

DINÁMICA DE AGUAS SUBSUPERFICIALES EN EL OESTE DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Alejandra Macchiavello¹, Cristián Álvarez² , Elke Noellemeyer³ 

¹ Agencia de Extensión Rural General Villegas, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Gral. Villegas, Buenos Aires, Argentina.

² Agencia de Extensión Rural General Pico, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Gral. Pico, La Pampa, Argentina.

³ Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de la Pampa, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.

RESUMEN

Gran parte de la llanura pampeana presenta niveles freáticos cercanos a la superficie que, junto a los excesos hídricos, producen a menudo inundaciones provocando un fuerte impacto sobre los ecosistemas. El propósito de este estudio fue conocer la dinámica del nivel freático y su correlación con las precipitaciones en el oeste de la provincia de Buenos Aires, caracterizando eventos de inundación, identificando riesgos hídricos por el nivel freático cercano a la superficie, mediante el empleo de un modelo estadístico. Se recabaron y compilaron series temporales de datos de nivel freático a partir de la toma de datos de freatómetros distribuidos en General Villegas. Se determinó una asociación alta del nivel freático con la posición del paisaje (loma, media loma y bajo) en la serie de años analizada. General Villegas ha sufrido inundaciones con cierta periodicidad, provocadas por las precipitaciones y por el consecuente ascenso del nivel freático que se produce. Se estudiaron los efectos de las inundaciones, mediante el análisis de imágenes satelitales, apreciándose que el 46,6 % de los años evaluados presentan algún síntoma de anegamiento. Se calibró un modelo sencillo que relaciona precipitación, la evapotranspiración potencial y porosidad drenable del suelo con la variación del nivel freático. Los valores medios de nivel freático simulado y observado fueron similares, lo respaldó la calibración y validación del modelo estadístico. En todos los sitios estudiados se presentaron altas consistencias, con valores promedios de RRMSE: 36,66 cm; RMSE: 36,97 % y $d = 0.96$. La dinámica del área inundada y del nivel freático manifestaron un estrecho acoplamiento durante el período de estudio, siendo la precipitación la variable que mayor influencia presentó sobre los ciclos de inundación ($R^2 = 0,55$; $p < 0,005$). Estos eventos, son el resultado combinado de diversos factores, como las precipitaciones, el nivel freático, la topografía y el tipo de suelo de cada lugar.

Palabras clave: precipitaciones, modelo estadístico, suelo.

* Autor de contacto:
macchiavello.a@inta.gob.ar

Recibido:
03-10-24

Recibido con revisiones:
18-03-25

Aceptado:
18-03-25

Este artículo está bajo
licencia internacional



La titularidad del derecho de
autor/a es de los/as Autores/as.

DYNAMICS OF SUBSURFACE WATERS IN THE WEST OF THE PROVINCE OF BUENOS AIRES

ABSTRACT

A large part of the Argentinean Pampas plain has groundwater levels close to the soil surface which, together with excess water, often produce floods, causing a strong impact on ecosystems. The purpose of this study was to understand the dynamics of water-table and its correlation with rainfall in the west of the province of Buenos Aires, characterizing flood events, and identifying water risks due to the water-table near the surface through a statistical model which allows the identification and monitoring of areas affected by waterlogging and flooding. The scope of the flooding events was determined to develop an early

warning system to mitigate the incidence of these extreme events. Time series of water-table level data were collected and compiled from phreatimeter data taken from wells distributed in General Villegas. A high association between water-table and landscape position (summit, slope and footslope) was found in the series of years analyzed. General Villegas has suffered floods with a certain periodicity, caused by rainfall and the consequent rise in the water table. The effects of the floods were studied through the analysis of satellite images, showing that 46.6% of the years evaluated presented some evidence of waterlogging. A simple model that relates precipitation, potential evapotranspiration, and drainable porosity of the soil with variations in water-table was calibrated. The mean simulated and observed water-table values were similar, which was supported by the calibration and validation of the statistical model. Throughout the studied sites, high consistencies were found between predicted and observed values of water-table (RRMSE= 36.66 cm; RMSE= 36.97% and $d= 0.96$). The dynamics of the flooded area and the water table showed a close coupling during the study period, with precipitation being the most influential variable in flood cycles ($R^2=0.55$; $p<0.005$). These events result from the interaction of several factors, such as rainfall, water-table, topography, and soil type at each site.

Keywords: precipitation, statistical model, soil

INTRODUCCIÓN

Los paisajes llanos extensos se caracterizan por un bajo transporte horizontal del agua como resultado de una baja escorrentía superficial y flujos lentos de agua subterránea que pasan a estar dominados por trayectorias de flujo de escala local a intermedia (Small et al., 1963). Por lo tanto, el balance hídrico de estos sistemas está determinado principalmente por la precipitación y la evapotranspiración, mientras que los flujos de agua subterránea y su conexión con el agua superficial dependen en gran medida de la conductividad hidráulica y de la textura y porosidad de los suelos (Kollet, 2009). Los excedentes hídricos se traducen naturalmente en recarga que se refleja en una variación del nivel freático y excesos hacen que el acuífero se aproxime a la superficie pudiendo aflorar en situaciones particulares. Este flujo puede contribuir a elevar la productividad de la vegetación, cuando el aporte de agua subsuperficial 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 (Florio et al., 2014; Nosetto et al., 2009).

La llanura Pampeana es una planicie sedimentaria que abarca más de 600.000 km², con una escasa red de drenaje superficial hacia el océano y nivel freático cercano a la superficie que, junto a los excesos hídricos por precipitaciones, producen con frecuencia inundaciones. Los ciclos de sequía-inundación provocan cambios en la profundidad del nivel freático que ejercen una importante influencia sobre los ecosistemas naturales y cultivados (Aragón et al., 2011; Nosetto et al., 2009). En muchos ambientes de la región pampeana, niveles freáticos cercanos a la superficie pueden convertirse en una fuente importante de agua para las plantas (Jobbágy y Jackson, 2004), una oportunidad de usar el exceso de agua de lluvia almacenada en los suelos. Sin embargo, largos periodos de lluvias importantes pueden provocar que el nivel freático este demasiado cerca de la superficie, afectando negativamente el crecimiento y el desarrollo de la vegetación. Disponer de información sistematizada de la profundidad del nivel freático en los sistemas que resultan influenciados por ellos, sumado al análisis de dichos datos para su caracterización permitirían evaluar estrategias de adaptación y mitigación en el territorio. Esta información también es fundamental para alimentar y validar modelos hidrológicos para poder predecir el comportamiento del sistema hidrológico ante cambios climáticos.

