

Análisis de la tendencia del nivel de napa freática y su relación con las precipitaciones, evapotranspiración potencial y NDVI en Marcos Juárez (Córdoba)

Gustavo Ovando¹, Mónica Bocco¹, Pablo Bollatti², Silvina Sayago¹,
Álvaro Andreucci² y Daniel Collino³

¹ Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba (Argentina).

² Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez (INTA).

³ Instituto de Fisiología y Recursos Genéticos Vegetales. Centro de Investigaciones Agropecuarias (IFRGV-CIAP-INTA)

Resumen. La expansión agrícola que impacta en los cambios del uso del suelo, influye en el nivel freático. El ascenso de la napa está relacionado con aumento de precipitaciones, uso de la tierra y sistemas de producción. El objetivo de este trabajo fue evaluar el cambio de la profundidad de la napa freática en Marcos Juárez (Córdoba) y su relación con precipitaciones, evapotranspiración y NDVI, provenientes de información satelital. La profundidad de la napa presentó momentos de disminución abrupta, llegando a niveles cercanos a la superficie (2015/16), con descensos posteriores. Se detectó, entre 2000-2018, que la napa en los meses de cultivo estival desciende. Los periodos que presentaron tasas negativas de cambio en la profundidad de la napa coincidieron con tasas de cambio de la precipitación y del NDVI positivas con una antelación de dos meses, en cambio donde fue positiva no se observó un comportamiento definido de las otras variables.

Palabras clave: Nivel de napa freática, precipitaciones, MODIS, Marcos Juárez (Córdoba).

1 Introducción

La expansión agrícola, que impacta en los cambios del uso del suelo, y/o del tipo de aprovechamiento de los ecosistemas terrestres, influye sobre el clima, los ciclos del agua, el carbono y el nitrógeno en la biosfera, las emisiones de gases invernadero y en la biodiversidad [1]. Este fenómeno aumenta el drenaje de agua, seguido por ascensos en el nivel freático y una movilización de sales, y cuando éstos están próximos a la superficie, afectan la fertilidad de los suelos. En un relieve extremadamente plano como el de la llanura Chaco-Pampeana (Argentina), los cambios en el uso de la tierra pueden afectar el transporte vertical y horizontal del agua subterránea y sales [2].

La profundidad del nivel freático (PNF), que es la distancia entre la superficie del suelo y el plano que limita las zonas de aireación y de saturación del suelo, influye en varias características del suelo, como la temperatura, aireación, disponibilidad de nutrientes, flotabilidad y transitabilidad de la maquinaria agrícola, disponibilidad de agua, susceptibilidad del acuífero a la contaminación, y espesor de la zona radical [3].

La presencia de napas demasiado cercanas a la superficie trae aparejada procesos de anoxia (con pérdida de plantas o reducción de rendimientos), que sumados a los problemas físicos de suelo (la falta de piso para sembrar, realizar labores intermedias y/o cosechar) y al ascenso de sales por capilaridad, provocan importantes pérdidas económicas en los sistemas productivos [4], [5].

Un desafío clave para los investigadores es identificar estrategias para manejar de manera sustentable, los recursos de agua subterránea y minimizar los impactos negativos de los cambios en el almacenamiento del acuífero en la productividad agrícola a largo plazo [6]. La falta de datos detallados de la profundidad del nivel freático es un problema para los científicos en manejo de recursos hídricos en nuestra región. Las técnicas de teledetección pueden jugar un rol importante en obtener información dinámica de la PNF a nivel de una cuenca.

El ascenso de la napa de las últimas dos décadas, principalmente en la Región Pampeana, está relacionado con el aumento de las precipitaciones, cambios en el uso de la tierra y sistemas de producción [7]. En tal sentido en [8] se emplearon análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre cambios en el nivel de la napa freática con precipitaciones y evapotranspiración en escalas intra e interanual.

