

C-05-2023

Comunicación científico-técnica

Efecto del Dispositivo Infiltrador en la humedad del suelo en olivares de regiones semiáridas mediterráneas

Effect of the Infiltrator Device on soil moisture in olive orchards of semi-arid Mediterranean regions

Rojano-Cruz, Raúl¹; Martínez-Moreno, Francisco José², Galindo-Zaldívar, Jesús^{3,4}, Lamas, Francisco⁵, González-Castillo, Lourdes³, Delgado, Gabriel¹, Párraga, Jesús¹, Ramírez-González, Victoriano⁶, Durán-Zuazo, Víctor Hugo⁷, Cárceles-Rodríguez, Belén⁷, Martín-García, Juan Manuel¹

- 1 Departamento de Edafología y Química Agrícola, Facultad de Farmacia, Universidad de Granada, Campus Cartuja, 18071, Granada, España; raulrojanocruz@gmail.com; gdelgado@ugr.es; jparraga@ugr.es; jmmartingarcia@ugr.es
- 2 Departamento de Geodinámica, Estratigrafía y Paleontología, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España; fjmmoreno@ucm.es
- 3 Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, Campus Fuentenueva, 18071, Granada. España; jgalindo@ugr.es; lourdesgcastillo@gmail.com
- 4 Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC- Universidad de Granada, 18071, Granada. España; jgalindo@ugr.es
- 5 Departamento de Ingeniería Civil, Plaza Campo del Príncipe S/N, 18071, Granada. España; flamas@ugr.es
- 6 Departamento de Matemática Aplicada, E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Campus Fuentenueva, 18071, Granada. España; vramirez@ugr.es
- 7 Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA), Centro "Camino de Purchil", Camino de Purchil s/n, 18004, Granada. España; victorh.duran@juntadeandalucia.es; belen.carceles@juntadeandalucia.es

Resumen:

En las regiones semiáridas, los períodos de sequía representan uno de los mayores desafíos para la agricultura. El Hidroinfiltrador o Dispositivo Infiltrador (DI) (Patente Española No. ES 2793448 A1) ayuda a reestablecer el equilibrio hídrico de los suelos. El DI tiene forma cilíndrica que permite su colocación vertical, enterrado parcialmente en el suelo alrededor de los árboles de cultivo, facilitando así la infiltración profunda de agua de lluvia, riego o escorrentía. Es especialmente útil en zonas áridas y semiáridas afectadas por largos períodos de sequía y fuertes tormentas. En una finca experimental de olivar ubicada en Baena (Córdoba), se instalaron 90 DI en olivos, dejando 10 árboles como control (sin DI). Los suelos de esta finca presentan una baja tasa de infiltración, lo cual reduce la eficacia de la precipitación y aumenta significativamente el riesgo de erosión hídrica. Para analizar los efectos del DI, se simuló una lluvia torrencial en la que se pasaron 600 litros de agua a través del DI instalado en un olivo 3 años antes del experimento. Mediante el método geofísico de Tomografía Eléctrica de Resistividad (ERT en sus siglas en inglés) y análisis directos de muestras de suelo tanto *in situ*

como en laboratorio, se observó un considerable aumento de la humedad del suelo donde había DI. En comparación con los olivos control (sin DI), la humedad casi se triplicó gracias a la rápida penetración del agua en el suelo, evitando así la escorrentía y la erosión hídrica. Además, se registró un incremento del 211% en la producción de aceitunas y un aumento del 177% en el rendimiento graso. Los perfiles ERT mostraron que el agua que penetra en el suelo se acumula en la zona de raíces del olivo, alejada de la superficie, favorecida su distribución por las rutas preferentes creadas por las raíces. Esto evita una evaporación rápida durante las altas temperaturas de primavera y verano. En este estudio, se muestra cómo el uso del sistema de recolección de agua de lluvia con DI representa una mejora significativa en la gestión de los escasos recursos hídricos provocados por el cambio climático. Además, proporciona beneficios agronómicos y ambientales para los sistemas agrícolas mediterráneos de secano.

Palabras clave: Hidroinfiltrador; riego por goteo; eficiencia de riego; aprovechamiento de agua de lluvia; Tomografía Eléctrica de Resistividad.

