de información inicialmente dispersas. Se aplica esta base de datos para ofrecer una caracterización regional del sistema freático pampeano y su evolución en las últimas seis décadas.

Los paisajes sedimentarios de muy baja pendiente regional con fuerte impronta eólica que cubren la mayor parte de la región pampeana se caracterizan por albergar un sistema hidroló-

gico subterráneo de flujos laterales muy lentos y niveles freáticos cercanos a la superficie (Jobbágy *et al.*, 2008; Fan *et al.*, 2013). La muy baja pendiente regional que caracteriza a la zona (< 0,1%) dificulta la salida de excesos hídricos en forma líquida, debido a la ausencia de una red de drenaje definida, resultando la evapotranspiración la principal vía de evacuación (Degioanni *et al.*, 2002; Kuppel *et al.*, 2015). Por lo tanto, todos los excedentes hídricos se traducen naturalmente en aportes a la napa freática, frecuentemente conectada con cuerpos de agua superficial, que al expandirse generan inundaciones de larga duración (Aragón *et al.*, 2010; Kuppel *et al.*, 2015).

La presencia de una napa freática que gradualmente se vuelve más cercana a la superficie habilita el flujo ascendente de agua. En primer lugar (i), este flujo se da hacia las raíces profundas de vegetación perenne como bosques nativos o implantados, o pasturas de alfalfa, luego (ii) al de las raíces de cultivos anuales, y finalmente (iii) alimenta el flujo de evaporación directa del suelo. Este flujo puede contribuir a elevar la productividad de la vegetación, cuando el aporte de agua freática ayuda a suplir déficits en las precipitaciones, pero al superar ciertos umbrales puede causar problemas de salinización y anegamiento, provocando caída en los rendimientos y pérdidas de cultivos (Nosetto *et al.*, 2009; Florio *et al.*, 2014).

A pesar de la relevancia del nivel freático sobre los sistemas productivos de la región pampeana, no existe una base de datos unificada que permita conocer su variabilidad espacial y temporal. A nivel nacional, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) han registrado históricamente la profundidad freática en algunas de las estaciones de su red, pero muchos de estos datos son discontinuos y de difícil acceso. Dentro de estos, el INTA Marcos Juárez posee uno de los registros más extensos de profundidad freática a partir del cual se puede identificar una clara tendencia de ascenso en los últimos 40 años (Bertram & Chiacchiera, 2013). A nivel provincial también se observan esfuerzos de monitoreo del nivel freático, como es el caso de la provincia de La Pampa,

con una extensa red de medición, o la provincia de San Luis, con una red freática más incipiente en la cuenca de El Morro. En el ámbito privado, se nota un creciente interés por parte de los productores agropecuarios en el monitoreo del nivel freático lo que ha determinado una notoria proliferación de freatómetros en campos privados y la confección de una red on-line de monitoreo (Red Mate). Si bien estos esfuerzos aislados son muy valiosos, su utilidad podría ser notoriamente amplificada si se contase con una base de datos unificada y filtrada que permita realizar análisis espacio-temporales más robustos.

Conocer la variabilidad espacial y temporal del nivel freático en la región pampeana resulta clave para cuantificar y anticipar sus efectos sobre los sistemas productivos de la región. Esta información también es fundamental para alimentar y validar modelos hidrológicos tendientes a predecir el comportamiento del sistema hidrológico ante cambios en el uso del suelo y/o climáticos (García *et al.*, 2019; Zellner *et al.*, 2020) como así también en respuesta a la implementación de obras hidráulicas (Menéndez *et al.*, 2012) y/o de biodrenaje (García *et al.*, 2017). En este sentido, mediciones aisladas de profundidad freática en la región pampeana sugieren, por ejemplo, que el reemplazo de sistemas agrícolas mixtos por sistemas puramente agrícolas se asocia a un incremento en los niveles freáticos (Bertram & Chiacchiera, 2013; Nosetto *et al.*, 2015). A su vez, la estrecha conexión entre nivel freático y el área inundada (Aragón *et al.*, 2010; Kuppel *et al.*, 2015) determinaría que esta transformación genere un incremento en la frecuencia e intensidad de inundaciones. Por otro lado, simulaciones hidrológicas indican que la implementación de las obras hidráulicas correspondientes al Plan Maestro del río Salado para aliviar los excedentes hídricos tendría un alcance muy limitado (Menéndez *et al.*, 2012). Esta situación regional que sugiere la existencia de un nuevo escenario hidrológico con un mayor riesgo hídrico plantea la necesidad de implementación de estrategias de adaptación y mitigación las cuales deberían estar debidamente soportadas por observaciones de nivel freático.

En este trabajo realizamos una compilación, filtrado y sistematización de observaciones

de profundidad freática existentes para la región pampeana de fuentes públicas y privadas para el período 1950-2019. A partir de esta recopilación y su posterior control de calidad confeccionamos la base de datos NAPA, a partir de la cual describimos las principales tendencias espaciales y temporales del nivel freático para toda la región. Esta base de datos es de libre disponibilidad pudiendo ser solicitada a los autores de este trabajo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Región de estudio

Este estudio se centró en gran parte de la región Pampeana (32-37° S, 60-65° W), que constituye la principal zona agrícola del país y una de las más importantes del mundo (Hall *et al.*, 1992). Dentro de las subregiones que la integran, se decidió excluir de este análisis las subregiones Pampa Mesopotámica y Campos, dado que presentan características biofísicas contrastantes al resto de la región en cuanto a topografía, clima y suelos (Soriano *et al.*, 1991). La región de estudio se extiende a lo largo de más de 30 millones de hectáreas, con altitudes por debajo de los 200 m.s.n.m. El clima es templado, con una temperatura media anual que varía entre 15° y 18 °C. La precipitación anual fluctúa entre 500 mm año⁻¹ en el extremo SW hasta cerca de 1000 mm año⁻¹ en el NE y la evapotranspiración de referencia (Penman-Monteith modificado por FAO) (Allen *et al.*, 1998) varía entre 950 y 1400 mm año⁻¹ (1960-1990, CRU) (New *et al.*, 2002). Entre 1970 y 2000, se ha observado un significativo aumento de las precipitaciones en la región, siendo esta tendencia más intensa en el oeste de la misma (Barros *et al.*, 2006).