La dinámica del nivel freático se puede modelar de varias maneras, desde modelos físicos y mecánicos complejos hasta modelos empíricos simples de series de tiempo y modelos estadísticos. Para la región de estudio, se calibró un modelo estadístico para estimar la fluctuación de la profundidad del nivel freático para suelos representativos de la región pampeana. Este modelo estadístico propuesto por Cisneros et al (1997) y ajustado por Videla Mensague (2018) plantea que la oscilación del nivel freático puede ser caracterizado adecuadamente a través de datos de lluvia, evapotranspiración potencial y la porosidad drenable del suelo.

El propósito de este estudio fue conocer la dinámica del nivel freático, en agroecosistemas agrícolas y su correlación con las precipitaciones y la topografía en el oeste de la provincia de Buenos Aires. Se propone predecir eventos de inundación e identificar riesgos hídricos por el nivel freático cercano a la superficie, mediante la calibración y validación de un modelo estadístico. Esta herramienta permite el seguimiento e identificación de áreas afectadas por anegamiento e inundaciones, y la frecuencia, época del año y el tiempo de duración de estos fenómenos. Permitiendo así, elaborar alertas tempranas y/o planificar el uso de la tierra de dicho territorio para mitigar la incidencia de estos eventos extremos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

En Argentina, la llanura pampeana se subdivide según las características de sus suelos y de las precipitaciones en 5 subregiones: Pampa Ondulada, Pampa Central, Pampa Austral, Pampa Mesopotámica y Pampa Deprimida (Viglizzo et al., 2001). El área de estudio se encuentra en la Pampa Arenosa de la subregión Pampa Central, y está situada en el partido de General Villegas, Buenos Aires, Argentina. El área corresponde a la unidad geomorfológica de llanuras continentales, subunidad medanosa y de arenas finas (Zárate, 2003). La región noroeste bonaerense es una extensa llanura con pendiente regional de oeste a este con un gradiente medio de 0,025 % (Zamolinski et al., 1994). El paisaje está constituido por lomas, planicies y cordones medanosos cubiertos por sedimentos de origen eólico de reciente depositación sobre los que evolucionaron los suelos actuales.

El clima de esta región es templado, con moderadas condiciones continentales hacia el oeste, sin grandes amplitudes térmicas diarias ni anuales. Las precipitaciones en términos generales decrecen de Noreste a Sureste, registrándose en el sector litoral más de 1000 mm año⁻¹ y en la zona más occidental menos de 500 mm año⁻¹ (Carta, 2016). La relación entre las precipitaciones y la demanda por evapotranspiración determina un período seco desde julio a septiembre y una relación negativa entre noviembre y febrero (Díaz-Zorita et al., 2002).

En el partido de General Villegas (723.300 ha) la mayor parte de la superficie está ocupada por suelos Hapludoles típicos (38,5 %), Hapludoles thapto-nátricos (17,8 %), Hapludoles thapto-árgicos (16,0 %) y Hapludoles énticos (11,6 %) (Justo y Sueiro, 2013).

Muestreo de los niveles freáticos

Se recabaron y compilaron series temporales de datos de nivel freático a partir de la toma de datos de freatímetros distribuidos en establecimientos rurales del partido de General Villegas. El nivel freático se definió como la distancia vertical entre el nivel de agua libre en freatímetro y la superficie del terreno en el punto de medición. Las series temporales abarcaron un periodo de 15 años, entre los años 2000 y 2014.

La información recopilada se empleó para conformar series temporales de datos de acuerdo con características de la ubicación a fin de mejorar su posterior análisis. Para cada serie se incorporó su identificación, coordenadas geográficas, elevación, tipo de suelo y unidades de tiempo.

Sitios de relevamiento de aguas subterráneas

Se reunió información de veintitrés pozos de monitoreo, distribuidos en diferentes posiciones topográficas del partido de General Villegas. Los pozos de relevamiento son tuberías de PVC (diámetro exterior de 10 cm), que se extienden 12 m de profundidad y 0,5 m por encima de la superficie del suelo. La abertura de la tubería superior se tapó con una tapa de PVC. En la sección inferior de 0,5 m de la tubería, los caños se ranuraron. Para evitar que el agua de lluvia baje por la pared de la tubería, la tubería de PVC a nivel del suelo se cementó y encamisó. Se midió el nivel freático una vez al mes durante 15 años. La elevación absoluta de la posición de cada pozo se determinó con un GPS diferencial (Trimble 4600 LS, Trimble Navigation Ltd., Sunnyvale, CA, EE. UU.; precisión estática horizontal = 5 mm; precisión estática vertical = 10 mm). Además, se relevó la información de precipitaciones de estaciones meteorológicas distribuidas en distintos puntos del partido de General Villegas. Esta información, relevada de manera automática permitió constatar la consistencia de los datos relevados manualmente en cada sitio donde están ubicados los freatímetros.

Obtención y procesamiento de imágenes satelitales

Para estudiar los efectos de las inundaciones se procedió a obtener las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio para el periodo comprendido entre 2000-2015. Se analizaron imágenes del satélite Landsat 5, Landsat 7 TM y Landsat 8 OLI/TIRS, comprendiendo siempre que fuera posible, el mes de febrero de cada año. Este mes, se seleccionó por ser un momento productivo relevante, de alta demanda atmosférica y de recarga hídrica en el partido de General Villegas. La imagen utilizada corresponde al path & row 228/84 porque contiene el partido de General Villegas en su totalidad.

Los raster obtenidos en cada clasificación fueron convertidos al sistema vectorial a través del comando vectorización/sectorizar capa raster (polígonos). El resultado del proceso de clasificación, correspondiente a la clase agua se procedió a guardarla, mediante el comando capa/exportar a/SHP. Luego en cada tabla de atributos de cada capa, se calculó la superficie de cada polígono a través del comando capa/agregar

información geométrica/área. De esta forma quedaron constituidos 15 shapefiles de superficie inundada del área de estudio.

Modelo estadístico para modelizar el nivel de aguas subsuperficiales

Modelo Estadístico: Las series de datos recabadas se analizaron por un modelo estadístico desarrollado por Cisneros et al. (1997). Es una ecuación de primer grado que relaciona la precipitación (P, mm), la evapotranspiración potencial (ETP, mm) y porosidad drenable del suelo (μ) con la variación del nivel freático (ΔNF , cm) en un período de tiempo mensual. La ecuación tiene la siguiente forma:

$$\Delta NF_{t2-t1} = \frac{0,1}{\mu} * (PPT - ETP)_{t2-t1} + e \quad (1),$$

donde ΔNF_{t1-t2} es la variación del nivel freático en el período t1-t2 (cm), μ es la porosidad drenable (agua entre saturación y capacidad de campo), $PPT-ETP_{t2-t1}$ es la diferencia entre precipitación y evapotranspiración en el mismo período t1-t2, y e es el coeficiente de error.