Con el avance en la tecnología espacial, es posible emplear técnicas de teledetección para estimar rápidamente el agua superficial y sub-superficial en grandes áreas y en lugares inaccesibles. El empleo de técnicas convencionales (geofísica, estadísticas y geo-estadística, modelado numérico, entre otras) para el estudio de napas, está frecuentemente limitado por la falta de datos adecuados [9], y por otra parte para predecir PNF con suficiente precisión, en la construcción y calibración de modelos se necesita un importante tiempo [3].

Los datos de NDVI de series de tiempo largas pueden proveer información referente a cambios en la distribución espacial de zonas bioclimáticas indicando cambios en el uso de la tierra o en patrones de circulación en gran escala [10], [11]. En tal sentido, en [12] se emplearon series temporales de NDVI de NOAA-AVHRR para entender la variabilidad fenológica en respuesta a la variabilidad climática en la provincia de Mendoza, Argentina y obtener mapas bioclimáticos.

El objetivo de este trabajo fue evaluar las tendencias en el cambio de la profundidad de la napa freática en Marcos Juárez (Córdoba) y su relación con las precipitaciones, evapotranspiración potencial y NDVI provenientes de la información satelital.

2 Materiales y Métodos

2.1 Región de estudio

La localidad de Marcos Juárez se encuentra dentro de la cuenca del río Carcarañá (Fig.1). Esta cuenca tiene su mayor cota en la provincia de Córdoba en el límite con la provincia de San Luis y una cota mínima en la desembocadura en el río Coronda. La cuenca, que tiene un área estimada de 57.600 km² aproximadamente, presenta un régimen térmico templado con una isoterma media anual de 16,5°C. Las isohietas en el área de estudio disminuyen de E a O, entre 1000 a 700 mm aproximadamente [13]. Esta región presenta un régimen de precipitación monzónico, dado que las lluvias se concentran en el semestre cálido (de octubre a marzo) y la estacionalidad es creciente hacia el oeste [14].

La cuenca del río Carcarañá incluye dos regiones fitogeográficas, la de pastizales y bosques serranos al oeste, y la de espinales y algarrobales pampeanos en el resto de la cuenca. Los suelos son resultado de la sedimentación continua cuyos sedimentos superficiales son continentales y de procesamiento eólico, son muy ricos para la actividad agropecuaria. Por ello, los bosques que existían en la zona han desaparecido casi completamente y una importante superficie está ocupada con la producción de cereales y oleaginosas, principalmente maíz (*Zea mays* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), sorgo (*Sorghum spp.*) y soja (*Glycine max* (L.) Merr.) [15], [16].

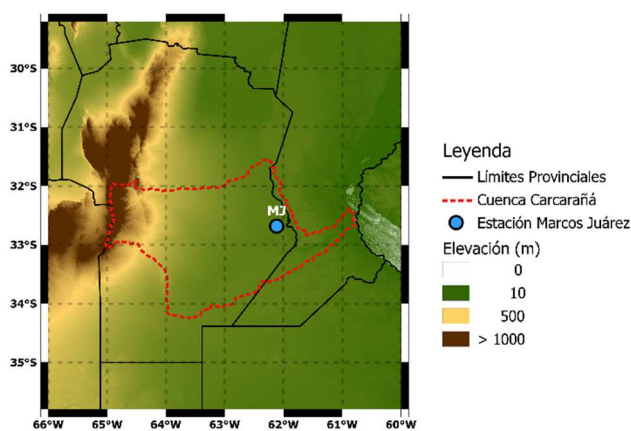


Fig. 1. Estación Marcos Juárez dentro de la cuenca considerada en este estudio.

2.2 Información Meteorológica

Se utilizaron en este trabajo datos de profundidad de la napa freática diaria, obtenida de un freatómetro instalado en el año 1970; éste consta de una perforación en el suelo de 60mm de diámetro por 14 metros de profundidad y en su interior se aloja un tubo con ranuras de sierra cada 30cm para lograr el intercambio de agua libre con el suelo.

La precipitación diaria proviene de un pluviómetro que, al igual que el freatómetro, se encuentra ubicado en de la estación agrometeorológica del INTA Marcos Juárez (32°43'11"S 62°06'25"O). Todos estos datos estuvieron comprendidos en el período 01/ene/2001 a 31/dic/2018.