La mayor parte de la región conforma una planicie con una muy baja pendiente regional que se desarrolla en dirección W-E (Kruse & Zimmermann, 2002; Jobbágy *et al.*, 2008). Sumado a esto, la red de drenaje superficial está escasamente desarrollada, lo que restringe las salidas líquidas de los excedentes hídricos (Usunoff, 2009). Esta condición topográfica juntamente con un clima (sub)húmedo determina la presencia de una napa freática superficial en la mayor parte del paisaje (Fan *et al.*, 2013) y la existencia de una profusa constelación de cuerpos de agua

superficiales y humedales (Kuppel *et al.*, 2015). La variabilidad temporal de las precipitaciones determina el desarrollo recurrente de sequías e inundaciones (Moncaut, 2001) las que pueden afectar una fracción importante del paisaje (Aragón *et al.*, 2010). Los suelos se desarrollaron a partir de sedimentos loésicos y son mayoritariamente Molisoles (Soriano *et al.*, 1991). Son suelos fértiles, con buena infiltración que no presentan restricciones importantes para la producción agropecuaria; sin embargo en determinadas regiones (e.g. Pampa Deprimida) es común encontrar suelos pobremente drenados. La región estaba originalmente cubierta por pastizales naturales pero actualmente está dominada por una combinación de cultivos anuales, pasturas y pastizales remanentes. En las últimas décadas, se ha visto una transformación en los sistemas productivos de la región pasando de sistemas mixtos basados en rotaciones de pasturas y cultivos anuales a sistemas puramente agrícolas con un uso más intensivo de insumos externos (Viglizzo & Frank, 2006).

Base de datos

Con el objetivo de crear una base de datos que contenga la mayor cantidad posible de datos freáticos pertenecientes a la región pampeana, se recabaron y compilaron series de nivel freático, definido como la distancia vertical entre el nivel de agua libre en freatómetro y la superficie del terreno en el punto de medición, provenientes de diversas fuentes. Éstas involucraron al Servicio Meteorológico Nacional (SMN), el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), el gobierno de la provincia de La Pampa (Secretaría de Recursos Hídricos), equipos técnicos privados y productores agropecuarios, así como bases de datos de grupos de investigación científica. Una vez recopilada la información, se unificó el formato en el que se presentaban los datos de cada serie, a fin de mejorar su posterior manipulación y análisis. Se procuró que todas las series presentaran la misma unidad de medida y formato de fecha, corrigiendo aquellos casos en los que fuese necesario. Para cada serie se incorporó identificador de cada estación, código original de la estación, coordenadas geográficas, elevación (en caso

de contar con la misma), fuente de los datos, provincia y subregión pampeana a la que pertenece.

A fin de conformar una base de datos consistente, se realizó el filtrado de diversos tipos de errores observados. Un error frecuentemente observado fue que ante la falta de medición para una determinada fecha el observador, en lugar de indicar la falta de medición, registraba en la planilla un valor de cero. En series con napas relativamente profundas este error se identificó fácilmente y se eliminó el valor. En series con napas más superficiales donde la presencia de agua en superficie (es decir, con un valor de profundidad freática igual a 0) es plausible, se tuvo en cuenta la variación del nivel freático posterior al registro de valor 0 para decidir si correspondía a un error o a una medición correcta. En el caso de que esta variación fuera poco plausible (e.g. descenso > 30 cm en un día), se identificó como error y se eliminó el valor 0. En algunos casos se encontró para una misma serie de medición registros con distintas unidades de medición (e.g. metro y centímetro), por lo que se procedió a expresar todas las mediciones en metros. En algunos casos se identificaron períodos de tiempo repetidos, y se procedió a eliminar los fragmentos redundantes. En otros casos se observó la presencia de datos pertenecientes a distintos freatómetros dentro de una misma serie, lo cual se corrigió y se confeccionaron tantas series como fue posible identificar. También se detectaron errores de tipeo/anotación (e.g. 2,70 en lugar de 2,07), los cuales se corrigieron, manualmente analizando las variaciones temporales del nivel freático. Algunas series freáticas no contaban con sus coordenadas geográficas, imposibilitando su uso en algunos análisis espaciales. Sin embargo, se utilizaron estas series en análisis a nivel regional que no requerían de su ubicación geográfica exacta. En algunos casos, si bien contaban con coordenadas geográficas no se indicaba el sistema de referencia utilizado, por lo que se procedió a su corrección probando con distintos sistemas hasta obtener una geolocalización plausible. Finalizado el proceso de corrección y filtrado, se descartaron diversas series utilizando distintos criterios que se detallan en la sección de resultados.

Se realizaron distintos análisis espaciales y temporales de las series de datos de niveles freáticos que se describen a continuación. En primera instancia se calculó el promedio de la profundidad correspondiente a todo el período abarcado, incorporando todos los datos sin discriminarlos por su ubicación ni período de tiempo (análisis bruto). Para eliminar el mayor peso que podrían ejercer en este primer análisis una gran cantidad de datos (por alta densidad de freatómetros, series más extensas y/o alta resolución temporal de mediciones) se aplicó, en un segundo nivel de análisis, un proceso previo de promediado (análisis promediado). Para esto, en cada serie se promediaron los valores individuales para obtener un único valor mensual, y estos a su vez se promediaron para obtener un único valor anual. Posteriormente se promediaron los valores mensuales y anuales de cada serie dentro cada subregión y a su vez las subregiones se promediaron para brindar un valor único para la región completa. Las regiones a partir de las cuales se resumió la información fueron las siguientes: Pampa Ondulada, Pampa Interior Plana, Pampa Interior Occidental, Pampa Deprimida y Pampa Austral (**Figura 1**). A partir de los valores medios anuales para cada región

se analizó la tendencia temporal de los mismos a partir de análisis de regresión lineal. Más allá de considerar la profundidad absoluta medida en cada fecha, se realizó otro conjunto de análisis basados en la tasa diaria de variación de la profundidad freática (d-Napa). Para esto se le restó al valor de profundidad de cada fecha el dato de la lectura anterior (Δ Napa) y se calculó el tiempo transcurrido en días entre ambas mediciones (Δ Tiempo). El cociente de estos dos valores (Δ Napa / Δ Tiempo) proporcionó una medida de la tasa de variación de los niveles que se asignó al período comprendido entre ambas fechas. Se excluyó de este análisis a los períodos entre mediciones con Δ Tiempo > 40 días. El uso de la variable d-Napa permite eliminar de los análisis y comparaciones los efectos de diferencias absolutas dados por la ubicación particular de un freatómetro (e.g. loma vs. bajo o Pampa Ondulada vs. Deprimida) para concentrarse en las tendencias de cambio.