Para el cálculo del balance hídrico se utilizaron las precipitaciones registradas por los campos y el dato de evapotranspiración de referencia tomado de estaciones meteorológicas automáticas cercanas a los campos. La calibración óptima de los parámetros del modelo se realizó para cada freatímetro mediante el uso de Solver en Excel, en donde se ajustaron los valores μ y e para cada freatímetro, dejando como parámetros de carga los valores de precipitación y evapotranspiración para estimar la variación en el nivel freático.

Indicadores estadísticos en la calibración y validación del modelo

El modelo calcula el nivel freático en centímetros, a partir del nivel freático observado, las precipitaciones y la evapotranspiración, en una fracción de tiempo mensual. La calibración fue realizada con grupos de datos seleccionados al azar ($n = 2830$) y se agruparon en series de tiempo según los eventos climáticos ocurridos. Para la validación, se usaron otros datos ($n = 1220$) con el mismo criterio de agrupamiento de series de tiempo.

Se utilizó el software IRENE (Fila et al., 2003) para evaluar el rendimiento del modelo con varios indicadores estadísticos: coeficiente de determinación, índice de concordancia (d, Willmott, 1982), error cuadrático medio (RMSE), desviación estándar general (GSD, %, Jørgensen et al., 1986), variación cuadrática media (MSV, %, Kobayashi y Salam, 2000) y sesgo (SB, %, Kobayashi y Salam, 2000). El sesgo y el MSV se derivan de la partición del error cuadrático medio y, en consecuencia, son complementarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización climática del período de estudio

Para el período 2000-2014 se estimó una precipitación media de 830 mm año⁻¹ con un desvío estándar de 240 mm año⁻¹. Se registraron precipitaciones mínimas en el área de estudio cercanas a los 448 mm año⁻¹ (año 2009) y precipitaciones máximas que llegaron a 1169 mm año⁻¹ (año 2012). La evapotranspiración potencial promedio fue de 1194 mm año⁻¹ con un desvío estándar menor al de la precipitación (94 mm año⁻¹) y los valores mínimos y máximos registrados variaron entre 1060 y 1380 mm año⁻¹ (Figura 1). En promedio para todo el período de estudio, el cociente entre precipitación y evapotranspiración fue de 0,70, lo que correspondió a un déficit climático medio de 364 mm año⁻¹. Además, se observó que la precipitación superó a la evapotranspiración el 22 % de los años. El análisis de correlación mostró una relación inversa ($r = -0,69$; $p < 0,05$) entre la PPT y ETP, lo que sugiere que la situación de excesos hídricos de años lluviosos, con el consecuente ascenso de los niveles freáticos es exacerbada por la menor demanda atmosférica de vapor.

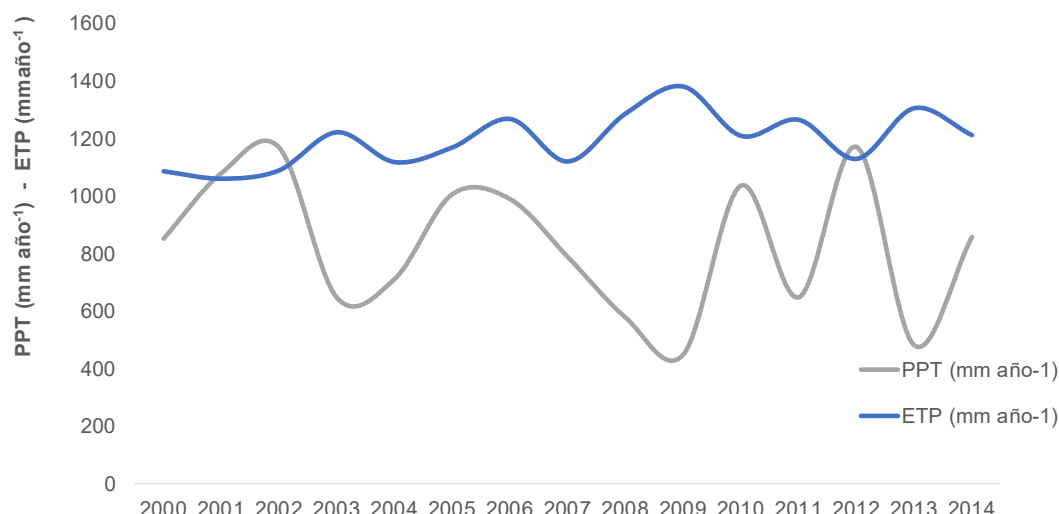


Figura 1. Valores mensuales de precipitación y evapotranspiración para General Villegas en el periodo 2000-2014.

Figure 1. Monthly values of precipitation and evapotranspiration in General Villegas for the period 2000-2014.

Análisis de la variabilidad freática

La base de datos cuenta con 23 estaciones de medición del nivel freático con 14 años de datos permitiendo el análisis de una serie de largo plazo. La profundidad del nivel freático medio estimada para el período de análisis (2000 -2014) fue de 237 cm. Los valores mínimos y máximos medios de la región de estudio fueron 18 (en el año 2001) y 506 cm (en el año 2011), respectivamente, lo que indica un rango de variación máximo de 488 cm.

Las variaciones del nivel freático a lo largo del año muestran cierta estacionalidad, permitiendo identificar períodos de recarga y descarga freática. Los meses invernales son los más estables, con escasas variaciones y con una muy baja variabilidad entre años.

En los años 2000, 2001 y 2002, el nivel freático medio fue de 149 cm, 171 cm y 173 cm, respectivamente. Las máximas tasas de ascenso de nivel ocurrieron en septiembre 2000, octubre 2001, febrero 2002 y agosto 2002 con valores entre 4,9 a 11,4 cm mes⁻¹, mientras que las máximas tasas de descenso de nivel fueron en julio 2009 y marzo del 2011, con valores de entre 4,5 y 6,5 cm mes⁻¹. Esto nos indica que el nivel freático tiende a ascender hacia la superficie a tasas más veloces que a las que se profundiza y sugiere un comportamiento de tipo pulso.

Análisis de recurrencia de inundaciones

General Villegas ha sufrido inundaciones con cierta periodicidad, provocadas por las precipitaciones y por el consecuente ascenso del nivel freático. El área de estudio mostró algunas oscilaciones de la superficie cubierta por agua a lo largo del período de 15 años de estudio con valores extremos de 0,50 y 8,24%. Para describir la frecuencia de anegamientos entre 2000 y 2015 se utilizaron imágenes del satélite Landsat (5 a 8). En esta secuencia de imágenes se puede apreciar que el 46,6 % de los años evaluados presenta algún síntoma de anegamiento.

En este período, se lograron apreciar claramente varias etapas de suelos encharcado. Los mismos tuvieron sus máximos de afectación durante los años 2002 y 2003, llegando el área inundada a cubrir el 8,24 y 7,13 % del paisaje respectivamente (Figura 2).