Para realizar el análisis de las tendencias se calcularon a partir de los datos diarios, los valores mensuales acumulados para precipitación y promedios mensuales para la profundidad de la napa.

2.3 Productos MODIS

En este estudio se empleó el producto derivado del sensor MODIS denominado MOD13A1 (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/modis>). Este producto incluye el índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI) con una resolución espacial de 500 m, calculado integrando información de 16 días, a partir de reflectancias de superficie bidireccionales, corregidas atmosféricamente que se han enmascarado para evitar agua, nubes, aerosoles y sombras de nubes. La información de NDVI cada 16 días fue primeramente suavizada para obtener valores diarios con el software TIMESAT v 3.3 [11]. Este método se basa en el ajuste de mínimos cuadrados de una función de modelo Gaussiano para series de tiempo. Posteriormente se interpolaron los valores cada 16 días para obtener valores diarios que fueron promediados a los efectos de conseguir valores mensuales de NDVI, utilizando SRS1 Cubic Spline for Excel (<http://www.srs1software.com/SRS1CubicSplineForExcel.aspx>).

Los datos de evapotranspiración fueron obtenidos del producto MOD16A2.006: Terra Net Evapotranspiration 8-Day Global 500m (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/modis>). Este producto se encuentra disponible en forma gratuita para el período 2000-2019, e incluye evapotranspiración real (ETR) y potencial (ETP) calculado integrando información de 8 días y una resolución espacial de 500 m. El algoritmo utilizado para calcular la ETP fue propuesto por [17] y la calcula utilizando datos meteorológicos globales (temperatura diaria del aire, humedad relativa, radiación neta, velocidad del viento), el índice de área foliar, la fracción de la cobertura vegetal, el albedo y el tipo de cobertura terrestre. Al igual que para NDVI estos valores fueron interpolados para obtener valores diarios que se acumularon para conseguir un valor mensual.

Los valores de NDVI y ETP para el período 2001-2018 fueron extraídos del píxel que correspondiente a las coordenadas geográficas de la estación.

2.4 Análisis estadístico

Para analizar las tendencias de las variables consideradas, como propuso [18], se aplicó un modelo lineal para calcular la tasa de cambio semestral (variación de la napa en 6 meses con respecto al tiempo), y su correspondiente coeficiente de determinación R^2 (para evaluar la linealidad de la relación). Este modelo se repitió interactivamente considerando cada mes del período 2001-2018 como comienzo del semestre.

3 Resultados y discusión

A fin de evaluar el comportamiento de la profundidad de la napa y las restantes variables involucradas en este estudio se presentan en las Fig. 2 a Fig. 5 los gráficos que muestran la evolución de las mismas para todo el período en estudio.

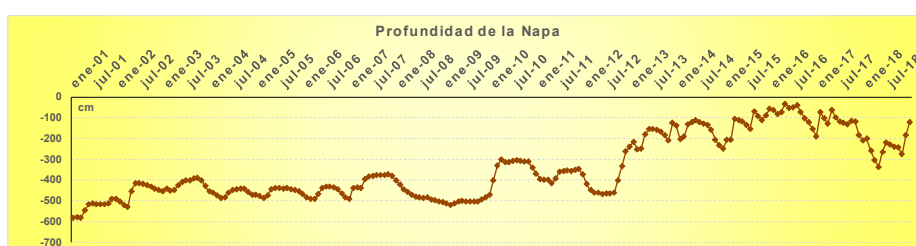


Fig. 2. Evolución de la profundidad de la Napa freática en Marcos Juárez desde 2001 a 2018.

En cuanto a la profundidad de la napa se observan dos momentos de disminución abrupta de la profundidad de la napa freática, desde julio 2009 a enero 2010 y desde julio 2012 a enero 2013 (Fig. 2). Ambos periodos coinciden con una baja ocupación del suelo por cultivos (como consecuencia de las retenciones, se redujo la superficie sembrada con trigo en la zona) y el incremento de las precipitaciones al principio de la primavera (Fig. 3), cuando los cultivos estivales tienen una tasa de consumo de agua muy baja, en la que predomina la evaporación libre del suelo por sobre la transpiración de los vegetales.

