

EFECTOS HIDROLÓGICOS DE LA ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS EN UNA CUENCA MEDITERRÁNEA

V. García-Gamero^{1*}, A. Peña², A.M. Laguna³, J.V. Giráldez^{1,4}, T. Vanwalleghem¹

¹Depto. de Agronomía, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: g02gagav@uco.es
²Depto. de Ingeniería Rural, Construcciones civiles y Proyectos de Ingeniería, Universidad de Córdoba, Edif. Da Vinci, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: ir1peala@uco.es
³Depto. de Física Aplicada, Radiología y Medicina Física, Universidad de Córdoba, Edif. C2, Ctra. Madrid km 396, 14071 Córdoba. e-mail: fallalua@uco.es
⁴Depto. de Agronomía, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004 Córdoba. e-mail: ag1gicej@uco.es

RESUMEN. La orientación o el aspecto de una ladera influye apreciablemente sobre su comportamiento hidrológico, como se ha observado en bastantes artículos. En esta comunicación se muestran algunas diferencias entre las etapas iniciales de recarga y descarga de perfiles de suelos situados en sendas laderas una orientada hacia el sur, o Ecuador desde la perspectiva global, y otras hacia el norte, o los polos, en una cuenca granítica de la Sierra Morena, cerca de Cardeña, en la provincia de Córdoba. Los perfiles de la ladera orientada hacia el sur se saturan más rápidamente por su menor profundidad, detectándose un flujo subsuperficial descendente. Sin embargo, en la ladera orientada hacia el norte la recarga es más lenta por la mayor profundidad y por la percolación hacia el acuífero freático subyacente. La descarga se efectúa de forma similar en ambas laderas, al menos durante las primeras etapas en las que la absorción por las raíces de la vegetación es menos evidente.

ABSTRACT. The aspect or exposure of a hillslope exerts an appreciable influence on its hydrological processes, as it has been reported in several works. The purpose of this communication is to illustrate the aspect effects on the early stages of recharge and discharge processes on soils located in two convergent slopes, one oriented towards the south, or toward the Equator in global terms, and another one oriented towards the north, or toward the Poles, of a granitic watershed of the Sierra Morena, close to the village of Cardeña, in the province of Córdoba. The soil profiles of the south-facing slope are saturated faster than their analog ones of the north-facing slope with the occurrence of some subsurface water flow due to the shallower depth of the former with respect to the latter. The percolation flow towards the underlying phreatic aquifer attenuates the profile saturation rate in the soils of the north-facing slope. The discharge processes evolve at a similar rate in the soils of the two hillslopes, at least in the early stages while the root water uptake by the vegetation is not too relevant.

1.- Introducción

En las cuencas de montaña en las que la topografía separa laderas con diferente orientación con respecto a la

incidencia de la radiación solar, las conocidas zonas de solana y umbría, la insolación recibida induce cambios en los procesos hidrológicos que, a su vez, generan distintos ecosistemas en ellas. La literatura hidrológica contiene numerosos ejemplos como los de Richardson et al. (2020) en California o Gutiérrez-Jurado et al. (2013) en Nuevo México, ambas con marcadas diferencias entre ambos aspectos. En una completa revisión Pelletier et al. (2018) recomendaron la separación entre las condiciones limitantes del agua y la temperatura sobre el suelo desarrollado en las diferentes laderas, sugiriendo la denominación de laderas orientadas hacia el Ecuador o hacia los Polos correspondientes respectivamente a las solanas o umbrías, como es el caso que expone McMillan y Srinivasan (2015).

En la zona crítica de Cardeña en la Sierra Morena cordobesa en la que las peculiares condiciones de precipitación y temperatura favorecen los procesos formadores de suelo (Román-Sánchez et al., 2018) se han observado algunas diferencias entre la vegetación y las características edáficas. En este trabajo se exploran estas diferencias relacionándolas con la evolución de la humedad del suelo y de la biomasa. García-Gamero et al. (2021) han detectado distintos efectos en la evolución de la humedad del suelo, la vegetación natural que éste soporta, y en la recarga de la capa freática que delimita un acuífero que ocupa las fracturas de las rocas graníticas de la zona, que parece limitado a la ladera orientada al norte.