Abstract:

In semi-arid regions, drought pose one of the greatest challenges to agriculture. The Hydroinfiltrator or Infiltrator Device (ID) (Spanish Patent No. ES2793448 A1) helps to restore the water balance of the soil. The ID has a cylindrical shape, that allows it to be placed vertically and partially buried in the soil around crop trees to allow deep infiltration of rainwater, irrigation or runoff. It is particularly useful in arid and semi-arid areas affected by long periods of drought and severe storms. On an experimental olive farm in Baena (Córdoba), 90 ID units were installed in olive trees, leaving 10 trees as controls (without ID). The soils on this farm have a low infiltration rate, which reduces the effectiveness of rainfall and significantly increases the risk of water erosion. To analyse the effects of the ID, a heavy rainfall was simulated in which 600 litres of water flowed through the ID in an olive tree where ID had been installed three years before the experiment. Using geophysical methods (Electrical Resistivity Tomography, ERT) and direct soil samples collected both in situ and in the laboratory, a significant increase in soil moisture was observed in the areas with the ID. Compared to the control olive trees, the moisture content almost tripled due to the rapid penetration of water into the soil, preventing runoff and water erosion. In addition, olive production increased by 211% and oil yield by 177%. ERT profiles showed that the water penetrating the soil accumulated in the root zone of the olive tree, away from the surface, facilitated by the preferential pathways created by the roots. This prevents rapid evaporation during the high temperatures of spring and summer. In this study, we show that the use of the rainwater harvesting system with ID is a significant improvement in the management of scarce water resources caused by climate change. It also offers agronomic and ecological benefits for rainfed Mediterranean agricultural systems.

Keywords: Hydroinfiltrator; drip irrigation; irrigation efficiency; use of rainwater; Electrical Resistivity Tomography.

1. Introducción

Las proyecciones del cambio climático advierten sobre la vulnerabilidad en las cuencas mediterráneas pronosticando un aumento en la temperatura, menos lluvia anual, cambios en la distribución de la precipitación y más eventos extremos [1]. Investigaciones recientes confirman menos agua disponible y más sequías, lo que causará estrés hídrico en cultivos, especialmente en secano, con pérdidas significativas de rendimiento [2-4]. Lorite et al. [4] proponen adoptar y fomentar prácticas de riego deficitario como una estrategia de adaptación sostenible al cambio climático. También, en climas áridos y semiáridos, se han estudiado los beneficios de usar sistemas de captación de agua en olivares [5], pistachos [6], manzanos [7].

El olivo (*Olea europaea* L.) es una especie fundamental en la región mediterránea desde el punto de vista socioeconómico. Aunque es resistente a condiciones de sequía, existe un umbral crítico de 200 mm de precipitación anual por debajo del cual su producción se ve significativamente afectada [8]. Con el aumento de las temperaturas y la disminución de la precipitación, se prevé que los olivos de secano enfrenten una mayor escasez de agua y estrés hídrico en el futuro, lo que podría limitar su cultivo en las regiones del sur y este del Mediterráneo [9].

Presentamos aquí un nuevo sistema de captación de agua de lluvia con dispositivo infiltrador (o hidroinfiltrador), probado en olivos en una región semiárida del sur de España afectada por largos períodos de sequía y eventos de lluvia de alta intensidad. Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de este nuevo sistema de captación de agua de lluvia en el entorno mediterráneo afectado por el cambio climático a través de métodos geofísicos y de muestreo de suelos. Una versión detallada de este estudio puede consultarse en Rojano-Cruz et al. [10].

2. Materiales y métodos

Se realizó un estudio en la finca experimental 'La Agusadera' en Baena, Córdoba, al sur de España. Se utilizaron 100 olivos de la variedad 'picuda' en condiciones de secano y no laboreo, con el uso de herbicida de contacto que fomenta el desarrollo de una capa de musgo. El suelo es un Calcisol Háptico (hipercálcico, ócrico) desarrollado sobre margas calcáreas, con un perfil Ap-B-Ck-Ckm-C'k, con pHs básicos y altos contenidos de carbonato cálcico equivalente.

Se crearon micro-cuencas alrededor de cada olivo para recolectar y canalizar el agua de lluvia y escorrentía hacia una poza ubicada a una distancia de 0.5 m del tronco. Se implementó un invento patentado en España (Patente Española No. ES2793448 A1) [11] denominado Hidroinfiltrador o Dispositivo Infiltrador (DI), consistente en una malla rellena principalmente con biochar activado que se instala en la poza parcialmente enterrado. El estudio incluyó 90 unidades de DI en las microcuencas asociadas y 10 olivos de control sin DI.