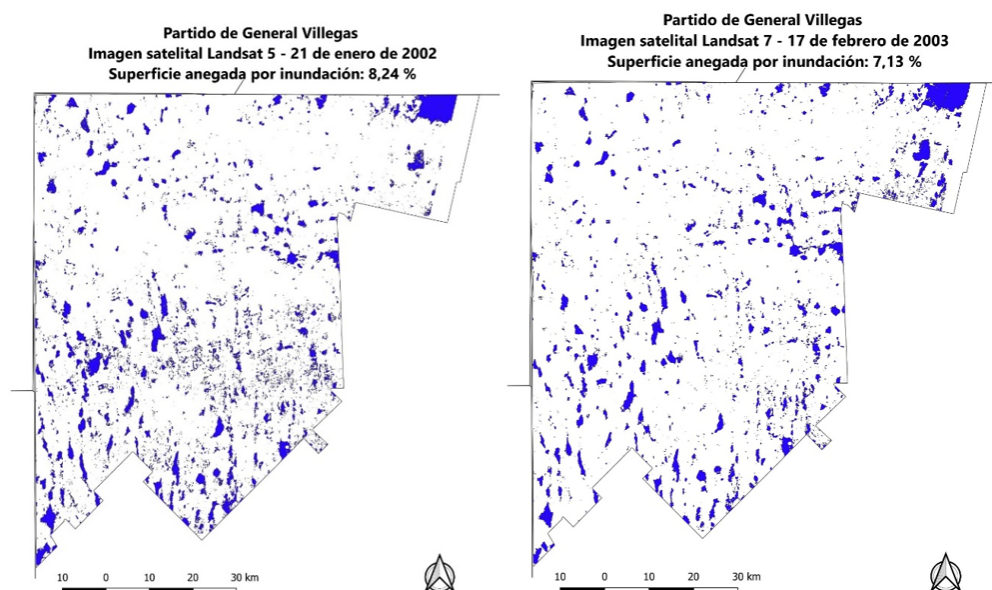


Figura 2. Superficie anegada (%) en General Villegas en los años 2002 y 2003.

Figure 2. Flooded surface (%) in General Villegas in the years 2002 and 2003.

Se identificaron también, otros eventos que impactaron en la superficie anegada del territorio, aunque no superaron el 4,16 %. Estos eventos ocurrieron en los años 2005, 2007 y 2013. Se estudió el comportamiento del nivel freático frente al área inundada (%) y se observó que estuvieron relacionados de manera similar en ambos períodos. Los sitios del paisaje que presentan niveles freáticos más profundos (> 250 cm), los ascensos del nivel manifiestan aumentos del área inundada en menores superficies. En cambio, los lugares que registran niveles más superficiales, los mismos cambios de nivel manifiestan mayores aumentos del área inundada. Se observó una relación negativa entre el nivel freático y el área inundada con un R^2 de 0,55 y un $p < 0,005$.

Los resultados obtenidos con el análisis de la información del partido de General Villegas permiten confirmar que la cantidad y estacionalidad de las precipitaciones, afectan la dinámica del nivel freático. Si los promedios anuales de lluvias están por encima de los valores normales, se evidencian los máximos ascensos y la ocurrencia de áreas inundadas. Las diferentes posiciones del paisaje muestran un mayor o menor grado de afectación de estas condiciones, según la posición sea de bajo, media loma o loma. Los suelos del área de estudio también son un factor de impacto, ya que la presencia de capas de lenta o rápida permeabilidad subsuperficial como por ejemplo los horizontes B texturales afectan la dinámica mencionada.

Los suelos de General Villegas presentan perfiles con superposición de diferentes materiales. Son comunes los horizontes B endurecidos, que provocan y dificultan el drenaje interno, áreas deprimidas con suelos sódicos, y a veces también salinos. La cuantificación del área inundada permitió identificar que los mayores porcentajes inundados correspondían a suelos con este tipo de características (INTA, 2010).

La región en estudio mostro momentos con importantes aumentos del nivel freático e inundaciones con diferente magnitud en cuanto a superficie afectada. Las posiciones del paisaje, altas o bajas mostraron diferente nivel de afectación. Según Aragón (2010) los contrastes consistentes entre los sitios de las tierras altas y las tierras bajas se hicieron evidentes. El área inundada promedio y máxima aumentó hacia los sitios de baja elevación y, paralelamente a esta tendencia, los niveles de agua subterránea estaban más cerca de la superficie. En este estudio encontramos que en el periodo 2000 al 2003, unas 61.000 hectáreas permanecieron cubiertas por cuerpos de agua, que es una de las zonas más productivas de Argentina. Esta situación, sin duda, abre desafíos y conflictos para los productores de la tierra, que intentan equilibrar los beneficios de las profundidades intermedias del nivel freático que maximiza el rendimiento de los cultivos (Nosetto et al., n.d.) frente a niveles poco profundos que provocan el anegamiento y daños a los cultivos. (Viglizzo et al., 2006)

Los niveles freáticos alcanzados en General Villegas, plantean 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 del nivel freático sobre los cultivos, tanto positivas (aportes), como negativas (anegamiento) (Alsina Torres et al., 2020; García et al., 2019).

Modelos Predictivos

La relación entre condiciones hidrológicas y meteorológicas se realizó considerando múltiples escalas temporales. Se encontró una fuerte asociación entre las variables estudiadas, cuyas máximas correlaciones se obtuvieron para periodos de integración de 24 y 48 meses, perdiendo peso dicho análisis en periodos más extensos. Se estudió el comportamiento del nivel freático particionando en distintos periodos de tiempo: 2000-2004, (Figura 3), 2005-2006 (Figura 4), 2007-2008 (Figura 5), 2009-2011 (Figura 6) y 2012-2014 (Figura 7), con el fin de evaluar si en cada periodo las diferencias en el registro de precipitaciones afectaron directamente el resultado de la ecuación. La dinámica del nivel freático depende fundamentalmente del agua de lluvia que se infiltra migrando a la zona de saturación. Como consecuencia de las lluvias el nivel asciende (años 2000, 2001, 2002, 2007 y 2010), y caso contrario ocurre cuando existen periodos de escasas precipitaciones (2009 y 2011). Las oscilaciones del nivel freático tomado como promedio anual del período 2000-2015 evidencia un ascenso en el período.