En la investigación que se mantiene en esta zona crítica se continúa recogiendo información que permite explorar con mayor detalle el comportamiento del suelo. En este informe se recoge la evolución de los perfiles de humedad del suelo en respuesta a los pulsos de lluvia y al conjunto de la radiación solar y gradientes verticales de la presión de vapor en la baja atmósfera tras un periodo de chubascos.

2.- Material y métodos

La finca Santa Clotilde ha sido ampliamente descrita en otros trabajos (e.g. García Gamero et al. 2021) por lo que aquí se describen tan solo los pluviómetros que se instalaron y los métodos de análisis de los perfiles.

Una red de sensores de capacitancia, CS655 (Campbell Scientific), que empezó a registrar el 24.11.2016, mide la humedad, la conductividad eléctrica, y la temperatura del suelo con una cadencia de 30 minutos.

La Fig. 1 muestra los siete puntos en donde están instalados los sensores, a lo largo de dos laderas con orientación opuesta, Norte-Sur, SC-10 a SC-4, a 5 profundidades diferentes (0.05, 0.15, 0.25, 0.35, y 0.45 m).



Fig. 1. Localización de la zona de estudio.

Los pluviómetros se instalaron en cinco (SC-10, SC-8, SC-7, SC-6 y SC-4) de los siete puntos de medida, considerando las distintas posiciones a lo largo de la ladera.

Estos miden la cantidad de lluvia caída con un balancín de vaciado automático con un área de recolección de 200 cm², una resolución de 0.2 mm y una precisión de ± 4%. Los pulsos de lluvia se recogen en un registrador automático de datos, *datalogger*

Unos paneles solares con una potencia máxima de 15 W a 12 V suministran la energía necesaria para el mantenimiento y el registro de los datos.

Se han seleccionado dos periodos de medidas para mostrar los procesos de recarga y descarga de los perfiles de suelos. Un periodo de recarga muy adecuado es el periodo comprendido entre el 27 de febrero y el 20 de marzo de 2018, en el que se truncó una prolongada sequía otoñal, dando lugar a una primavera bastante húmeda en toda la Sierra Morena. Otro periodo iniciado el 25 de abril de 2018 permite explorar la respuesta del suelo a una evaporación incipiente.

3.- Resultados y Discusión

Los registros de los 5 pluviómetros instalados en la sección transversal del valle no presentan diferencias apreciables, causadas por la orografía, efecto föhn, como se aprecia en la comparación de las precipitaciones diarias de la Fig. 2. En esta figura se pueden observar los días en los que no se pudo medir la lluvia caída, y las reducciones causadas por el bloqueo de la recepción por los restos de vegetación.

Esto permite usar la información adquirida en el pluviómetro instalado en la proximidad del punto SC10, puesto que algunos datos de los otros pluviómetros no se han podido recoger, y algunas otras dificultades como el bloqueo de la entrada de los pluviómetros situados en las cotas más bajas por hojas caídas desde los árboles circundantes.

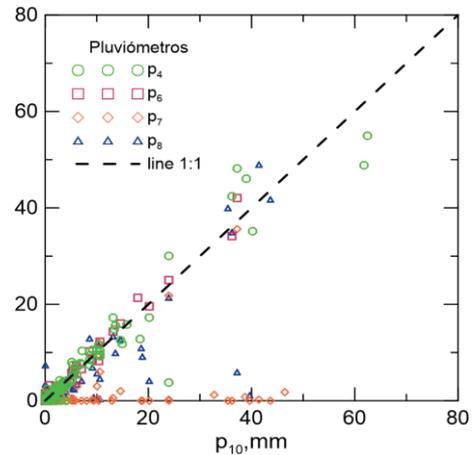


Fig. 2. Comparación de la precipitación diaria registrada en los pluviómetros.

Los hietogramas observados durante el periodo de recarga en algunos días de febrero y marzo de 2018, expuestos en la Fig. 3, parecen seguir una pauta similar con algunas rachas de gran intensidad, en algunos casos de hasta 80 mm h⁻¹, con una duración breve precedidos y seguidos por pulsos de menor intensidad, lo que da lugar a un humedecimiento progresivo del suelo.