Se llevaron a cabo mediciones de tasa de infiltración del suelo utilizando el método de doble anillo [14] en áreas con y sin DI. Se utilizó la tomografía eléctrica de resistividad (ERT) para

determinar la distribución de la humedad en el suelo. Se realizaron dos transectos perpendiculares en un olivo con dos mediciones separadas en el tiempo: uno antes de la lluvia simulada en condiciones de suelo seco y otro después de la simulación de la lluvia con la adición de 600 litros de agua. La inversión de datos se realizó con el software Res2Dinv (v.3.59; Geotomo Inc.) utilizando el método de mínimos cuadrados, elementos finitos, 4 nodos por celda y refinamiento de malla debido a la gran cantidad de datos [13].

La humedad del suelo a una profundidad de 20 cm (muestreado con una perforadora de suelo no perturbado Eijkelkamp) se estimó por gravimetría en laboratorio, monitoreándose mensualmente desde septiembre de 2017 hasta diciembre de 2022. Se realizó un balance hídrico mensual del suelo [14] considerando la precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial de la estación meteorológica de Baena [15], teniendo en cuenta los parámetros de estado de reserva, variación de reserva, evapotranspiración real (ETR), sobrante y déficit.

3. Resultados y discusión

3.1. Espacialidad del agua en el suelo por Tomografía Eléctrica de Resistividad (ERT)

La tasa de infiltración en el suelo a través del DI fue de 1200 litros por hora. En cambio, en las cinco parcelas de control (sin DI), las tasas de infiltración medidas fueron de 23, 31, 34, 42 y 45 litros por hora (media de 35 ± 8.8 litros por hora). Esto supone un aumento en la tasa de infiltración del 3429% al utilizar el DI.

La alta tasa de infiltración en los suelos con DI se debe a que el dispositivo está conectado con rutas preferentes para la circulación de agua [16]. Estas rutas se generan por el desarrollo y la distribución de las raíces de los olivos, condicionadas por las propiedades morfológicas y físicas del suelo, que configuran un sistema poroso interconectado.

Las raíces de los olivos se distribuyen fundamentalmente bajo la copa del árbol [17] y las densidades de raíces más altas se encuentran en los primeros 60 cm del suelo con el máximo en los horizontes superiores, preferiblemente dentro de los primeros 40 cm [17]. En la zona de raíces del olivo hay numerosos poros –muchos de ellos macroporos (bioporos)– que son los que utilizan las mismas para atravesar la zona del suelo por su menor resistencia mecánica [18]. Las raíces prefieren utilizar los macroporos existentes y sus interconexiones para crecer y atravesar estas zonas del suelo. Estas influyen en el suelo que las rodea al ejercer presión sobre él a medida que crecen, lo que reduce la porosidad en el contacto suelo-raíz [19], creando paredes de bioporos más estables (efecto “pared de bañera”).

La aparición de rutas preferentes se debe principalmente a dos procesos. El primero es que, durante períodos de déficit de agua, aumenta la mortalidad de las raíces finas, incluso en los olivos irrigados [17]. Estas raíces muertas forman bioporos conectados al resto de las raíces del olivo a través de los cuales el agua puede circular. El segundo proceso está relacionado con el estrés hídrico de la planta: la raíz se contrae (principalmente las células de la corteza), reduciendo significativamente el contacto entre la raíz y el suelo [16]. Este espacio creado es beneficioso porque (i) reduce la pérdida de agua desde la raíz hacia el suelo seco, –aunque

algunas de estas raíces mueren debido al estrés hídrico– y (ii) este espacio es una ruta preferente cuando el agua entra en el suelo.

La distribución del agua gracias a las rutas preferentes se aprecia en los perfiles de resistividad (Figura 1). Antes de la simulación de lluvia, ambos perfiles muestran resistividades entre 50 y 200 ohmios por metro ($\Omega\cdot m$), con pequeñas áreas concentradas de alta resistividad ($\sim 500 \Omega\cdot m$) que indican zonas compactas y secas, y áreas pequeñas puntuales de baja resistividad ($\sim 20 \Omega\cdot m$) que indican la presencia de arcilla o mayor humedad (Figuras 1a y 1c). La posición del olivo y el DI se identifica como zonas de alta resistividad ($> 650 \Omega\cdot m$). Después de la simulación de lluvia, la infiltración y distribución del agua se destacan por áreas de baja resistividad (gama de colores azules; $\sim 5 \Omega\cdot m$) que se extienden desde la superficie hasta una profundidad de 1 m (Figuras 1c y 1d). La secuencia temporal nos permite calcular el cambio porcentual en el contenido de humedad después de la simulación de lluvia (Figura 2). Los perfiles muestran un cambio del 100% en la humedad del suelo en el área alrededor de la raíz, que actúa como rutas preferentes para el agua.