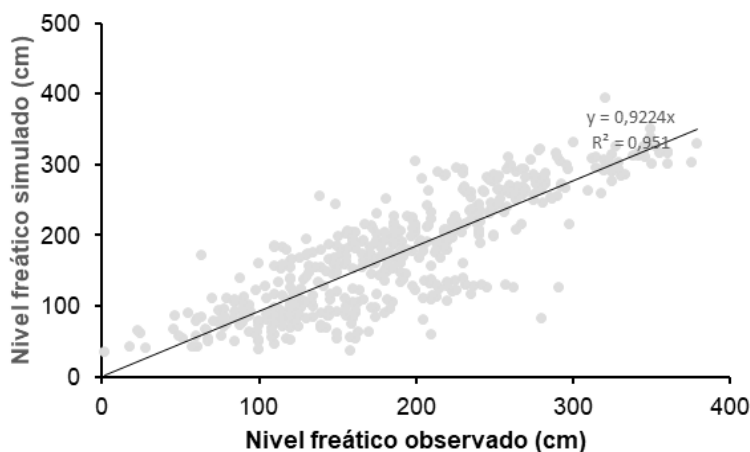


Figura 3. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2000-2004.

Figure 3. Relation between the simulated and observed water-table in the period 2000-2004.

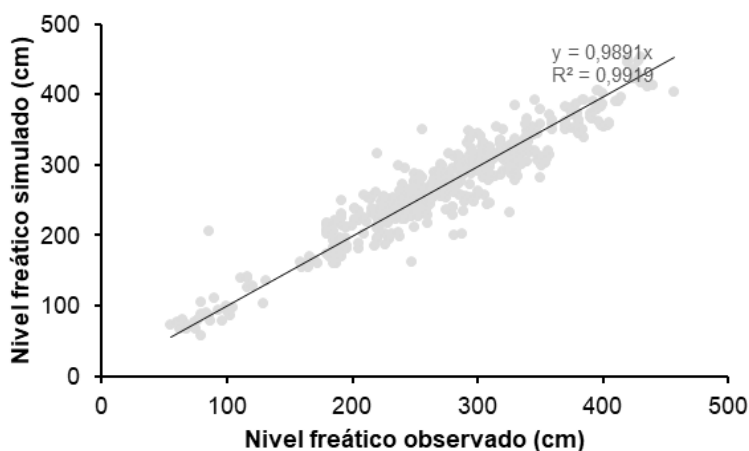


Figura 4. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2005-2006.

Figure 4. Relation between the simulated and observed water-table in the period 2005-2006.

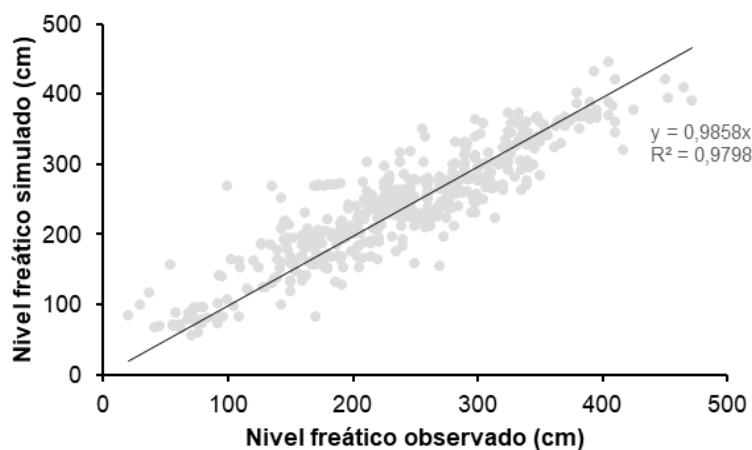


Figura 5. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2007-2008.

Figure 5. Relation between the simulated and observed water-table in the period 2007-2008.

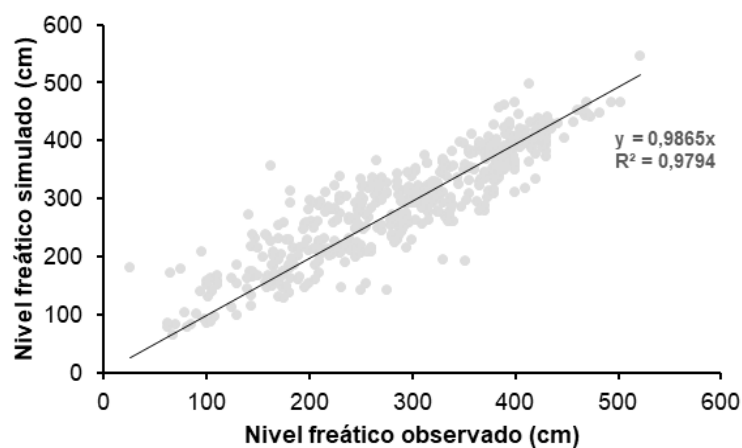


Figura 6. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2009-2011.

Figure 6. Relation between the simulated and observed water-table in the period 2009-2011.

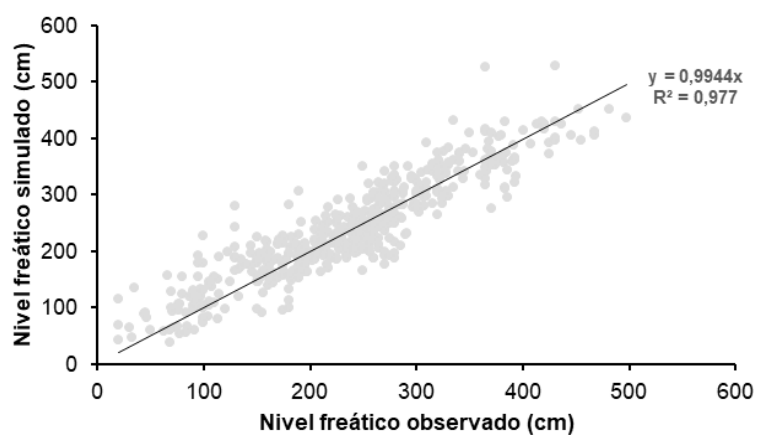


Figura 7. Relación entre el nivel freático simulado y el nivel freático observado en el período 2012-2014.

Figure 7. Relation between the simulated and observed water-table in the period 2012-2014.

Calibración del modelo

Para la calibración del modelo se utilizaron los datos de nivel freático diferenciados por distintos sitios y en años secos, húmedos y normales, en el partido de General Villegas. Se ajustaron ciertos parámetros del modelo (Nivel freático, precipitación y evapotranspiración) para obtener una buena relación entre los valores obtenidos.

Con respecto a los indicadores estadísticos, el coeficiente de determinación (R^2), resultante de relacionar linealmente los valores simulados y observados, fueron buenos con valores mínimos de 0,69 y valores máximos de 0,90. En general, analizando cada unidad de origen y pendiente en la recta de regresión, podemos decir que los datos ingresados y los modelados son consistentes en la relación.