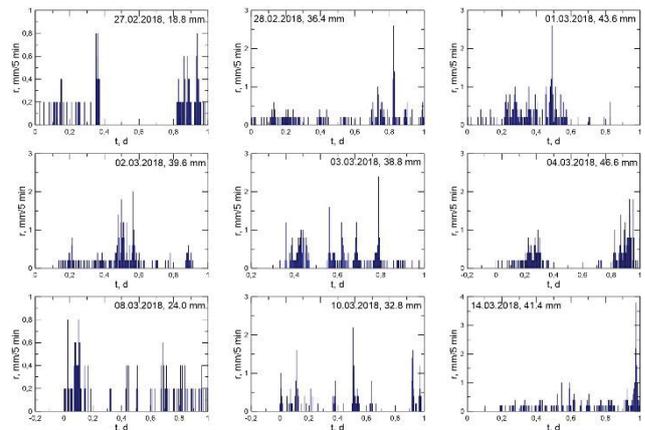


Fig. 3. Hietogramas registrados en el pluviómetro SC10 en febrero y marzo de 2018.

En la Fig. 4 se puede ver el rápido incremento de la humedad en todos los perfiles de la sección transversal, hasta alcanzar casi su saturación, en este caso en el punto SC10. En el perfil SC05 (no mostrado) se advierte un aumento casi repentino de la humedad del fondo entre el mediodía y la medianoche del día 1 de marzo, que pudiera atribuirse a un flujo subsuperficial, por su posición a media ladera en una zona con suelos someros bajo los que subyacen las rocas graníticas no descompuestas. Un efecto similar puede ocurrir en el perfil SC07 (no mostrado), aunque en este caso se trata del fondo del valle en el interviene el flujo subterráneo del Arroyo Martín Gonzalo.

El aumento de la humedad del fondo del perfil muestreado, 0.45 m, se inicia al mediodía del 27 de febrero a poco de comenzar la lluvia, con otro gran incremento tras la medianoche del día 1 de marzo.

En los perfiles de la ladera orientada al sur, el desarrollo del suelo es limitado por lo que no fue posible instalar sensores en las profundidades señaladas. El perfil SC4 apenas llega a los 0.3 m y el del SC5 a 0.40, Por el contrario, en la ladera orientada al norte, se alcanzaron profundidades superiores a 1 m, perfiles SC8, SC9 y SC10.

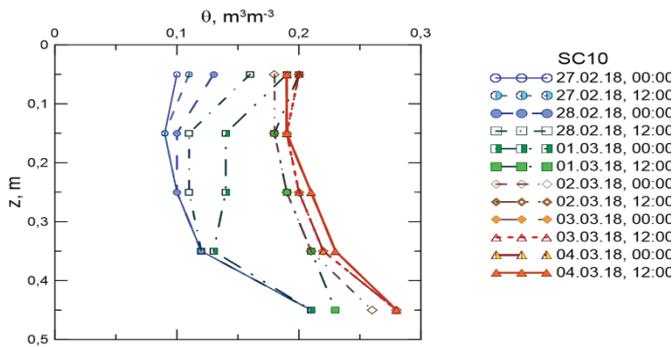


Fig. 4. Evolución de los perfiles de humedad observados en el punto SC10 durante periodo lluvioso de fin de febrero y principios de marzo de 2018.

A partir de las curvas anteriores se puede estimar la cantidad de agua presente y la que se infiltra en el perfil del suelo (Fig. 5). En este periodo no se recogieron datos para los puntos SC8 y SC6 por un fallo en la transmisión de los sensores. Adviértase que los sucesivos pulsos de lluvia no incrementan el volumen de agua retenido en el perfil lo que pudiera deberse en parte a una infiltración reducida por estar el suelo saturado, caso de los perfiles SC4 y SC5 o una transmisión rápida del agua por percolación en el fondo hacia el acuífero subyacente caso de los perfiles SC8, SC9 y SC10. El volumen de agua del perfil SC4, o más adecuadamente, calado al expresarlo por unidad de superficie, es inferior a los de los otros suelos por su menor profundidad.

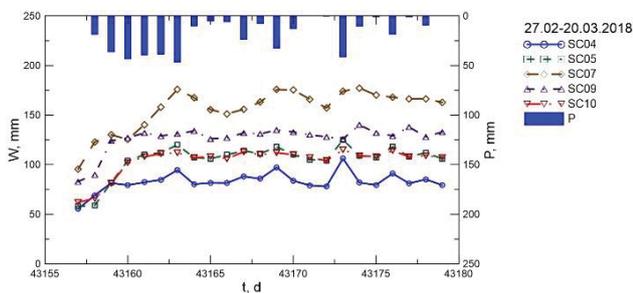


Fig. 5. Evolución de la humedad del suelo observada en los puntos SC4-SC10 durante periodo lluvioso de fin de febrero y principios de marzo de 2018.