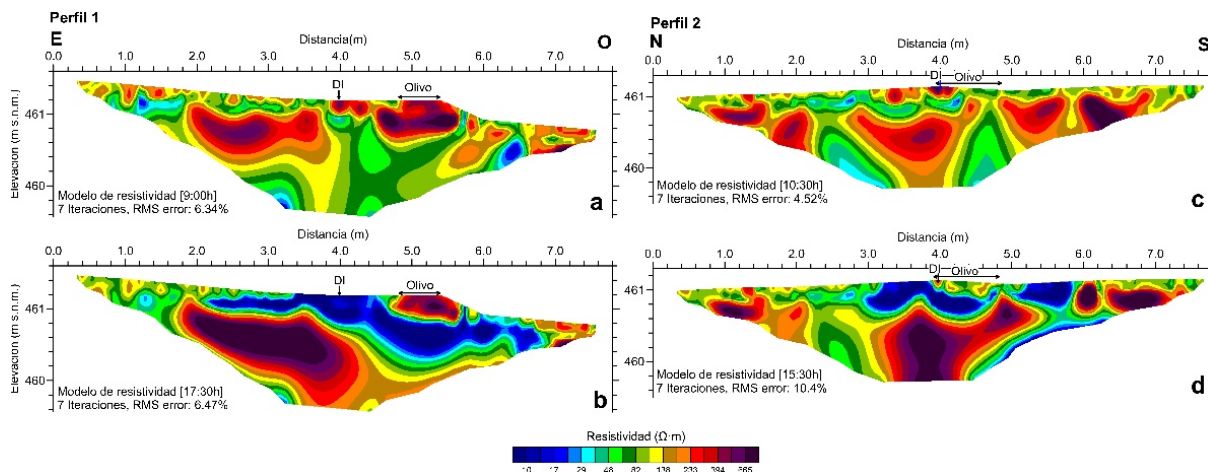


Figura 1. Perfiles de Tomografía Eléctrica de Resistividad realizados en direcciones perpendiculares antes (a y c) y después (b y d) de una simulación de lluvia. Se indica la posición del Dispositivo Infiltrador (DI) y del olivo.

Estos perfiles de resistividad indican que el agua permanece en la zona radical hasta una profundidad de 50 cm (hasta 1 m en la zona del tronco). Además, se puede observar que alrededor de las raíces el cambio porcentual en la humedad aumenta hasta un 100%, mientras que las áreas circundantes permanecen sin cambios (Figura 2). Los perfiles se midieron en el período de déficit de agua (agosto de 2020), por lo que las vías creadas por las raíces son las rutas preferentes para el flujo de agua en este momento. De esta manera, el agua que penetra a través del dispositivo puede llegar hasta las raíces más distantes del árbol. Esto significa que el agua se almacena en la zona de raíces del árbol y no en la superficie, evitando así la evaporación debida a las altas temperaturas.

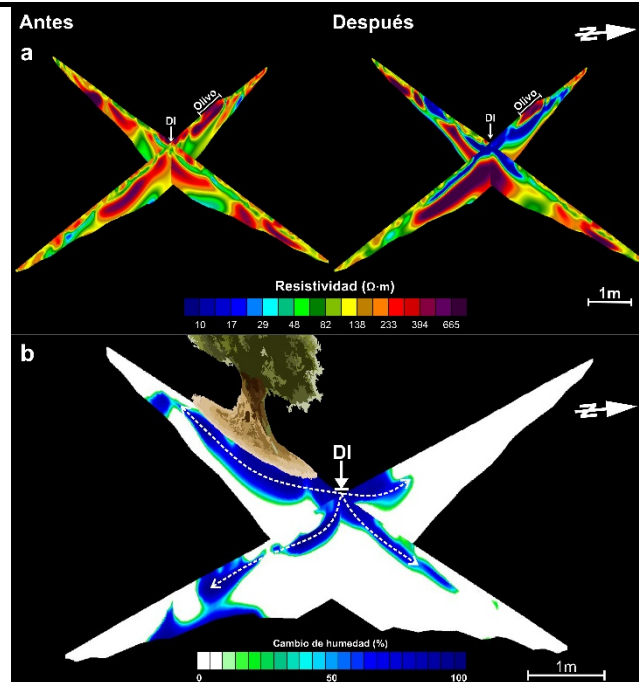


Figura 2. Visualización 3D de los perfiles de resistividad. a) Distribución de la resistividad antes (izquierda) y después (derecha) de la simulación de lluvia. b) Variación de la humedad del suelo (%) después de la simulación de lluvia. El color azul representa un 100% de variación de la humedad del suelo. DI, Dispositivo Infiltrador.