Los valores de estimación de RRMSE obtenidos en las simulaciones analizadas variaron en el rango de 25 a 51,8 %, expresando simulaciones buenas y muy buenas, respectivamente. El RMSE proporcionó resultados adecuados en diferentes sitios simulados, en todas las calibraciones osciló, en general, entre 19,9 y 52,7 cm. Finalmente, el índice de concordancia (d) fue de 0,91, medida del error relativo del modelo, al aproximarse a 1 evidencia que los valores simulados y observados son idénticos. En líneas generales, el análisis de los resultados estadísticos utilizados en la calibración, pueden ser suficientes para que este tipo de modelo tenga un nivel de aproximación adecuado para evaluar el comportamiento de estos. No obstante, cada uno tiene sus propias fortalezas y debilidades; cuantificación de la dispersión de los datos, la sensibilidad a los valores extremos o la percepción a la sobre estimación o subestimación; lo que significa que es necesario el uso de un conjunto de diferentes indicadores para evaluar suficientemente el modelo. Todos los resultados demuestran que este modelo estadístico explica adecuadamente el nivel freático evaluado bajo las condiciones ambientales y edáficas del partido de General Villegas.

Validación del modelo

Los parámetros calibrados del modelo estadístico se mantuvieron y para analizar la robustez de estos resultados generales se graficaron y compararon los niveles freáticos para cada sitio entre los años 2000-2014 donde el modelo estadístico permitió una estimación adecuada del nivel freático para los distintos lugares.

Los valores medios de nivel freático simulado y nivel freático observado fueron similares (Figura 8), tal como lo respaldó la calibración y validación en el modelo estadístico. En general, en todos los sitios estudiados se presentaron altas consistencias, con valores promedios de RRMSE: 36,66 cm; RMSE: 36,97 % y $d = 0.96$.

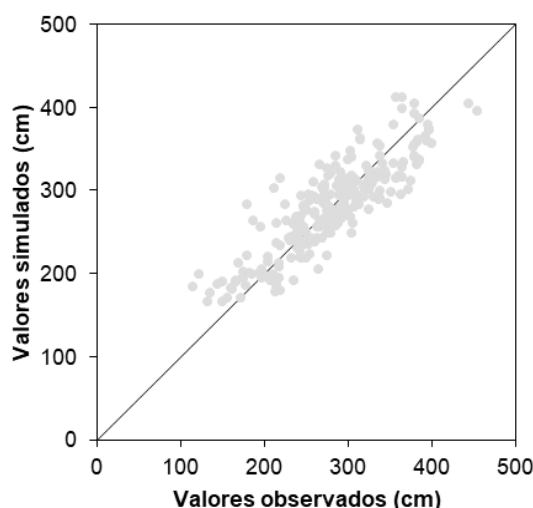


Figura 8. Relación entre los valores promedios de los niveles freáticos simulados y los niveles freáticos observados, en General Villegas.

Figure 8. Relation between the average values of the simulated and observed water-table levels in General Villegas.

Relación entre nivel freático observado, precipitación, evapotranspiración y nivel freático simulado

En general, la diferencia entre valores estimados por el modelo y los valores observados mensualmente tienen un buen ajuste. Según los criterios definidos anteriormente, el ajuste de RRMSE, RMSE y d fue bueno a muy bueno para la mayoría de los sitios. Para considerar una perspectiva de análisis distinta, se representa un diagrama de dispersión para corroborar visualmente la relación entre nivel freático observado y sus estimaciones. Se pueden identificar algunos patrones de comportamiento si se analizan la totalidad de los puntos recabados entre el nivel freático observado y los residuos del modelo empleado (Figura 9). Con niveles de residuos por encima de 100 cm, el modelo presenta sobre o subestimaciones en los valores de nivel freático. Con valores residuales entre 0 y 100 cm tienden a estabilizarse las diferencias. Se observan, en general, una mejor estimación cuando los valores estimados se acercan a los valores observados.

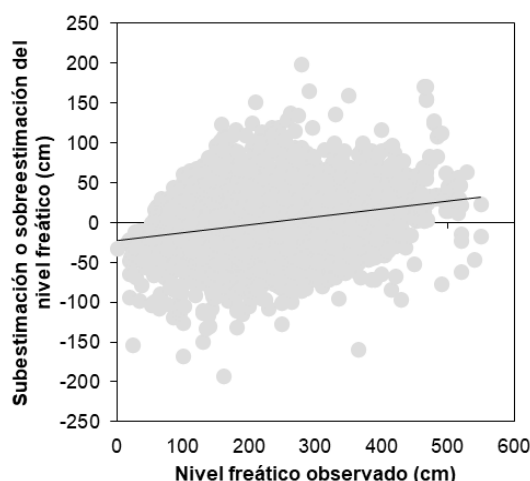


Figura 9. Relación entre el nivel freático estimado y el nivel freático observado según modelo estadístico aplicado.

Figure 9. Relation between the estimated and observed water-table according to the applied statistical model applied.

Se considera que los movimientos verticales (evaporación, transpiración, infiltración, intercambios en la zona no saturada y la capa freática), prevalecen sobre los movimientos horizontales (superficial y subterráneo), adquiriendo importancia las variaciones de almacenamiento superficial y subterráneo. Así, la zona de ascenso y descenso del nivel freático se relacionaría a las fluctuaciones climáticas (excesos y déficit en las precipitaciones) y a las condiciones texturales de la matriz edáfica (Degioanni et al., 2006; Kruse y Zimmermann, n.d.).

Análisis entre la posición del paisaje, tipo de suelos y el nivel freático simulado

El paisaje de General Villegas presenta diferentes tipos de suelos, según la posición que ocupan en el relieve. Los paisajes de lomas están ocupados por suelos profundos, Hapludoles énticos y Arguidoles típicos, en las posiciones intermedias se ubican los suelos Hapludoles típicos y suelos con alguna discontinuidad de horizontes, como los suelos Hapludoles thapto árgicos y Hapludoles thapto nátricos; mientras que en las posiciones bajas del paisaje se ubican los suelos Natracuoles típicos y dúricos (INTA, 1986). El nivel freático desarrolla una dinámica, a lo largo de los años estudiados, acorde con las características y posición de los distintos sitios estudiados. Las posiciones altas del paisaje mantuvieron niveles freáticos profundos y ante eventos extremos no mostraron situaciones de anegamiento o inundación. Las posiciones de media loma, mostraron un ascenso de nivel freático mayor y los suelos con discontinuidad de horizontes evidenciaron problemas ante excesos de lluvias. Las posiciones de bajo presentan un nivel freático cercano a la superficie y con problemas de anegamiento casi de forma permanente.