En la Fig. 6 se puede ver la evolución de los perfiles de humedad, expresada como grado de saturación, *s*, para mostrar mejor el continuo relleno de los poros del suelo.

Destaca también la rápida descarga de los suelos cuando se reduce la precipitación diaria, en especial en el suelo SC7, que pudiera atribuirse a una redistribución horizontal muy rápida por la porosidad del medio, que forma parte del subálveo del Arroyo Martín Gonzalo. En esta época del año, con una temperatura del aire no muy alta, y en una zona tan elevada, la influencia de la evaporación es escasa. En algunos perfiles pudiera haber bloqueos parciales de algunos poros, similar a lo que se ha denominado modelo de balancín, tipping-bucket, (Emerman, 1995) que permiten el paso del agua de forma discreta.

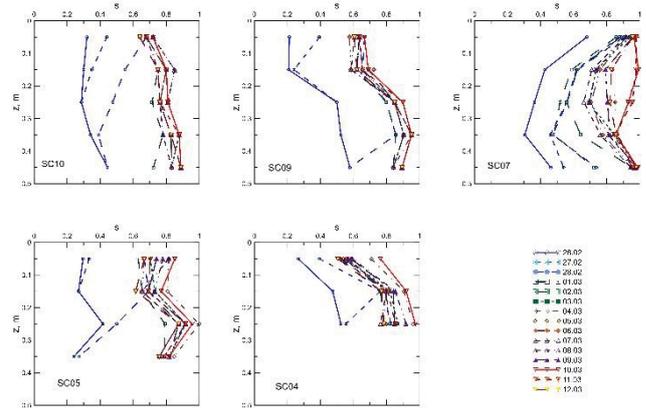


Fig. 6. Evolución de los perfiles de grado de saturación, *s*, observados en los distintos puntos de medida durante el periodo lluvioso de fin de febrero y principios de marzo de 2018.

En la Fig. 7 se expone la paulatina descarga del suelo tras una racha de chubascos en una época más templada. En este caso le evaporación procede uniformemente como consecuencia de la granulometría del suelo con grandes poros, y fisuras bien conectados entre sí, que facilitan el flujo del agua hacia la superficie en respuesta al gradiente del potencial. También se observan algunos cambios en la intensidad de la evaporación debida a oscilaciones térmicas en el exterior por el espaciamiento de los sucesivos perfiles entre sí.

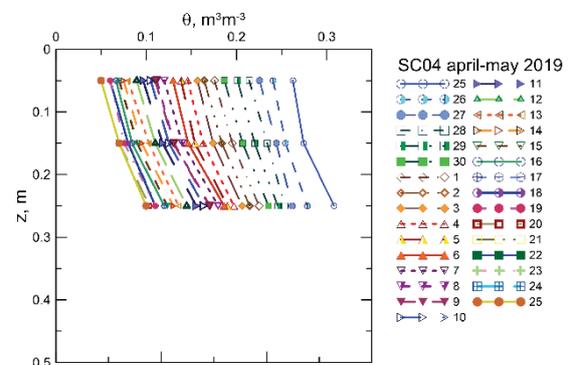


Fig. 7. Evolución de los perfiles de humedad observados en el punto SC4 durante periodo sin lluvia del 25 abril al 25 de mayo de 2019.

Integrando la humedad del perfil, y comparando la de los sucesivos días, es posible estimar la pérdida de humedad, atribuible en estas condiciones a la evaporación, en sentido lato, incluyendo por tanto a la evapotranspiración. En la Fig. 8 se representan los datos estimados de la intensidad de la evaporación diaria en el punto SC4 durante el periodo sin lluvias que se extiende desde el 25 de abril al 25 de mayo. Con el fin de comparar estas estimaciones con la intensidad de la evaporación potencial o de referencia, se han insertado también en la figura, los valores calculados de la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de los datos meteorológicos medidos en una estación cercana a la zona de estudio, Adamuz, de la Red de información agroclimática de Andalucía (RIA 2021), usando el método de la FAO (Allen et al. 1988).