3.2. Variación temporal de la humedad del suelo. Balances hídricos

La humedad del suelo a una profundidad de 20 cm sigue un ciclo estacional, disminuyendo en los meses de verano y aumentando en los de invierno (Figura 3). La humedad siempre es mayor en los olivos con el DI que en los árboles de control, y estas diferencias se exageran en los meses de invierno debido a un efecto acumulativo del agua. Para los valores promedio (meses de 2018-22; $n = 48$), la humedad del suelo a 20 cm de profundidad fue 2.97 veces mayor en las parcelas con el DI que en las parcelas control.

Basándonos en los resultados anteriores, podemos elaborar los balances hídricos para los suelos control y los suelos con DI (Figura 5). Para el suelo con DI, y de acuerdo con la Figura 3, asumimos que se infiltran 2.97 veces más de agua de lluvia que en el suelo de control. De esta manera, la implementación del DI conduce a un cambio drástico en el régimen de humedad en el suelo debido a que (i) se reduce el déficit de agua y su duración de 842 l/m²/año y 6.5 meses de duración en el suelo de control a 554 l/m²/año y 3.5 meses de duración en el suelo con DI; (ii) la reserva de agua del suelo no se repone en el suelo control (solo en el suelo con DI); (iii) la evapotranspiración real es mayor en el suelo con DI (740 l/m²/año) que en el suelo de control (453 l/m²/año), lo que se traduce en una mayor producción [4]; (iv) hay un exceso de agua en el suelo con DI (604 l/m²/año; 0 l/m²/año en el suelo control) que, al tratarse de agua infiltrada, significa un flujo de retorno de agua a la cuenca (eliminando la ‘paradoja del riego’ descrito en otros sistemas de uso agrícola del agua [20]).

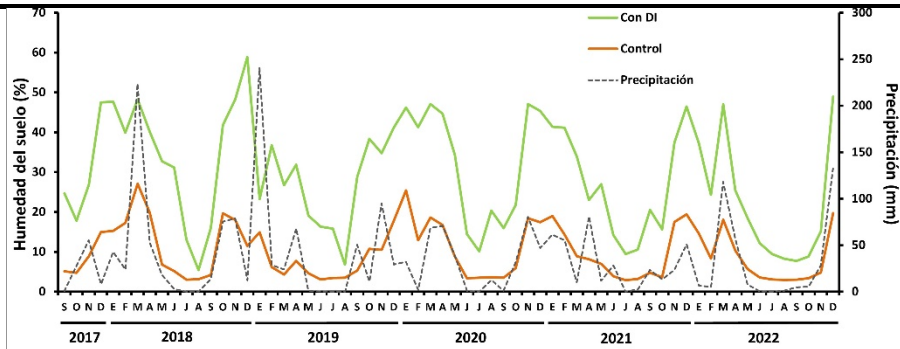


Figura 3. Variación mensual de la precipitación y de la humedad del suelo con y sin Dispositivo Infiltrador (DI) a una profundidad de 20 cm del suelo y a 20 cm de distancia del DI (cuando corresponda).

En ambos casos (suelo control y suelo con DI), el régimen de temperatura es térmico y el régimen de humedad es xérico [21], con el régimen de humedad en el suelo control más seco. Por lo tanto, se crea un microclima, que podría describirse como una isla de humedad, en los suelos con el sistema DI.

En el modelo de balance de agua (Figura 4), los suelos con el DI completan la recarga de la reserva el 10 de noviembre, mientras que los suelos de control nunca lo hacen. Los resultados de la medición de la humedad del suelo confirman estos cálculos, ya que es más alta y dura más tiempo en los suelos con DI (Figura 3). Una vez que se agota la reserva en los suelos con DI, se espera que el exceso de agua percole hacia el nivel freático, que los cálculos estiman en 90,6 m³/ha/año. Esto ayudaría a reducir la presión sobre los recursos hídricos y mitigar la amenaza de la escasez de agua en la región mediterránea [22].