RESULTADOS

Luego del proceso de filtrado y corrección descrito anteriormente se contabilizó un total de 646 series freáticas. A partir de un análisis más deta-

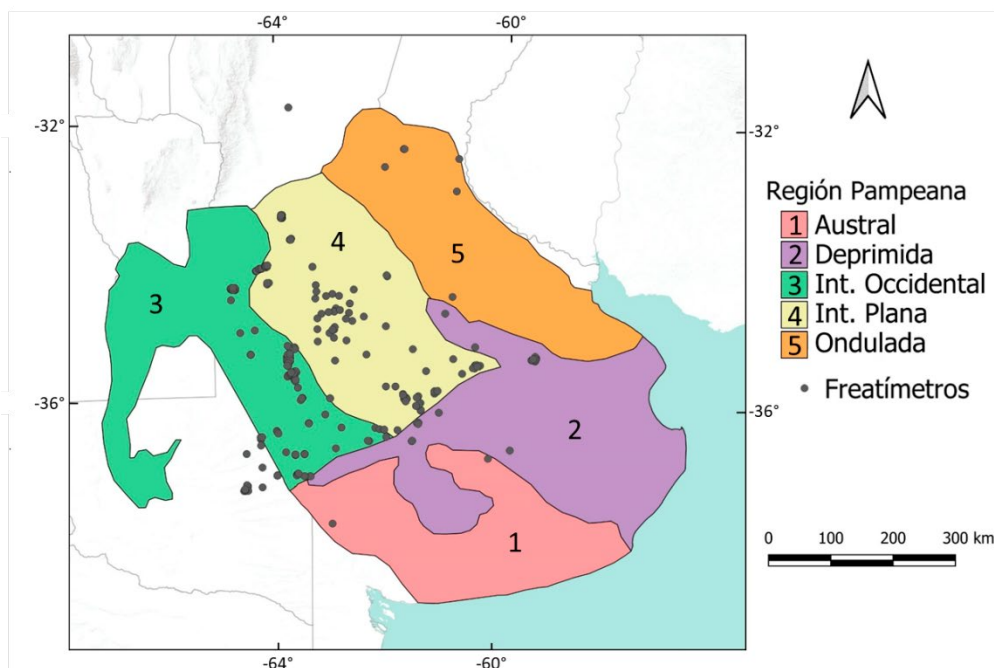


Figura 1. Ubicación de freatómetros utilizados para la confección de la base de datos NAPA. Las distintas sub-regiones de la Región Pampeana se indican con diferentes colores.

Figure 1. Location of water-table depth observation sites used in the database NAPA. The different sub-regions of the Pampas are indicated with different colors.

lado de las mismas se descartaron 208 de estas series por presencia de errores o valores poco confiables, contando finalmente con 438 para los posteriores análisis. De las series descartadas, 17 se encontraban alejadas de la región de análisis, 15 mostraron inconsistencias groseras como ascensos o descensos de nivel inexplicables por procesos normales de recarga o descarga freática, 53 presentaron valores de profundidad mayor a los 15 m (todas en los alrededores de la ciudad de Santa Rosa – La Pampa), estando fuera del objetivo de este trabajo; 19 resultaron repetidas con distinto nombre y 104 series, todas correspondientes a la Secretaría de Recursos Hídricos de La Pampa, mostraban solo dos datos por frea-tímetro asignados ambos a la misma fecha y muy diferentes entre sí, generando desconfianza para su utilización. De las 438 series seleccionadas, 29 no contaban con su ubicación geográfica precisa por lo que solo se utilizaron para los análisis de nivel subregional.

La distribución espacial de los frea-tímetros que conforman la base de datos muestra un agrupamiento hacia el NW de la provincia de Buenos Aires, S de Córdoba y NE de La Pampa (**Figura 1**). En efecto, la Pampa Interior (Occidental + Plana) concentra el 89,7% de los frea-tímetros, seguida por la Pampa Deprimida (4,8%). A nivel provincial, las provincias de Buenos Aires (30,6%), Córdoba (32,4%) y La Pampa (35,2%) contribuyen de manera similar a la base de datos, mientras que la provincia de Santa Fe se encuentra pobremente representada con solo ocho series freáticas (1,8%). Los establecimientos agropecuarios privados (37%) y la Secretaría de Recursos Hídricos de la provincia de La Pampa (RHL, 34,9%) son las principales fuentes aportantes a la base de datos, seguidas por la Red Mate (15,3%) e investigadores (8,7%). Finalmente, el SMN y el INTA contribuyen con el 2,3% y 1,8% de las series, respectivamente. La mayoría (98%) de las series que se descartaron correspondieron a La Pampa, dado que se encontraban alejadas del área de estudio, presentaban napas muy profundas o inconsistencias notorias.

Tanto la cantidad de estaciones como de mediciones son escasas hasta fines de la década del 70 pero se incrementan notoriamente a partir

de entonces (**Figura 2**). La serie más antigua corresponde a 9 de Julio, ubicada en la Pampa Interior Plana, iniciando su registro en 1950. En 1962 se incorpora la estación Bordenave, en la Pampa Austral y a partir de 1978 comienzan a registrar mediciones numerosas estaciones en la subregión de la Pampa Interior Occidental de la provincia de la Pampa. Todas las subregiones pampeanas cuentan con al menos una estación de medición a partir de 1984. La mayor cantidad de estaciones freáticas se observa en el año 2011 cuando se alcanza un total de 227 estaciones. Por otro lado, el año con el que se cuenta con mayor número de mediciones es 1995, con un total de 4790. Considerando a partir de los '80 cuando se contaba ya con más de 50 frea-tímetros en la base, se observa que los años 1994-1995 y el año 2003 son los que muestran la mayor resolución temporal media, con ~40 observaciones por estación y por año. Finalmente, cabe aclarar que a partir de 2017 el volumen de datos con los que se cuenta resulta reducido debido a la falta de actualización por parte de las fuentes que los proporcionaron.