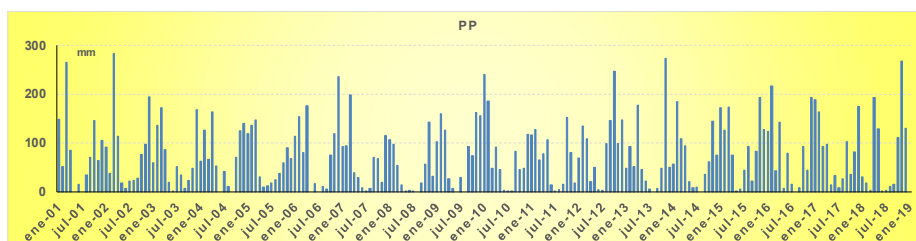


Fig. 3. Precipitaciones mensuales en Marcos Juárez desde 2001 a 2018.

Durante finales de 2015 y 2016 la profundidad freática llegó a niveles cercanos a la superficie (Fig. 1) debido al fenómeno del “Niño extremo” [19] que dejó un acumulado de más de 1.100 mm de lluvia anual, anegando zonas más del 30% del área de la región, durante la campaña estival. Este exceso de agua ocurrido durante 2015, se mantuvo durante 2016. Luego en la campaña 2017-2018, se generó un periodo de escasez de precipitaciones que se extendió durante el periodo crítico del cultivo de soja (enero de 2018 hasta fin de ciclo). Es importante a nivel agrícola destacar que tanto el cultivo de soja como el de maíz no sufrieron stress hídrico de sequía, debido a que tenían al alcance de sus raíces agua freática en cantidad y calidad que les permitió finalizar su ciclo

con excelentes rendimientos. En este período fue notable que las malezas que presentaban raíces poco profundas (< 20 cm) no lograron acceder al agua freática y se secaron. Lo mismo pasaba con la germinación de nuevas plántulas ya que los primeros 20 cm de suelo se encontraban con un bajo contenido de humedad.

Si para obtener las precipitaciones anuales consideramos año hidrológico al periodo comprendido entre julio y junio del año siguiente (año calendario), el valor de precipitación medio anual para el período comprendido es 886 mm. Al analizar las anomalías respecto de este valor medio, se destacan dos períodos 2007/08 a 2008/09 donde las precipitaciones estuvieron 323 y 210 mm por debajo lo cual se vio reflejado en el comportamiento de la profundidad de la napa. Esta situación también se repitió en 2011/12 (-224 mm). Por el contrario, en tres periodos se acumularon en el año hidrológico precipitaciones que sobrepasaron en aproximadamente 300mm el valor medio: en 2009/10, 2012/13 y 2015/16 cuyos efectos sobre la profundidad de la napa fueron ya descriptos.

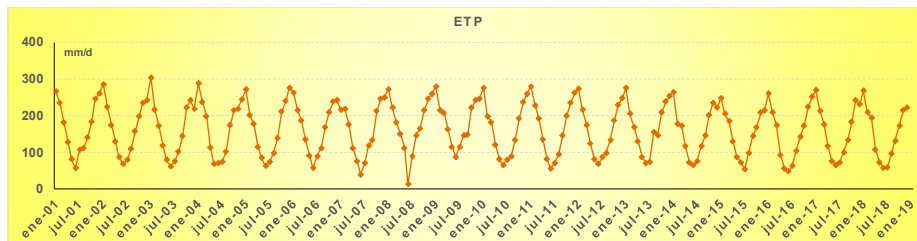


Fig. 4. Evapotranspiración acumulada mensual en Marcos Juárez desde 2001 a 2018.

La evolución de la ETP (Fig. 4) muestra un comportamiento cíclico a lo largo del tiempo, sin marcadas diferencias, observándose valores máximos y mínimos decrecientes en los últimos años. Por lo cual, en este primer análisis, esta variable no resulta explicativa de la variación de la profundidad de la napa.