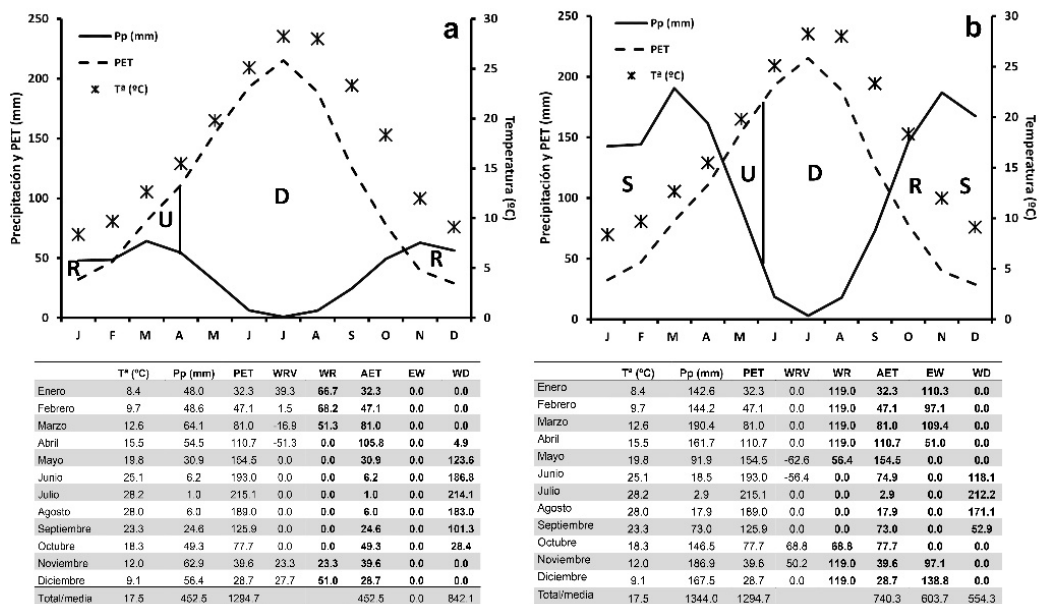


Figura 4. Balances hídricos del suelo: a) suelo sin Dispositivo Infiltrador (suelo control); b) suelo con Dispositivo Infiltrador. Abreviaturas: Pp, precipitación; PET, evapotranspiración potencial; R, recarga; U, utilización; D, déficit; S, sobrante; AET, evapotranspiración real; WRV, variación de la reserva; WR, estado de la reserva; EW, sobrante de agua; WD, déficit de agua.

Por otro lado, la infiltración de agua directamente en el subsuelo a través del DI reduce la escorrentía superficial y, por lo tanto, la erosión hídrica del suelo. Este hecho queda confirmado en la finca experimental, donde no se observaron características de erosión hídrica del suelo, como surcos o cárcavas, cerca de los olivos con DI.

3.3. Efectos del Dispositivo Infiltrador

En áreas con déficit de agua, el objetivo del DI es aumentar el almacenamiento de agua en el suelo y reducir la evaporación y la escorrentía superficial [23]. Los datos del balance hídrico del suelo muestran que el DI es una buena estrategia para la captación de agua en el suelo (Figura 4).

Los beneficios más esperables del DI son:

- 1) Aumento en la producción originado por el incremento de humedad en la zona radical del olivo. Como se puede observar en la Figura 5, los olivos con el dispositivo infiltrador aumentan su producción y rendimiento en 177% y 211%, respectivamente. Teniendo en cuenta que los dispositivos se instalaron en 2016, el aumento en la producción desde la primera campaña (2017) es notable. Esto tiene implicaciones muy positivas para un futuro en el que el cambio climático está provocando una disminución de las precipitaciones y un aumento de la evapotranspiración, lo que resulta en una disminución de la producción total de aceitunas en la región mediterránea.
- 2) En las pozas, la principal limitación es la formación de costras deposicionales superficiales con capacidad de infiltración limitada o nula (baja velocidad de infiltración) en la base de la poza [24]. Colocar el DI en este punto resuelve este problema y rompe la barrera de la formación de costras.
- 3) El riego por goteo superficial tiene un aspecto negativo basado en la alta tasa de evaporación en la zona de humedad superficial alrededor de cada gotero (especialmente en regiones semiáridas), que puede llegar hasta un 44% [25,26]. Para reducir estas tasas de evaporación se sugiere colocar el gotero dentro del DI que se encarga de transferir el agua al suelo a través de un flujo vertical y horizontal. Esto es especialmente interesante en los riegos deficitarios, ya que el DI optimiza la cantidad de agua utilizada (maximiza la producción por unidad de agua utilizada - productividad del agua-).
- 4) El biochar (componente principal del DI) aumenta la conductividad hidráulica saturada e insaturada, la capacidad de retención de agua del suelo, la fertilidad y secuestra carbono atmosférico, entre otros efectos [16].