La base de datos construida para analizar la dinámica de aguas subsuperficiales en General Villegas permitió identificar cuatro tipos de suelos predominantes del lugar: Argiudol típico, Hapludol típico, Hapludol éntico y Hapludol thapto árgico; y tres posiciones diferentes de relieve: loma, media loma y bajo. Los ajustes RRMSE, RMSE y d fueron muy buenos para cada situación analizada. Para los suelos Arguidoles típicos los valores promedios de RRMSE= 40,65 cm, RMSE= 41,67 % y d = 0,895. Los Hapludoles énticos tuvieron valores promedios de RRMSE= 29,04 cm, RMSE= 29,19 % y d = 0,92. Los Hapludoles thapto árgico tuvieron valores promedios de RRMSE= 38,91 cm, RMSE= 38,97 % y d = 0,915. Por último, los suelos Hapludoles típicos

tuvieron valores promedios de $RRMSE = 36,28$ cm, $RMSE = 36,43$ % y $d = 0,916$. Con respecto a las posiciones del paisaje, todas las situaciones presentaron un buen nivel de ajuste. Para la posición de loma, los valores promedios fueron $RRMSE = 34,46$ cm, $RMSE = 34$ %, $d = 0,926$. La posición de media loma, tuvo valores promedio de $RRMSE = 35,16$ cm, $RMSE = 35,7$ % y $d = 0,91$. La posición de bajo, tuvo valores promedios de $RRMSE = 39,9$ cm, $RMSE = 40,16$ % y $d = 0,906$. Esta ecuación de regresión mostró muy buenos ajustes en todas las situaciones estudiadas, captando las variaciones del nivel freático ocurrida en suelos con diferentes tipos de características y de la posición del paisaje. Los resultados de este estudio mostraron que el modelo estadístico empleado parece ser una herramienta adecuada para el estudio de la oscilación del nivel freático ante diferentes condiciones climáticas y en distintos sitios que cuenten con niveles altimétricos diferentes y posean suelos con distintas características. Sin embargo, la calidad de las predicciones tuvo importantes diferencias entre los distintos tipos de suelos, ya que se encontraron importantes variaciones en la sobre- u subestimación de los niveles freáticos según tipo de suelo y posición en el relieve, lo cual da entender que existen otros factores que afectan la dinámica hidrológica regional tales como cobertura del suelo, tipo de rotaciones y uso del suelo. La dinámica del nivel freático es explicada por las diferentes propiedades físicas en cada suelo relacionadas a la variabilidad en la porosidad de los horizontes. Tal porosidad determina la mayor o menor facilidad para que ocurran los flujos hídricos entre horizontes (drenaje y ascenso capilar). Aquellos con textura franco o franco arcilloso tienen mayor ascenso capilar por aporte del nivel freático respecto a suelos arenosos (Raes et al., 2006). En el caso de las texturas muy arcillosas, el ascenso capilar se vería impedido por la escasez de meso poros en la matriz del suelo. El comportamiento del nivel freático es dinámico y complejo, aunque el modelo utilizado detectó respuestas aceptables a la variabilidad en los aportes que realiza en el perfil del suelo.

Mediante el empleo del mismo modelo estadístico en otras zonas, Videla (2016) concluyó que es una herramienta aceptablemente para simular la profundidad del nivel freático para el rango de textura franco arenosas, francas y franco limosas y para un rango de variaciones del nivel freático entre 0 a 350 cm.

Las simulaciones en dos ambientes contrastantes y representativos de General Villegas (Figura 10 y Figura 11) con tres escenarios climáticos (húmedo, normal y seco según percentiles 25, 50 y 75 de la base de datos de precipitaciones del lugar) arrojaron diferentes escenarios de nivel freático y distintas respuestas de acuerdo con el tipo de suelo. El nivel inicial de la napa fue de 230 cm, tomando como referencia el promedio de nivel de todos los registros.

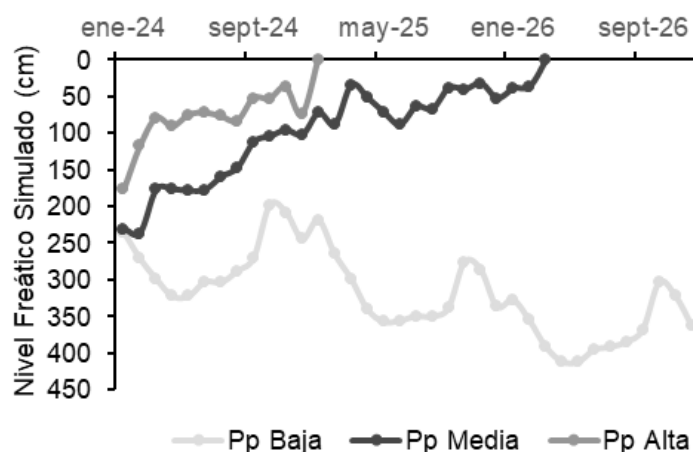


Figura 10. Niveles freáticos estimados para un suelo Hapludol típico para distintas precipitaciones en General Villegas.

Figure 10. Estimated phreatic levels for a Typical Hapludoll soil for different rainfalls in General Villegas.

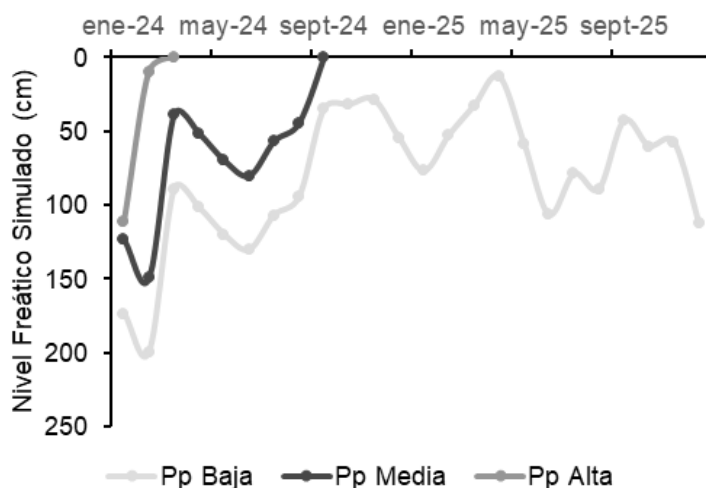


Figura 11. Niveles freáticos estimados para un suelo *Hapludol thapto árgico* para distintas precipitaciones en General Villegas.

Figure 11. Estimated phreatic levels for a *Thapto-argic Hapludoll* soil for different rainfalls in General Villegas.