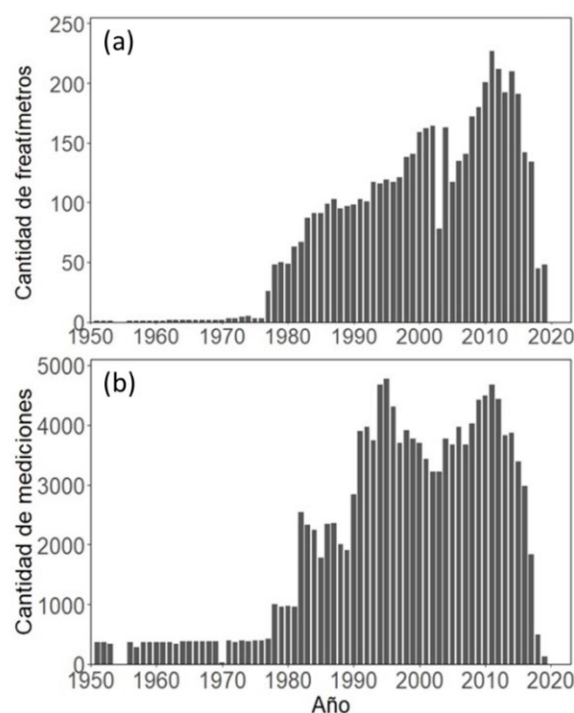


Figura 2. Cantidad de frea-tímetros (a) y mediciones (b) disponibles por año para todo el período de análisis (1950-2019).

Figure 2. Number of water-table depth observation sites (a) and measurements (b) available per year for the entire analysis period (1950-2019).

La base de datos NAPA cuenta con 45 estaciones de medición freática con más de 30 años de medición, permitiendo valiosos análisis de largo plazo (**Figura 3**). Las tres series más extensas corresponden a Marcos Juárez, Bordenave y Nueve de Julio, con 49, 55 y 58 años, respectivamente. El total de series con más de 20 años de medición alcanza las 121 estaciones. Por otro lado, 50 estaciones cuentan con menos de un año de medición y 259 con menos de 10.

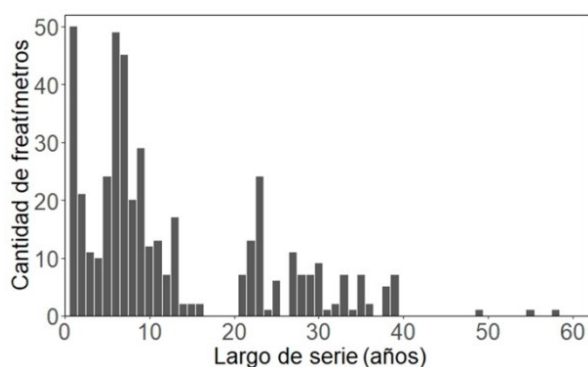


Figura 3. Cantidad de estaciones de medición en función del largo de la serie.

Figure 3. Number of water-table depth observation sites depending on the length of the series.

La profundidad freática media obtenida con el análisis promediado para toda la región de estudio fue de 4,31 m para el período 1950-2019 (**Tabla 1**). Si se considera el período 1978-2017, el cual cuenta con un volumen de datos más im-

Tabla 1. Profundidad media y cantidad de series para cada subregión pampeana para todo el período de análisis (1950-2019) y para el período con mayor volumen de datos (1978-2017).

Table 1. Average water-table depth and number of series for each sub-region of the Pampas for the whole analysis period (1950-2019) and for the period with higher data amount (1978-2017).

Subregión	1950-2019		1978-2017	
	Prof.(m)	Series	Prof.(m)	Series
Austral	4,75	2	3,94	2
Deprimida	2,68	21	2,68	21
Interior Occidental	3,27	187	3,22	181
Interior plana	3,77	204	2,99	186
Ondulada	7,09	10	6,58	10
Total	4,31	424	3,88	400

portante, la profundidad media fue de 3,88 m. Se observaron claras diferencias entre las distintas subregiones en relación a la profundidad freática media. La Pampa Ondulada mostró una profundidad notoriamente mayor que la del resto de las regiones y la Pampa deprimida la más somera (**Tabla 1**). En promedio para todo el período de estudio, más del 60% de las estaciones de medición presentaron la napa freática a una profundidad menor a los 3 m (**Figura 4**). En el rango 2-3 m, se ubicó la mayor proporción de estaciones con el 29%, seguido por los rangos de 1-2 m (23%) y 3-4 m (18%). El porcentaje de estaciones con napas más profundas que 4 m fue del 22%.

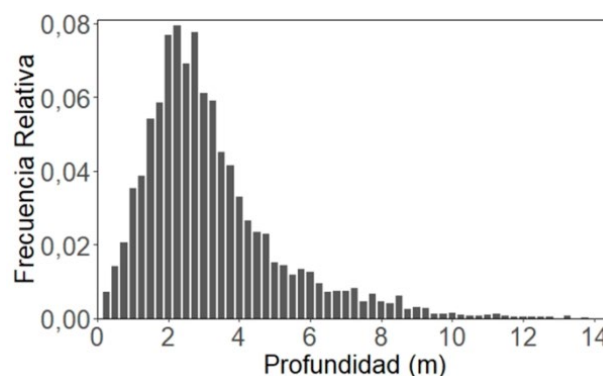


Figura 4: Distribución de frecuencias del promedio anual de profundidad freática para todo el período analizado (1950-2019).

Figure 4. Frequency distribution of the mean annual water-table depth for the whole analysis period (1950-2019).

