

F-04-2023

Comunicación científico-técnica

Prácticas de riego y retornos a escala de cuenca: comunidad de regantes, agricultores e investigadores cooperando en un Fab-Lab

Irrigation and return flow at the catchment-scale: a Fab-Lab experience cooperating with the water users association, farmers and researchers

Domenech Carretero, Ignacio¹; Cuadrado Alarcón, Blanca¹; Carmona Graciano, M^a Ascensión²; Mateos, Luciano¹; Gómez Macpherson, Helena¹

- 1 Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Avda. Menéndez Pidal s/n, 14004 Córdoba, email: i.domenech.carretero@csic.es
- 2 Comunidad de Regantes Genil-Cabra, C. Villargallegos, 25, 14546 Santaella, Córdoba

Resumen:

Entender la hidrología del riego y la relación entre precipitaciones y escorrentía a escala de cuenca es crítico para poder evaluar el impacto de prácticas de conservación de agua, que pueden ser implementadas a escala de organización o de parcela. Este trabajo se centra en una experiencia Fab-Lab en la Zona Regable del Genil-Cabra, que reúne a comunidad de regantes, agricultores, e investigadores para explorar y evaluar medidas de mejora de conservación del agua.

Durante 11 años (2011-2022), el Fab-Lab monitorizó una cuenca de 303 ha en riego, distribuida en 7 fincas de tamaño pequeño o medio, que usan riego por goteo y aspersión, y con diversos cultivos: olivar, cultivos herbáceos (algodón, girasol, trigo), y cultivos hortícolas (ajo, cebolla, melón). Esta cuenca está equipada con contadores de agua en los hidrantes de riego, tres pluviómetros, y una estación de aforo de escorrentía en el punto de desagüe, con un muestreador automático.

Se calcularon los balances de agua en la cuenca para los años hidrológicos disponibles. La escorrentía se cuantificó mediante la estación de aforo, y el comportamiento hidrológico de la cuenca se caracterizó con indicadores de rendimiento del uso del agua. Se analizaron por separado temporadas húmedas y secas, para distinguir los efectos de las precipitaciones de



XXXIX Congreso Nacional de Riegos ÚBEDA (JAÉN)

18, 19, 20 de octubre de 2023



invierno y los riegos de verano. Los resultados muestran un valor bajo para el coeficiente de escorrentía y una alta eficiencia del riego, con una clara estrategia de riego deficitario. Los avances son regularmente debatidos por los miembros del Fab-Lab, examinando las mejoras potenciales de la eficiencia del riego a escala de parcela y cuenca. Además, se han abordado los criterios y reglas para el desarrollo de un sistema de alerta en caso de rotura o mal uso del sistema de riego.

Palabras clave: hidrología, alerta de funcionamiento del riego, rendimiento del uso del agua

Abstract:

Understanding irrigation hydrology and the relationship between precipitation and runoff at the watershed scale is critical to evaluating the impact of water conservation practices, which can be implemented at the organizational or plot scale. This work focuses on a Fab-Lab experience in the Genil-Cabra Irrigation Scheme, which brings together the community of irrigators, farmers, and researchers to explore and evaluate measures for improving water conservation.

For 11 years (2011-2022), the Fab-Lab monitored a 303-ha basin that includes 7 small or medium-sized farms, using drip and/or sprinkler irrigation, and with various crops: olive orchards, annual crops (cotton, sunflower, wheat), and horticultural crops (garlic, onion, melon). This basin is equipped with flowmeters in the irrigation hydrants, three rain gauges, and a flume at the drainage point, with an automatic sampler.

The water balances in the basin were calculated for the available hydrological years. Runoff was quantified using data taken at the flume, and the hydrological behaviour of the basin was characterized with performance indicators. Wet and dry seasons were analysed separately to distinguish the effects of winter precipitation and summer irrigation. The results show a low value for the runoff coefficient and a high irrigation efficiency, with a clear deficit irrigation strategy. Progress is regularly discussed by Fab-Lab members, examining potential irrigation efficiency improvements at plot and basin scales. In addition, the criteria and rules for the development of a warning system in case of breakage or misuse of the irrigation system have been addressed.