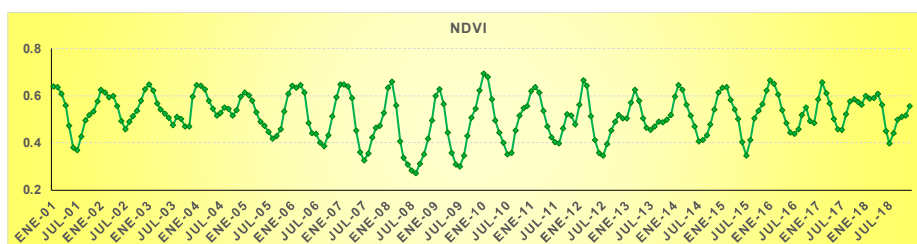


Fig. 5. Evolución del índice NDVI en Marcos Juárez desde 2001 a 2018

El NDVI presentó valores entre 0,4 y 0,7 para la mayoría de los años, presentando los valores máximos en verano. Entre 2007 y 2009 donde en invierno registró los valores más bajos del período analizado (0,3) coincidentes con los períodos en donde hubo anomalía negativa de precipitación.

En la Fig. 5. se distingue claramente una sucesión conformada únicamente por cultivos de verano entre julio de 2005 y julio de 2011. Como expresan [20] en el departamento Marcos Juárez se ha generado un cambio de uso del suelo en el cual los cultivos perennes han perdido participación siendo reemplazado por los cultivos agrícolas con escasa participación de dobles cultivos anuales, pasando los cultivos perennes de ocupar el 28 % en el año 2000 a sólo el 10 % en el 2015.

El comportamiento de la variación de la profundidad de la napa freática, precipitaciones y NDVI en el período en estudio, así como el coeficiente de determinación para cada semestre que comienza en el mes indicado, puede observarse en las Fig. 6, 7 y 8, respectivamente; en estas figuras la línea horizontal roja divide tasas positivas y negativas. Podemos notar que se presentan cuatro momentos de cambios extremos (señalados con flechas):

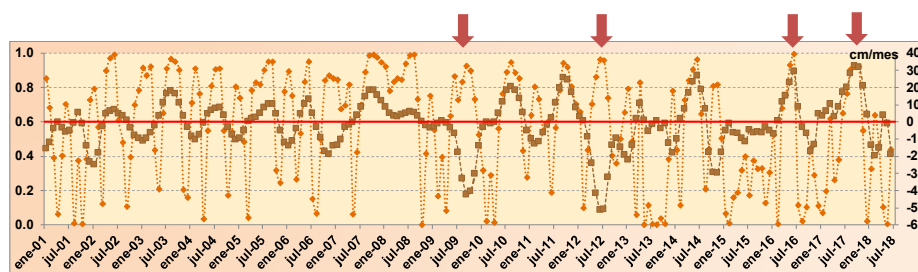


Fig. 6. Tasa de cambio mensual de la Napa (■, en cm/mes) y valores del estadístico de ajuste R^2 (♦) para Marcos Juárez desde 2001 a 2018 ¹.

- A. En el semestre que comienza en octubre de 2009 la tasa de disminución de la profundidad de la napa freática fue de $-42,5$ cm/mes con un R^2 de $0,93$. Si bien este mes presenta la mayor disminución de la napa, desde septiembre a diciembre se presentaron valores de tasa inferiores a -30 cm/mes. Este comportamiento puede explicarse por valores positivos elevados de la tasa de precipitación entre julio y agosto de 2009 (entre 31 y 42 mm/mes) validados con altos coeficientes de determinación ($0,80$ y $0,89$, respectivamente). Para ese mismo período, el NDVI también presentó altas tasas positivas de cambio desde $0,06$ a $0,07$ /mes y valores de R^2 de $0,99$.
- B. La mayor tasa de disminución en la profundidad de la napa freática, para todo el periodo analizado, se dio en los semestres que comienzan en julio y agosto de 2012 con valores próximos a $-51,5$ cm/mes y $R^2 = 0,96$. Con una anticipación de dos meses, las precipitaciones presentaron valores positivos elevados de la tasa de cambio (entre 36 y 43 mm/mes) con coeficientes de determinación de $0,73$ y $0,53$, respectivamente. En junio y julio del mismo año, el NDVI también presentó tasas positivas, en promedio $0,04$ /mes, con valores de R^2 de $0,91$.