Con excepción de la Pampa Interior Occidental, los valores absolutos de nivel freático mostraron una clara tendencia de ascenso durante el período de estudio (**Figura 5**). A partir de los análisis de regresión lineal se observó que la tendencia temporal más pronunciada ocurrió en la Pampa Ondulada, con una tasa de ascenso de 18 cm año^{-1} ($p < 0,001$). Resulta destacable el cambio en el valor promedio de profundidad freática en esta subregión, pasando de 9,7 m en la década del '70 a 4,6 m en los últimos 15 años. En las subregiones de la Pampa Deprimida, Interior Plana y Austral las tasas de ascenso fueron menores ($8\text{-}10 \text{ cm año}^{-1}$), pero también claramente significativas ($p < 0,01$). En el caso de la Pampa Interior Occidental, si bien no se observa una tendencia de ascenso en el período analizado, vale la pena notar que la escasa

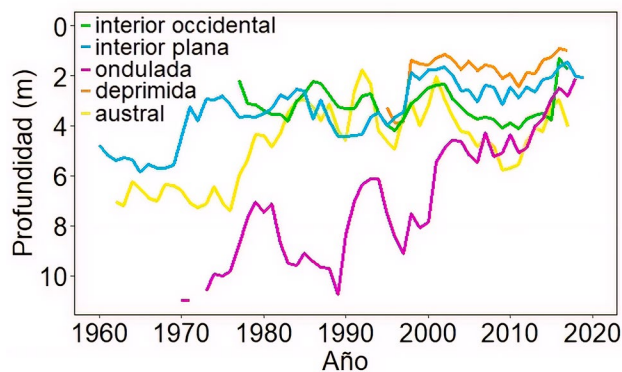


Figura 5. Evolución temporal del nivel freático medio anual para cada subregión pampeana durante el período de análisis.

Figure 5. Temporal trend of the mean annual water-table depth for each sub-region of the Pampas during the analysis period.

profundidad observada en los últimos dos años del período (1,5 m en promedio) nunca se alcanzó en los 39 años previos, en los cuales el valor mínimo medio anual alcanzado fue de 2,20 m.

Las tasas de variaciones de nivel freático (*d-Napa*), tanto de ascenso como de descenso, muestran una tendencia de aumento con el transcurso de los años (**Figura 6**). Por ejemplo, el percentil 99 de las variaciones positivas del nivel freático (*i.e.* eventos de descensos del nivel freático) en los últimos 15 años del período de análisis (2003-2017) para toda la región de estudio promedió $7,10 \text{ cm día}^{-1}$ (valor medio 2003-2017 = $1,30 \text{ cm día}^{-1}$), mientras que en todo el período precedente dicho percentil fue de $5,6 \text{ cm día}^{-1}$ (valor medio 1978-2002 = $1,18 \text{ cm día}^{-1}$). Un patrón aún más notorio se observa con las variaciones negativas del nivel freático (*i.e.* eventos de ascensos). En los últimos 15 años del período analizado, el percentil 1 de las variaciones negativas de nivel fue de -17 cm día^{-1} (valor medio 2003-2017 = $-1,81 \text{ cm día}^{-1}$), mientras que en todo el período precedente dicho percentil fue de -11 cm día^{-1} (valor medio 1978-2002 = $-1,65 \text{ cm día}^{-1}$). Las tendencias temporales, tanto para los valores medios de las fluctuaciones positivas y negativas como de los percentiles mencionados, fueron siempre estadísticamente significativas ($p < 0,05$).

Las tasas de variaciones del nivel freático (*d-Napa*) a lo largo del año muestran cierta estacionalidad, permitiendo identificar claramente los

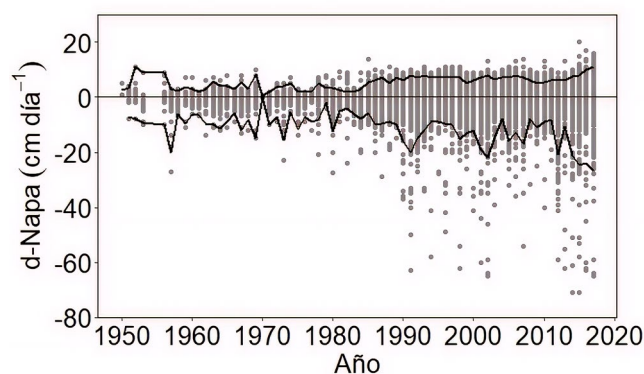


Figura 6. Tasas de variaciones de la profundidad freática observadas a lo largo del periodo de estudio. Los puntos indican los valores de *d-Napa* para cada par de mediciones consecutivas disponibles y las líneas los percentiles 1 y 99. Notar que valores positivos indican descensos de nivel y valores negativos ascensos del nivel freático.

Figure 6. Rates of water-table depth variation observed throughout the study period. The points indicate water-table depth variation between each pair of consecutive measurements available and the lines the 1st and 99th percentiles. Note that positive values indicate deepening of the water-table and negative values indicate rises.

principales períodos de recarga y descarga freática (**Figura 7**). Considerando el período 1978-2018 que es el que cuenta con mayor volumen de datos, se observa por ejemplo que el período Diciembre – Marzo presenta un *d-Napa* promedio de $0,21 \text{ cm día}^{-1}$, acumulando 26 cm en total para dicha ventana temporal. En años de sequía, por ejemplo en 2017-2018, el descenso acumulado en promedio para toda la región de estudio fue de 110 cm para dicho período. Este fue el mayor descenso para un período de 4 meses registrado en toda la serie analizada. Por otro lado, el período Abril - Junio correspondería a la principal ventana de recarga, con un *d-Napa* promedio de $-0,21 \text{ cm día}^{-1}$ (-19 cm acumulados en todo el período). Para todo el periodo de análisis, el mayor ascenso acumulado para una ventana de 4 meses ocurrió entre Julio y Octubre de 2001, alcanzando -90 cm. En promedio a nivel mensual, se destacan los meses de Enero y Abril-Mayo como los de mayores descensos y ascensos del nivel freático, respectivamente (12 cm en Enero y -9 cm en Abril y Mayo). Los meses de Julio y Agosto son los más estables, con tasas de variación próximas a cero y con una muy baja variabilidad entre años (**Figura 7**).