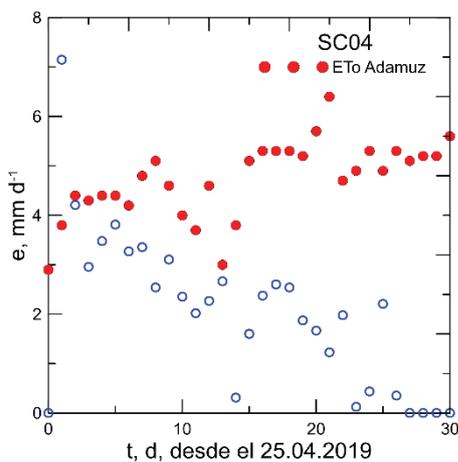


Fig. 8. Evolución evaporación diaria en el punto SC4 durante periodo sin lluvia 25 abril a 25 de mayo de 2019. La evaporación de referencia calculada a partir de los datos meteorológicos medidos en la estación cercana de la RIA de Adamuz aparece como círculos rojos.

Los valores estimados de la intensidad de evaporación son sensiblemente similares a los calculados en la estación de Adamuz durante los primeros días hasta el octavo día en el que empiezan a descender en lo que se podría estimar como el comienzo de la segunda etapa de la evaporación (Or et al. 2013). La tendencia decreciente de la intensidad de la evaporación, e , parece seguir la ecuación exponencial de Brutsaert (2014), con los parámetros de la intensidad inicial, tiempo θ , e_0 , y el tiempo de normalización, κ :

$$e = 4.276 \cdot e^{-0.04176 \cdot t} \quad (1)$$

con un coeficiente de determinación $R^2=0.6238$ para el conjunto de 22 pares de datos. La intensidad de referencia 4.28 mm d^{-1} coincide con los datos de Adamuz y el tiempo normalizado, la inversa del coeficiente que hay en el exponente, 23.9 días está próximo al tiempo en el que puede finalizar la segunda etapa de la evaporación, como se aprecia en la Fig. 8.

La Fig. 9 muestra la descarga de los suelos en el periodo

de la Fig. 7, pero con los datos normalizados, grado de saturación, s . Es posible que el control del horizonte superficial, tan común en otros suelos como señalan algunos autores como Kim y Lakshmi (2019) o Li et al. (2020) no sea tan importante en estos suelos, ya que no se aprecia diferencias en los perfiles de humedecimiento, Fig. 4 y 6, y desecación, Fig. 7 y 9. También se estima que la memoria de estos suelos, el tiempo que tarda en disiparse cualquier anomalía, positiva o negativa (McColl et al. 2017) no es muy elevado. Por otra parte, no hay una gran variabilidad espacial en los suelos, por lo que, según el criterio de Peterson et al. (2019) se trata del tipo de participación media, con una variación reducida.

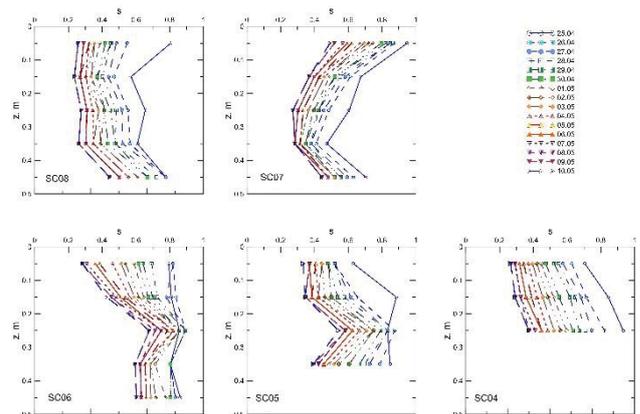


Fig. 9. Evolución de los perfiles de grado de saturación, s , observados en los distintos puntos de medida durante el periodo sin lluvia de 25 de abril a 10 de mayo de 2019.

4.- Conclusiones

La influencia de la orientación de una ladera sobre los procesos hidrológicos que en ella transcurren da lugar a modificaciones importantes, no sólo en el suelo sino en la vegetación que se desarrolla en ellos, en su formación y en la circulación subterránea.