¹ Los valores de la tasa de variación de la profundidad de la napa y los de R^2 son valores discretos, la línea punteada que los une se trazó a fin de mostrar los cambios de los mismos.

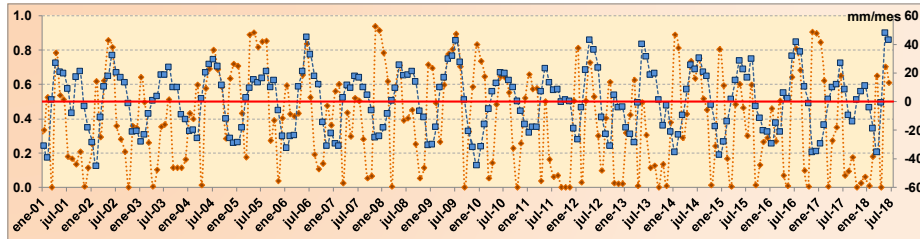


Fig. 7. Tasa de cambio mensual de las precipitaciones (■, en mm/mes) y valores del estadístico de ajuste R^2 (◆) para Marcos Juárez desde 2001 a 2018.

- C. Una alta tasa positiva que indica un aumento en la profundidad de la napa se observó en el semestre que comienza en julio de 2016, la misma alcanzó 29,2 cm/mes con un R^2 de 0,99. De enero a marzo de este año la precipitación presentó en cambio, tasas de variación negativa (entre -15 y -30 mm/mes) pero con coeficientes de determinación que no superaron 0,50. El NDVI en este mismo período también acusó tasas de variación negativas entre -0,03 y -0,05/mes, con R^2 entre 0,77 y 0,98.
- D. En los semestres que comienzan en octubre y noviembre de 2017 se presentaron tasas positivas de cambio en la profundidad de la napa freática (alrededor de 32 cm/mes), refrendadas con un coeficiente de determinación alto ($R^2 = 0,92$). Si bien estos meses presentan el mayor cambio en el comportamiento de la napa, las restantes variables relacionadas con ésta no muestran valores disruptivos, a excepción del NDVI que tiene una tasa de cambio nula.

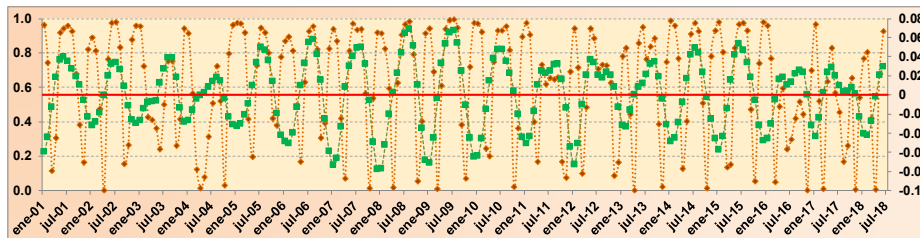


Fig. 8. Tasa de cambio de NDVI (■) y valores del estadístico de ajuste R^2 (◆) para Marcos Juárez desde 2001 a 2018.

Conclusiones

La profundidad de la napa freática en Marcos Juárez (Córdoba) presentó momentos de disminución abrupta, llegando en el periodo 2015/16 a niveles cercanos a la superficie, influenciado en parte por el fenómeno del “Niño extremo”, con descensos posteriores que no llegaron a los valores de profundidad registrada en el año 2000.

Se observó que la napa tiene un descenso (1-2 m) coincidente con la presencia de cultivos estivales, posiblemente influenciada por la evapotranspiración del cultivo concentrada en ese periodo. Con las lluvias de marzo-abril, en la etapa de senescencia del cultivo, la profundidad disminuye. Esto explica que el efecto de ocupación del suelo con cultivos activos durante la mayor parte del año permitiría mantener los niveles freáticos más alejados de la superficie.