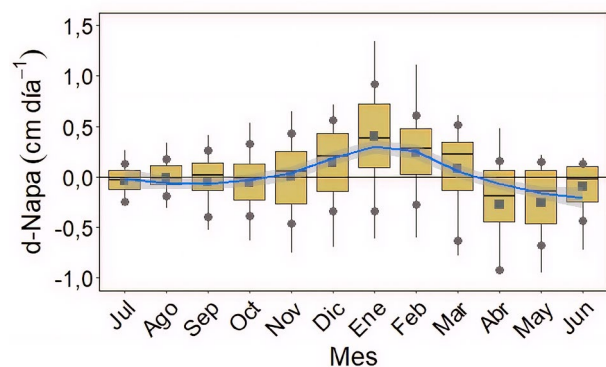


Figura 7. Dinámica mensual de las variaciones del nivel freático entre dos fechas consecutivas para el período 1978-2018. Se indican los valores medios (cuadrado), percentiles 10 y 90 (círculos). Se ajustó una curva suavizada a los valores medios. Notar que valores positivos indican descensos de nivel y valores negativos ascensos del nivel freático.

Figure 7. Monthly pattern of water-table depth variations between two consecutive dates for the period 1978-2018. The mean values (squares), and 10th and 90th percentiles (circles) are indicated. A smooth curve was fitted to mean values. Note that positive values indicate deepening of the water-table and negative values indicate rises.

DISCUSIÓN

El análisis de la base de datos NAPA que presentamos en este trabajo evidenció la presencia superficial de las napas freáticas en gran parte de la región Pampeana Argentina (**Tabla 1, Figura 4**). Esta condición, que concuerda con los resultados de modelos hidrológicos globales (Fan *et al.*, 2013), implica una estrecha conexión entre el sistema hidrológico subterráneo y los ecosistemas y con múltiples procesos que inciden sobre los sistemas agropecuarios de la región (Mercau *et al.*, 2013). A pesar del papel clave que presenta la napa freática en los sistemas productivos, cabe notarse la baja densidad de medición que se observa en algunas áreas de la región estudiada (**Figura 1**). Nuestro análisis evidencia entonces una clara necesidad de aumentar la densidad y continuidad de mediciones de profundidad freática (y en lo posible de la calidad del agua subterránea) no solo en la región Pampeana sino también en la región Chaqueña y el Espinal en donde se han observado recientemente notorios ascensos del nivel freático (Nitsch, 1995; Contreras *et al.*, 2013).

Las mediciones de profundidad freática realizadas por los productores agropecuarios constituyen un valioso aporte a la base de datos. La presencia más superficial y extendida de la napa en los últimos años, como surge en este análisis y que también es vivenciada por los productores, sumado a un mayor reconocimiento por parte de ellos de su crucial influencia sobre el rendimiento de los cultivos (Mercau *et al.*, 2013), ha determinado un crecimiento notorio en la cantidad de freáticos en los establecimientos agropecuarios. A partir de estas observaciones es que se desarrolló, con el apoyo de organismos de investigación, la denominada "Red Mate", que contribuyó a la base de datos aquí presentada y que obró como un espacio para poder aportar y visualizar datos de profundidad freática en toda la región. Sin embargo, esta red ha transcurrido por distintos períodos de crecimiento/estancamiento y está actualmente fuera de funcionamiento. Las observaciones realizadas por productores individuales tienen mayor potencial cuando son agregadas, como se intentó con la Red Mate, ya que permiten realizar análisis espaciales y temporales que no son posibles de implementar a partir de sitios/establecimientos individuales. Es por esto que entendemos que estas redes para intercambiar y hacer públicas las observaciones ambientales podrían ser potenciadas a través de una mejora en la articulación entre los distintos organismos involucrados en la temática, tanto públicos como privados.

El análisis de largo plazo de la base NAPA sugiere un ascenso generalizado del nivel freático en la mayor parte de la región en las últimas décadas (**Figura 5**). Esta tendencia regional coincide con observaciones puntuales de la zona de Marcos Juárez (Córdoba, Bertram & Chiacchiera, 2013) y Villa Mercedes (San Luis) (Contreras *et al.*, 2013) y sugiere un cambio progresivo en el balance hídrico en al menos las últimas dos décadas, el cual al volverse más positivo (precipitación > evapotranspiración) genera excedentes que se traducen en ascensos del nivel freático. Un aumento en las precipitaciones podría explicar esta tendencia (Barros *et al.*, 2006), pero también es importante notar que la región ha experimentado cambios en los sistemas de producción,

pasando de sistemas mixtos (basados en alfalfa + cultivos anuales) a sistemas exclusivamente agrícolas (basados sólo en cultivos anuales) (Paruelo *et al.*, 2006), lo cual conlleva una merma en la evapotranspiración real (Nosetto *et al.*, 2015). El peso de ambos componentes explicando la tendencia es algo que resta dilucidar y resulta relevante a los fines de implementar estrategias de adaptación a la nueva situación hidrológica. De cualquier manera, esta nueva situación con napas más superficiales, nunca antes vista en el período de análisis de este estudio (1950-presente), plantea la existencia de un nuevo escenario hidrológico para la región, que incluye mayor vulnerabilidad de la infraestructura y logística rural y urbana a inundaciones y una influencia más intensa y extendida de las napas freáticas sobre los cultivos, tanto positivas (aportes), como negativas (anegamiento) (García *et al.*, 2019).

Además de observarse un cambio gradual de largo plazo de la profundidad freática también parecería haber cambiado su dinámica temporal de más corto plazo, observándose ascensos y descensos más intensos (**Figura 6**). Esto podría deberse a la presencia más superficial de la napa (**Figura 5**) lo que implicaría un contacto más estrecho entre las raíces y la zona capilar por encima de la napa, favoreciendo mayores tasas de consumo por la vegetación (Nosetto *et al.*, 2009) y eventualmente de evaporación directa desde el suelo y cuerpos de agua, favoreciendo descensos más veloces. Por otro lado, al reducirse el espesor no saturado del suelo, los umbrales de precipitación necesarios para generar pulsos de recarga freática se reducirían, favoreciendo ascensos más frecuentes e intensos. Asimismo, el cambio en los sistemas de producción antes mencionado implica una mayor preponderancia de lotes en barbecho, lo cual también favorecería las mayores tasas de recarga freática (Nosetto *et al.*, 2015). En definitiva, el ascenso freático provoca una reducción en la capacidad reguladora de anegamientos que los suelos ofrecen al albergar excedentes hídricos.