Keywords: hydrology, irrigation operation alert, water productivity

1. Introducción

La Directiva Marco del Agua (DMA) de la UE favorece la escala de cuenca como unidad, para la gestión del agua y su monitorización. Sin embargo, los límites de las áreas de riego raramente coinciden con las líneas divisorias de las cuencas, por ello la evaluación del rendimiento del riego a esta escala no es directo.

Identificar cuencas donde los flujos de retorno puedan ser monitorizados puede ayudar a evaluar prácticas de conservación del agua y a implementar alertas para el uso incorrecto del agua. Los criterios y reglas para estas alertas requieren un conocimiento previo del riego, hidrología y relación entre la precipitación y la escorrentía en las cuencas.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis preliminar de estas relaciones y una evaluación del rendimiento del riego en nuestro Fab-Lab, al que denominamos Catch-Lab, que es en una cuenca en riego monitorizada en la zona regable Genil-Cabra (Andalucía).

2. Materiales y métodos

2.1. Metodología Fab-Lab

Este estudio se enmarca dentro del proyecto “Open innovation Hub for Irrigation Systems in Mediterranean agricultura (Hubis)” que busca reducir la brecha en el rendimiento del riego estudiando casos reales con un enfoque de abajo a arriba, estudiando casos multidisciplinares, buscando soluciones a problemas en cada zona y encontrando similitudes entre ellas. Siempre desde la innovación y haciendo uso intensivo de las tecnologías emergentes.

Se adoptan acciones de investigación participativa para facilitar un ambiente de innovación continuo donde los sitios base seleccionados para la innovación enfrentan el desafío de cerrar la brecha en el rendimiento del riego. Un Fab-Lab es un agregado de diferentes comunidades, empresarios, agentes involucrados, investigadores, y organizaciones públicas o privadas, interactuando y colaborando para definir y probar nuevas ideas que resuelvan retos de producción, comerciales u organizacionales, en el ecosistema específico del riego.

Cada Fab-Lab en este proyecto estudia y define soluciones para mejorar el rendimiento del riego. La implementación real de soluciones en cada Fab-Lab se desarrolla de forma específica, pero se espera que las innovaciones sean aplicables en otras zonas de las cuencas mediterráneas europeas. Por tanto, los principios asociados a la innovación se formalizan y definen correctamente para que sean transferibles a otros sistemas, creando una “cesta de innovaciones” para abordar nuevos casos de estudio.

2.1. Definición de la cuenca

Durante 11 años (2011-2022), el Fab-Lab monitorizó una cuenca (Fig. 1) de 303 ha en riego, distribuida en 7 fincas de tamaño pequeño o medio, que usan riego por goteo y aspersión, y con diversos cultivos: olivar, cultivos herbáceos (algodón, girasol, trigo), y cultivos hortícolas (ajo, cebolla, melón).

La cuenca de estudio se ubica en la zona regable del Genil-Cabra (40000 ha), en la provincia de Córdoba. El clima es Mediterráneo, con veranos secos y calurosos, y con precipitaciones concentradas en otoño e invierno.

Esta cuenca está equipada con contadores de agua en los hidrantes de riego, tres pluviómetros, y una estación de aforo de escorrentía en el punto de desagüe, con un muestreador automático. Su red de riego presurizada opera bajo demanda a escala de parcela. Y el canal de drenaje principal de la cuenca tiene 3.6 km de largo hasta el punto de monitorización del drenaje, que define la cuenca de estudio.



Figura 1. Ortofoto del año 2016 donde se muestra la delimitación de la cuenca (rojo) objeto del Catch-Lab, el cauce principal (azul), la delimitación de las parcelas agrícolas que componen la cuenca (verde), la localización de la estación hidrológica y el aforador (punto verde), los pluviógrafos (puntos negros) y los hidrantes de riego (puntos azules).