Los dos periodos que presentaron tasas negativas de cambio en la profundidad de la napa con valores de coeficientes de determinación altos, coincidieron con tasas de cambio de la precipitación y del NDVI positivas con una antelación de dos meses. En cambio, en los periodos donde la tasa de variación de la profundidad de la napa fue positiva no se observó un comportamiento definido de las otras variables, refrendado por valores de R^2 elevados.

Agradecimientos

A los científicos de la misión MODIS y el personal asociado de NASA por la producción de los datos usados en esta investigación.

Referencias

1. Paruelo, J., Guerschman, J. y Verón, S. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia hoy* 15(87), 14–23. (2005).
2. Jobbagy, E., Noretto, M., Santoni, C. y Baldi, G. El desafío ecohidrológico de las transiciones entre sistemas leñosos y herbáceos en la llanura Chaco-Pampeana. *Ecología Austral* 18:305–322. (2008).
3. Omran, E. A stochastic simulation model to early predict susceptible areas to water table level fluctuations in North Sinai, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 19(2), 235–257. (2016).
4. Pardos, J. Respuestas de las plantas al anegamiento del suelo. *Forest Systems* 13(4), 101–107. (2004).
5. Noretto, M., Jobbagy, E., Jackson, R. y Sznaider. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Res.* 113, 138–148. (2009).
6. Foster, T., Brozović, N. and Butler, A. Analysis of the impacts of well yield and groundwater depth on irrigated agriculture. *Journal of Hydrology* 523, 86–96. (2015).
7. Giorgis, A., Brieva, C. y Damiano, F. Relevamiento de la red freática e hidrometeorológica en cuencas hidrográficas. En: XXVI Congreso Nacional del Agua. (2017).

8. Merciau, J., Nosetto, M., Bert, F., Giménez, R. and Jobbágy, E. Shallow groundwater dynamics in the Pampas: Climate, landscape and crop choice effects. *Agricultural Water Management* 163, 159–168. (2016).
9. Elbeih, S. An overview of integrated remote sensing and GIS for groundwater mapping in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal* 6(1), 1–15. (2015).
10. Jönsson, P. and Eklundh, L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(8), 1824–1832. (2002).
11. Jönsson, P. and Eklundh, L. TIMESAT—a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences* 30(8), 833–845. (2004).
12. González Loyarte, M., Menenti, M. and Diblasi, A. Modelling bioclimate by means of Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI time series in Western Argentina. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society* 28(9), 1175–1188. (2008).
13. Stenta, H., Riccardi, G., Basile, P. y Trivisonno, F. Implementación de un modelo matemático distribuido de escurrimiento superficial en la cuenca del río Tercero-Carcaraña. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* 33, 33–41. (2014).
14. Pérez, S., Sierra, E., Momo, F. and Massobrio, M. Changes in average annual precipitation in Argentina's Pampa region and their possible causes. *Climate* 3(1) 150–167. (2015).
15. Daniele, C. y Natenzon, C. Las regiones naturales de la Argentina: caracterización y diagnóstico. Buenos Aires: Administración de Parques Nacionales, El Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de la Argentina. (1994).
16. Ferreras, L., Toresani, S., Faggioli, V. and Galarza, C. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina. *Spanish Journal of Soil Science* 5(3), 220–235. (2015).
17. Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. *Remote Sensing of Environment* 115(8), 1781–1800. (2011).
18. Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Keefer, T. O., Nichols, M. H., Stone, J. J., Levick, L. R., & Scott, R. L. Event to multidecadal persistence in rainfall and runoff in southeast Arizona. *Water Resources Research* 44(5), 1-17. (2008).
19. Santoso, A., Mcphaden, M. J. and Cai, W. The defining characteristics of ENSO extremes and the strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079-1129. (2017).
20. Bollatti, P., Andreucci, A. y Escolá, F. Influencia de los excedentes hídricos en la recarga de los acuíferos libres del sudeste de la provincia de Córdoba. INTA EEA Marcos Juárez (2016) https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_mj_recarga_acuíferos_sudeste_enero_2016.pdf