La dinámica de la profundidad freática muestra un buen acuerdo con los eventos de inundación registrados en la región. Por ejemplo, las últimas grandes inundaciones que ocurrieron

en la misma (e.g. 1986-1987, 2000-2002) (Ballesteros, 2014; Kuppel *et al.*, 2015) fueron precedidas por notorios ascensos del nivel freático (**Figura 5**). Cabe notar que a diferencia de las inundaciones rápidas que generalmente ocurren a causa de escurrimientos excepcionales y/o crecientes de cursos de agua que duran pocos días (Kuppel *et al.*, 2015), las inundaciones de la región pampeana muestran un desarrollo lento y una larga duración (*i.e.* años). Estas inundaciones están estrechamente relacionadas a las fluctuaciones del nivel freático ya que los ascensos de nivel que suceden ante excesos en las precipitaciones generan la expansión de los cuerpos de agua superficiales existentes y el desarrollo de otros nuevos (Aragón *et al.*, 2010). En consecuencia, el monitoreo en cuasi tiempo-real del nivel freático en toda la región, como así también del stock total de agua provisto por los satélites GRACE (Han *et al.*, 2005), pueden constituir una valiosa herramienta a los fines de valorar el riesgo y localización de futuros eventos de inundación.

Si bien el ascenso freático genera un escenario hidrológico de mayor vulnerabilidad ante excedentes pluviales para la región, también puede aportar cierta seguridad hídrica para los cultivos que ayude a suplir déficit en las precipitaciones. Por ejemplo, solo en los últimos diez años la napa ascendió tres metros en promedio en la región de la Pampa Ondulada, que fue la que experimentó el mayor ascenso (**Figura 5**). A partir de este ascenso, la napa pasó de estar inaccesible para los cultivos anuales (> 5 m) a estar a una profundidad óptima para el consumo por parte de ellos (~ 2 m) (Nosetto *et al.*, 2009).

El análisis de las últimas tres sequías que ocurrieron en la Pampa Ondulada (2008/09, 2011/12 y 2017/18) sucedieron con profundidades medias de napa muy contrastantes (2,4 m para 2017/18 y 5 m para 2008/09 y 2011/12), por lo que su análisis permite especular sobre el papel de la napa freática ante eventos de sequía. Si bien la magnitud de estas sequías fue similar en la región norte de la Pampa Ondulada (Rosario, Marcos Juárez, El Trébol), de acuerdo a los análisis realizados por el Centro Regional del Clima para el Sur de América del Sur (SISSA, 2020), la merma de rendimiento observada para

el último evento fue notoriamente menor que las de los eventos previos. De acuerdo a las estimaciones del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca (MAGyP, 2020) para los departamentos del N de la Pampa Ondulada (M. Juárez, Belgrano, San Lorenzo, Iriondo, Caseros, Rosario), el rendimiento de maíz se redujo solo un 8% en la sequía del 2017/18 respecto al promedio de las dos campañas previas. En cambio en las sequías del 2008/09 y 2011/12, con napas más profundas, las caídas de rendimiento alcanzaron 35% y 17%, respectivamente. Asimismo, la variabilidad de los rendimientos para el último lustro en dichos departamentos (CV = 7%, para 2014-2019) fue notoriamente menor a los lustros anteriores (CV = 11,4%; 19,6%; 17,8%; para 2009-2014, 2004-2009, y 1999-2004, respectivamente). Este patrón, que coincide con lo observado a nivel de lote en ambientes con y sin acceso a napa (Florio *et al.*, 2014), sugiere que la mayor accesibilidad a la napa por parte de los cultivos estaría ayudando a estabilizar los rendimientos agrícolas en la región.

Las observaciones de profundidad freática son un insumo valioso en la producción agropecuaria, cobrando especial relevancia en áreas con presencia superficial de la napa freática como la región Pampeana. Cuando estas observaciones individuales se compilan en espacio y tiempo aumentan su valor, manifestando patrones emergentes imposibles de conocer a partir de mediciones fragmentadas. Es por esto que los esfuerzos privados de la actualidad deberían ser apoyados, articulados y complementados por los de organismos públicos. En este trabajo la compilación y el curado de observaciones individuales dispersas permitieron realizar la primera caracterización de las variaciones espaciales y temporales de la profundidad freática integral de la región Pampeana. Actualmente, las nuevas tecnologías que permiten medir los niveles freáticos (e.g. transductores de presión), transmitir los datos (e.g. telemetría – GSM) y procesarlos e interpretarlos en tiempo real (*i.e.* algoritmos de análisis automático como "machine learning"), deberían facilitar el desarrollo de redes de observación de napas que se vuelven cada año más necesarias.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado parcialmente por la ANPCyT (PICT 2790/14, PICT 3811/17, Argentina) y el CONICET (PIP112-201501-00609, Argentina). Agradecemos al Servicio Meteorológico Nacional, al INTA, a los aportantes y responsables de la Red Mate, a la Secretaría de Recursos Hídricos de la Pampa, a J Mercau, H Videla, R Aragón, R Giménez y a los responsables de diferentes establecimientos agropecuarios (El Consuelo, La Biznaga, La Bellaca, Magdala, Don Jorge, Melideo) que brindaron su datos de profundidad freática haciendo posible este trabajo. S Alsina recibió el apoyo de una beca doctoral del CONICET. También agradecemos las observaciones y comentarios realizados por un/a revisor/a anónimo/a que ayudaron a mejorar el artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, RG; LS Pereira; D Raes & MD Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO. Roma, Italia.
- Aragón, RM; EG Jobbágy & EF Viglizzo. 2010. Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina) *Ecohydrology* 4: 433-447.
- Ballesteros, SI. 2014. Inundaciones y su relación con el clima y la hidrología subterránea en el Noroeste de Buenos Aires (1980-2010): Aplicación de percepción remota. Tesis de Especialización, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Barros, V; A Menéndez & G Nagy. 2006. El cambio climático en el Río de la Plata. CIMA. Buenos Aires, Argentina.
- Bertram, N & S Chiacchiera. 2013. Ascenso de napas en la Región Pampeana: ¿Consecuencia de los cambios en el uso de la tierra? INTA. Marcos Juárez, Argentina.
- Contreras, S; CS Santoni & EG Jobbágy. 2013. Abrupt watercourse formation in a semiarid sedimentary landscape of central Argentina: the roles of forest clearing, rainfall variability and seismic activity. *Ecohydrology* 6: 794-805.
- DeGIOANNI, A; J Cisneros; A Cantero & A Camarasa. 2002. Las inundaciones en la Provincia de Córdoba (Argentina) y las tecnologías de información geográfica: Ejemplos de Aplicación. *Serie Geográfica* 10: 143-163.
- Engel, V; EG Jobbágy; M Stieglitz; M Williams & RB Jackson. 2005. Hydrological consequences of eucalyptus afforestation in the Argentine pampas. *Water Resour. Res.* 41: W10409, doi:10.1029/2004WR003761.