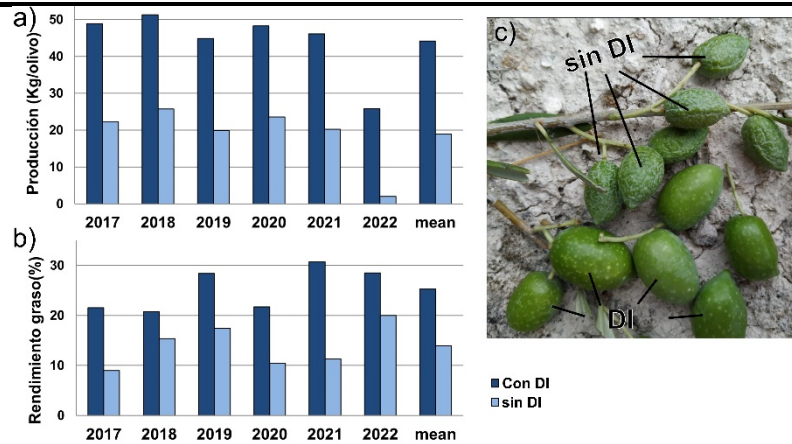


Figura 5. Efecto del Dispositivo Infiltrador en la producción de aceitunas (a), en el rendimiento graso (b) y en el tamaño de las aceitunas (c) de variedad "Picuda".

4. Conclusiones e ideas futuras

El nuevo Dispositivo Infiltrador (Patente de España No.: ES2793448 A1) ha demostrado ser una herramienta eficaz para mitigar los efectos adversos de la escasez de agua en el olivar tradicional. Su uso puede enmarcarse en el concepto de agricultura climáticamente inteligente: 1) ayuda a los agricultores a adaptarse al cambio climático, 2) aumenta de manera sostenible la producción agrícola y 3) reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (el biochar secuestra carbono en el suelo). A través de la tomografía eléctrica de resistividad y el análisis de la humedad del suelo, hemos demostrado que el nuevo Dispositivo Infiltrador: (i) aumenta la humedad en el interior del suelo (lo que reduce la evaporación); (ii) retiene el agua en la zona de raíces del olivo (el exceso de agua podría recargar los acuíferos por percolación); y (iii) aumenta la producción. Además, el Dispositivo Infiltrador tiene un valor positivo ante las lluvias torrenciales, ya que puede interceptar la escorrentía superficial, reduciendo la intensidad del proceso de erosión hídrica en laderas en entornos semiáridos mediterráneos.

En este contexto, la línea de investigación debería seguir las siguientes direcciones: 1) estudiar cómo las raíces de las plantas se distribuyen y desarrollan con el tiempo después de la implantación del Dispositivo Infiltrador, ya que las raíces tienen un tropismo positivo hacia el agua [27], por lo que presumiblemente las raíces se desarrollarán hacia las áreas húmedas cerca del dispositivo infiltrador; 2) investigar con otros tipos de suelos, así como con otros cultivos frutales de secano (almendros, pistachos, viñedos, etc.), especialmente en áreas agrícolas marginales mediterráneas.

Referencias

- Goubanova, K., Li, L., 2007. Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change* 57(1-2), 27-42.
- Valverde, P., de Carvalho, M., Serralheiro, R., Maia, R., Ramos, V., Oliveira, B., 2015. Climate change impacts on rainfed agriculture in the Guadiana river basin (Portugal). *Agricultural Water Management* 150, 35-45.
- Funes, I., Savé, R., de Herralde, F., Biel, C., Pla, E., Pascual, D., Zabalza, J., Cantos, G., Borràs, G., Vayreda, J., Aranda, X., 2021. Modeling impacts of climate change on the water needs and growing cycle of crops in three Mediterranean basins. *Agricultural Water Management* 249, 106797.