La circulación del agua en estos suelos es muy rápida tanto en la infiltración como en la evaporación. No parece que el horizonte superior pueda ejercer un gran control del ciclo del agua, aunque la vegetación pueda intervenir también sombreando la superficie, homogeneizando la extracción y contribuyendo a la formación de poros de menor tamaño.

Agradecimientos. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Estableciendo un Observatorio de la Zona Crítica para la Hidropedología y Agricultura Sostenible en el Mediterráneo” (AGL2015-65036-C3-2-R), financiado por el Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los retos de la sociedad 81/150 para el cuatrienio 2016-2020. La primera autora agradece al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades la concesión de un contrato predoctoral FPU. Se agradece también al propietario y trabajadores de la finca Santa Clotilde facilitar el acceso y trabajo en ella. Juan Carlos Cuerva, Manuel Morón, Mario Ramos, Cristian Cuesta y Abraham Castillo colaboraron en la puesta a punto de la instalación y su mantenimiento.

5.- Bibliografía

- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes y M. Smith, 1988. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Irrig. Drain. Paper 56, FAO, Roma.
- Brutsaert, W., 2014. Daily evaporation from drying soil: Universal parameterization with similarity. *Water Resour. Res.* 50, 3206-3215.
- Emerman, S.H., 1995. The tipping bucket equation as a model for macropore flow. *J. Hydrol.* 171, 23-47.
- García-Gamero, V., Peña, A., Laguna, A. M., Giráldez, J. V., y Vanwallegghem, T. 2021. Factors controlling the asymmetry of soil moisture and vegetation dynamics in a hilly mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, 598(October 2020), 126207. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126207>
- Gutiérrez-Jurado, H. A., Vivoni, E. R., Cikoski, C., J. Harrison, J. B., Bras, R. L., y Istanbuluoglu, E. 2013. On the observed ecohydrologic dynamics of a semiarid basin with aspect-delimited ecosystems. *Water Resources Research*, 49, 8263–8284. <https://doi.org/10.1002/2013WR014364>
- Kim, H y V. Lakshmi, 2019. Global dynamics of stored precipitation water in the topsoil layer from satellite and reanalysis data. *Water Resour. Res.* 55, 3328-3346
- Li, Z., J. Vandenborgh y K.M. Smits, 2020. The effect of the top soil layer on moisture and evaporation dynamics. *Vadose Zone L.* 19:e20049.
- McColl, K.A., S.H. Alemohammad, R. Akbar, A.G. Konings, S. Yueh y D. Entekhabi, 2017. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geosci.* 10, DOI: 10.1038/NGEO2868.
- McMillan, H.K. y M.S. Srinivasan, 2015. Characteristics and controls of variability in soil moisture and groundwater in a headwater catchment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 19, 1767-1786.
- Or, D., P. Lehmann, E. D;Shahraeeni y N. Shokri, 2013. Advances in Soil Evaporation Physics—A Review. *Vadose Zone J.* doi:10.2136/vzj2012.0163
- Pelletier, J. D., Barron-Gafford, G. A., Gutiérrez-Jurado, H., Hinckley, E. L. S., Istanbuluoglu, E., McGuire, L. A., Niu, G. Y., Poulos, M. J., Rasmussen, C., Richardson, P., Swetnam, T. L., y Tucker, G. E. 2018. Which way do you lean? Using slope aspect variations to understand Critical Zone processes and feedbacks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 43(5), 1133–1154. <https://doi.org/10.1002/esp.4306>
- Peterson, A.M., W.H. Helgason, y A.M. Ireson, 2019. How spatial patterns of soil moisture dynamics can explain field-scale soil moisture variability: Observations from a sodic landscape. *Water Resour. Res.* 55, 4410-4426.
- Richardson, P. W., Perron, J. . T., Miller, S. . R., y Kirchner, J. W. 2020. Unraveling the mysteries of asymmetric topography at Gabilan Mesa , California. *American Geophysical Union*, 0–2. <https://doi.org/10.1029/2019JF005378>
- RIA, Portal de la Red de Información Agroclimática de Andalucía, IFAPA, <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/> acceso el 27 de junio de 2021
- Román-Sánchez, A., Vanwallegghem, T., Peña, A., Laguna, A., y Giráldez, J. V. 2018. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. *Geoderma*, 311, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.013>