Según el modelo ajustado para cada lugar, en un suelo *Hapludol* típico ante un escenario de precipitaciones normales (920 mm) el nivel freático tendría una tendencia de ascenso y de persistir en el tiempo estos valores de precipitaciones, se manifestaría una situación de anegamiento (Figura 10). Para un escenario de precipitaciones bajas (647 mm), en nivel freático evidencia un marcado descenso y en caso de persistir estos valores de precipitaciones, el nivel alcanzado deja de tener importancia agronómica porque no puede ser aprovechado por ningún cultivo. Para un escenario de altas precipitaciones (1015 mm) la tendencia al ascenso se acelera y se evidencian situaciones de anegamiento en menor plazo de tiempo. Un suelo *Hapludol thapto árgico* (Figura 11), mostró una dinámica de nivel freático mucho más abrupta, rápidamente se observan situaciones de anegamiento ante precipitaciones normales e intensas, considerando que sus niveles son más superficiales en general. Ante escenarios de precipitaciones bajas (642 mm), estos suelos muestran una dinámica de pulso, respondiendo el nivel freático al evento puntual de precipitación.

Este tipo de simulaciones permitió de manera sencilla conocer la tendencia del nivel freático ante posibles escenarios climáticos de la región. Sus resultados, pueden emplearse para la toma de decisiones en el diseño de las estrategias de manejo de cultivos y uso del suelo, y puede resultar un insumo relevante para diseñar el ordenamiento territorial e hidrológico de la región.

CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se logró conocer el comportamiento del nivel freático en el oeste de Buenos Aires y su vínculo con los eventos de inundaciones, siendo las precipitaciones la variable de mayor impacto. Se logró calibrar un modelo sencillo para el área, el cual permitió comprender la dinámica del nivel freático en la zona. La dinámica del nivel freático mostró un estrecho acoplamiento con las precipitaciones en General Villegas lo cual quedó evidenciado a través de la cuantificación de la superficie anegada y los modelos estadísticos utilizados. El paisaje afecta el nivel freático siendo la topografía y el tipo de suelo los principales factores. El modelo estadístico empleado permite establecer escenarios para efectuar sistemas de alerta temprana, ya que es una herramienta validada y calibrada para el área.

Es necesario reconocer la relevancia adquirida por el nivel freático en la producción de cultivos, así como las amenazas que puede presentar su elevación en el perfil del suelo y los posibles episodios de anegamiento que esto puede generar.

REFERENCIAS

- Alsina Torres, S. E., Nosetto, M. D., y Jobbagy Gampel, 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. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/143180>
- Aragón, R., Jobbágy, E. G., y Viglizzo, E. F. (2011). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina). *Ecohydrology*, 4(3), 433–447. <https://doi.org/10.1002/ECO.149>
- Carta, H. G. (2016). *Análisis de 115 años de precipitaciones (primera parte)*. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/667>
- Cisneros, J.M.; J.J. Cantero y A. Cantero G. 1997. Relaciones entre la fluctuación del nivel freático, su salinidad y el balance hídrico, en suelos salino-sódicos del centro de Argentina. *Revista UNRC*, 17, 23-35.
- Degioanni, A., Cisneros, J., Cantero, A. G., y Videla, H. (2006). Modelo de simulación del balance hídrico en suelos con freática poco profunda. *Ciencia Del Suelo*, 24(1), 29–38. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672006000100004&lng=es&nrm=iso&tng=es
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A., y Grove, J. H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1–18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00274-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00274-4)
- Fila, G., Bellocchi, G., Acutis, M., y Donatelli, M. (2003). irene: a software to evaluate model performance. *European Journal of Agronomy*, 18(3–4), 369–372. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00129-6](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00129-6)
- Florio, E. L., Mercau, J. L., Jobbágy, E. G., y Nosetto, M. D. (2014). Interactive effects of water-table depth, rainfall variation, and sowing date on maize production in the Western Pampas. *Agricultural Water Management*, 146, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.022>
- García, G. A., García, P. E., Rovere, S. L., Bert, F. E., Schmidt, F., Menéndez, Á. N., Nosetto, M. D., Verdin, A., Rajagopalan, B., Arora, P., y Podestá, G. P. (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. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2018.10.013>
- INTA. 1986. *Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires*. Escala 1:50.000. Version digital. 2010.
- Jobbágy, E. G., y Jackson, R. B. (2004). Groundwater use and salinization with grassland afforestation. *Global Change Biology*, 10(8), 1299–1312. <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2004.00806.X>
- Jørgensen, S. E., Kamp-Nielsen, L., Christensen, T., Windolf-Nielsen, J., y Westergaard, B. (1986). Validation of a prognosis based upon a eutrophication model. *Ecological Modelling*, 32(1–3), 165–182. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(86\)90024-4](https://doi.org/10.1016/0304-3800(86)90024-4)
- Justo C. y Sueiro, N. 2013. Suelos predominantes en el Noroeste Bonaerense. En: Mendez, D. y A. Otero (Eds.). *Memoria técnica 2012-2013. Estación Experimental Agropecuaria General Villegas* (pp. 141- 143). Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Kobayashi, K., y Salam, M. U. (2000). Comparing Simulated and Measured Values Using Mean Squared Deviation and its Components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345–352. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2000.922345X>
- Kollet, S. J. (2009). Influence of soil heterogeneity on evapotranspiration under shallow water table conditions: transient, stochastic simulations. *Environmental Research Letters*, 4(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/035007>
- Kruse, E., y Zimmermann, E. D. (n.d.). Hidrogeología de grandes llanuras. Particularidades en la llanura pampeana (Argentina).
- Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Jackson, R. B., y Sznaider, G. A. (2009). Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research*, 113(2), 138-148. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.04.016>
- Raes, D., Geerts, S., Kipkorir, E., Wellens, J., y Sahli, A. (2006). Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agricultural Water Management*, 81(3), 335–357. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2005.04.006>
- Small, I., Basins, D., y Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016P04795>
- Videla Mensegue, H., Degioanni A., y Cisneros J. 2018. Calibración de un modelo para predecir la variación de la profundidad de la napa freática. *Actas del XXVI Congreso Argentino de la Ciencias del Suelo*. San Miguel de Tucumán, Argentina
- Viglizzo, E. F., Frank, F., Bernardos, J., Buschiazzi, D. E., y Cabo, S. (2006). A Rapid Method for Assessing the Environmental Performance of Commercial Farms in the Pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment*, 117(1–3), 109–134. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-7981-y>
- Viglizzo, E. F., Lértora, F., Pordomingo, A. J., Bernardos, J. N., Roberto, Z. E., y Del Valle, H. (2001). Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83(1–2), 65–81. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00155-9)
- Willmott, C. J. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63(11), 1309–1313. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2)
- Zamolinski A., R. Casas, y A. Pittaluga. 1994. Manejo de suelos salinos en el Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. *Publicación Técnica N°15*. EEA INTA General Villegas. Buenos Aires. pp. 28.
- Zárate, M. A. (2003). Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews*, 22(18–19), 1987–2006. [https://doi.org/10.1016/S0277-3791\(03\)00165-3](https://doi.org/10.1016/S0277-3791(03)00165-3)