4. Lorite, I.J., Gabaldón-Leal, C., Ruiz-Ramos, M., Belaj, A., de la Rosa, R., León, L., Santos, C., 2018. Evaluation of olive response and adaptation strategies to climate change under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management* 204, 247-261.
5. Tubeileh, A., Bruggeman, A., Turkelboom, F., 2016. Water-harvesting designs for fruit tree production in dry environments. *Agricultural Water Management* 165, 190-197.
6. Tadros, M.J., Al-Mefleh, N.K., Othman, Y.A., Al-Assaf, A., 2021. Water harvesting techniques for improving soil water content, and morpho-physiology of pistachio trees under rainfed conditions. *Agricultural Water Management* 243, 106464.
7. Zhang, W., Sheng, J., Li, Z., Weindorf, D.C., Hu, G., Xuan, J., Zhao, H., 2021. Integrating rainwater harvesting and drip irrigation for water use efficiency improvements in apple orchards of northwest China. *Scientia Horticulturae* 275, 109728-109728.
8. Bonggi, G., Palliotti, A., 1994. Olive. In: Schaffer B, Andresen P (eds). *Handbook of environmental physiology of fruit crops*. CRC Press, pp. 165-187.
9. Tanasijevic, L., Todorovic, M., Pereira, L.S., Pizzigalli, C., Lionello, P., 2014. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management* 144, 54-68.
10. Rojano-Cruz, R., Martínez-Moreno, F. J., Galindo-Zaldívar, J., Lamas, F., González-Castillo, L., Delgado, G., ... y Martín-García, J. M. (2023). Impacts of a hydroinfiltrator rainwater harvesting system on soil moisture regime and groundwater distribution for olive groves in semi-arid Mediterranean regions. *Geoderma*, 438, 116623.
11. Delgado, G., Martín-García, J.M., Rojano-Cruz, R., Rufian, J.A., 2019. Dispositivo Infiltrador (Spain Patent No. ES 2 793 448 A1). Oficina Española de Patentes y Marcas. https://consultas2.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/79/34/ES-2793448_A1.pdf
12. Li, M., Liu, T., Duan, L., Luo, Y., Ma, L., Zhang, J., Zhou, Y., Chen, Z., 2019. The Scale Effect of Double-Ring Infiltration and Soil Infiltration Zoning in a Semi-Arid Steppe. *Water* 2019, Vol. 11, Page 1457 11(7).
13. Loke, M.H., 2022. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
14. Soil Survey Staff, 1999. *Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys*. 2nd edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Agriculture handbook. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture.
15. Junta de Andalucía, 2022. Red de Información Agroclimática de Andalucía (RIA). <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/>.
16. Weil, R.R., Brady, N.C., 2017. *The nature and properties of soils*, fifteenth edition. Pearson, NY.
17. Masmoudi-Charfi, C., Masmoudi, M., Ben Mechlia, N., 2011. Root distribution in young Chétoui olive trees (*Olea europaea* L.) and agronomic applications. *Advances in Horticultural Science* 25, 112-122.
18. Colombi, T., Braun, S., Keller, T., Walter, A., 2017. Artificial macropores attract crop roots and enhance plant productivity on compacted soils. *Science of The Total Environment* 574, 1283-1293.
19. Lucas, M., Schlüter, S., Vogel, H.J., Vetterlein, D., 2019. Roots compact the surrounding soil depending on the structures they encounter. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13.
20. Nikolaou, G., Neocleous, D., Christou, A., Kitta, E., Katsoulas, N., 2020. Implementing Sustainable Irrigation in Water-Scarce Regions under the Impact of Climate Change. *Agronomy*, 10, 1120.
21. Soil Survey Staff, 2014. *Keys to soil taxonomy*, 12th edition. United States Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
22. Iglesias, A., Garrote, L., Flores, F., Moneo, M., 2007. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management* 21, 775-788.
23. Abhilash Joseph, E., Abdul Hakkim, V.M., Sajeena, S., 2020. Precision Farming for Sustainable Agriculture. *International Journal of agriculture innovations and research* 8(16), 543-553.
24. Valentin, C., Bresson, L.M., 1992. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils. *Geoderma* 55(3-4), 225-245.
25. Matthias, A.D., Salehi, R., Warrick, A.W., 1986. Bare soil evaporation near a surface point-source emitter. *Agricultural Water Management* 11(3), 257-277.
26. Lucero-Vega, G., Troyo-Diéguez, E., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Ruíz-Espinoza, F.H., Beltrán-Morañes, F.A., Zamora-Salgado, S., 2017. Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia* 51(5), 487-505.
27. Muthert, L.W.F., Izzo, L.G., Van Zanten, M., Aronne, G., 2020. Root tropisms: Investigations on earth and in space to unravel plant growth direction. *Frontiers in plant science* 10, 1807.