- Fan, Y; H Li & G Miguez-Macho. 2013. Global Patterns of Groundwater Table Depth. *Science* 339: 940-943.
- Florio, EL; JL Mercau; EG Jobbágy & MD Nosetto. 2014. Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agric. Water Manage.* 146: 75-83.
- García, GA; PE García; SL Rovere; FE Bert; F Schmidt; ÁN Menéndez; MD Nosetto; A Verdin; B Rajagopalan; P Arora & GP Podestá. 2019. A linked modelling framework to explore interactions among climate, soil water, and land use decisions in the Argentine Pampas. *Environmental Modelling & Software* 111: 459-471.
- García, PE; AN Menéndez; G Podestá; F Bert; P Arora & E Jobbágy. 2017. Land use as possible strategy for managing water table depth in flat basins with shallow groundwater. *International Journal of River Basin Management* 16(1):79-92.
- Hall, AJ; CM Rebella; C Ghersa & J Culot. 1992. Field crop systems of the Pampas. In: Pearson, C.J. (Ed.), *Ecosystems of the World, Field Crop Ecosystems*. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Han, SC; CK Shum; C Jekeli & D Alsdorf. 2005. Improved estimation of terrestrial water storage changes from GRACE. *Geophys. Res. Lett.* 32: L07302, doi:10.1029/2005GL022382.
- Jobbágy, EG; MD Nosetto; C Santoni & G Baldi. 2008. El desafío ecológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18: 305-322.
- Kruse, E & E Zimmermann. 2002. Hidrogeología de grandes llanuras: Particularidades en la llanura pampeana (Argentina). XXXII IAH Congress. International Association of Hydrogeologists. Mar del Plata, Argentina.
- Kuppel, S; J Houspanossian; MD Nosetto & EG Jobbágy. 2015. What does it take to flood the Pampas? Lessons from a decade of strong hydrological fluctuations. *Water Resour. Res.* 51: 2937-2950.
- MAGyP, 2020. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Presidencia de la Nación. Estimaciones Agrícolas. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/>. Último acceso: Noviembre 2020.
- Menéndez, AN; N Badano; E Lecertua; F Re & M Re. 2012. Evaluación de las Inundaciones y las Obras de Drenaje en la Cuenca del Salado (Prov. Buenos Aires) mediante Modelación Numérica. Proyecto LHA 331. Informe LHA 01-331-12. Instituto Nacional del Agua. Subsecretaría de Recursos Hídricos. Secretaría de Obras Públicas. República Argentina.
- Mercau, JL; EG Jobbágy; EF Viglizzo; A Menendez; CM di Bella; F Bert; SI Portela; E Figueroa Schiebber; EL Florio; R Gimenez; P García & F Murray. 2013. Sequía e inundación en la Hiperllanura Pampeana. Una mirada desde el lote al municipio. *Agronomía y Ambiente* 33: 71-77.
- Moncaut, CA. 2001. Inundaciones y sequías en la Pampa Bonaerense, 1576-2001. *El Aljibe*.
- New, M; D Lister; M Hulme & I Makin. 2002. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. *Climate Res.* 21: 1-25.
- Nitsch, M. 1995. El desmonte en el Chaco central del Paraguay. Influencia sobre el agua subterránea y salinización de suelos. 2º Simposio sobre aguas subterráneas y perforación de pozos en el Paraguay. San Lorenzo, Paraguay.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy; RB Jackson & G Sznaider. 2009. Reciprocal influence between crops and shallow groundwater in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crop Res* 113: 138-148.
- Nosetto, MD; R Paez; SI Ballesteros & EG Jobbágy. 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.
- Paruelo, JM; JP Guerschman; G Piñeiro; EG Jobbágy; SR Verón; G Baldi & S Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en la Argentina y Uruguay: Marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 10: 47-61.
- SISSA, 2020. Sistema de Información sobre Sequías para el Sur de Sudamérica. Centro Regional del Clima para el sur de América del Sur (CRC-SAS). <https://sisas.crc-sas.org/>. Último acceso: Noviembre 2020.
- Soriano, A; RJC Leon; OE Sala; RS Lavado; VA Deregibus; M Cahuepe; OA Scaglia; CA Velázquez & JH Lemcoff. 1991. Río de la Plata Grasslands. En: RT Coupland (ed.). *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere*. *Ecosystems of the World* 8A. Elsevier. Amsterdam, Países Bajos.
- Usunoff, EJ. 2009. Hydrogeology of large plains. En: L Silveira & EJ Usunoff (eds.). *Groundwater. Encyclopedia of life support systems*. EOLSS Publishers Co Ltd.
- Viglizzo, EF & FC Frank. 2006. Ecological interactions, feedbacks, thresholds and collapses in the Argentine Pampas in response to climate and farming during the last century. *Quaternary International* 158: 122-126.
- Zellner, M; GA García; F Bert; D Massey & M Nosetto. 2020. Exploring reciprocal interactions between groundwater and land cover decisions in flat agricultural areas and variable climate. *Environmental Modelling & Software* 126: 104641.