2.2. Estación hidrológica

La estación hidrológica consiste en un canal de garganta larga, un sensor ultrasonidos de nivel de agua (Siemens Milltronics, modelo The Probe; Munich, Germany), un toma-muestras automático (Teledyne ISCO, modelo ISCO 3700C; Lincoln, NE), un pluviógrafo de cazoletas (Decagon SH2O, modelo ECRN-100, Pullman, WA), un registrador de datos (Campbell Scientific, modelo CR1000; Logan, UT), y un sistema de comunicación GSM (Campbell

Scientific, modelo CS-GSM, Logan, UT). El nivel de agua se mide a intervalos de 2 minutos, y los vuelcos del pluviógrafo también se registran cada 2 minutos.

El riego diario aplicado se mide con caudalímetros Woltman en los 23 hidrantes que proveen riego para las parcelas de la cuenca (Fig. 1). Además, hay dos pluviógrafos de cazoletas adicionales, idénticos al instalado en la estación hidrológica, pero ubicados en otros dos puntos de la cuenca, para monitorizar la variabilidad de las precipitaciones en la parte alta y media de la cuenca (Fig. 1).

2.3. Balance de agua en la cuenca

Los componentes del balance de agua en la cuenca son: precipitación (R), riego (I), evapotranspiración (ET), escorrentía superficial y subsuperficial (Q), percolación profunda (D) y cambios en el contenido de agua en el suelo (ΔS) durante el periodo de estudio.

Los datos presentados en este trabajo corresponden al periodo 2011-2021. Durante este periodo R, Q y I fueron medidos, y D se consideró despreciable debido a la baja permeabilidad del suelo.

La ETc se estimó siguiendo el método del coeficiente único propuesto por Allen y col. [1], con la estimación de un coeficiente de cultivo basal derivado del índice de vegetación obtenido mediante imágenes satélite con la metodología recogida en Mateos y col. [5].

Se calcularon los balances de masa de aguas para obtener el cambio en el contenido de agua en el suelo en la zona radicular (ΔS), como hicieron Duarte y Mateos [4]. El balance de masa de aguas completo fue calculado solamente para el año hidrológico 2015-2016 [7].

2.4. Indicadores rendimiento del uso del agua

El rendimiento del riego y el uso del agua en la cuenca han sido cuantificados, hasta el momento, para el año hidrológico 2015-2016, aunque se dispone de datos de otros años, que aún están siendo estudiados.

Se seleccionaron cuatro indicadores para la evaluación del rendimiento del uso del agua recogidos en la tabla 1 [6]. El primero, es un indicador de las aportaciones de agua relativas llamado RWS por su nombre en inglés (Relative Water Supply), el segundo, es un indicador de aportaciones de riego relativas llamado RIS por su nombre en inglés (Relative Irrigation Supply), en tercero es un indicador de la eficiencia del riego, llamado IE por sus siglas en inglés (Irrigation Efficiency), y el último es un indicador del coeficiente de escorrentía llamado ROC (Runoff coefficient).

Tabla 1. Indicadores del uso del agua.

Indicador	Fórmula	Términos
Relative Water Supply (RWS)	$RWS = \frac{R + I}{ET_{crop}}$	R - precipitación I - volumen de agua aplicado en riego
Relative Irrigation Supply (RIS)	$RIS = \frac{I}{I_{required}}$	ET_{crop} - volumen correspondiente a las necesidades hídricas del cultivo $I_{required}$ - volumen de riego necesario para completar las necesidades hídricas del cultivo
Irrigation Efficiency (IE)	$IE = \frac{I - Q}{I}$	Q - volumen de drenaje superficial y subsuperficial
Runoff Coefficient (ROC)	$ROC = \frac{Q}{R + I}$	

2.5. Modelización hidrológica

La hidrología de la cuenca se modelizó en base a 100 episodios de escorrentía monitorizados para el periodo analizado. Se utilizaron modelos lineales de covarianza (ANCOVA), donde la escorrentía se estableció como la variable endógena.

Los tres modelos explorados toman la precipitación (X_{t1}) como la única variable exógena. El primer modelo se definió con una única variable (Eq. 1). El segundo modelo, se definió añadiendo una segunda variable endógena, que consiste en un término relacionado con la humedad del suelo al inicio del episodio, estimada como las precipitaciones durante los 10 días previos al episodio (X_{t2} , Eq. 2). El tercer modelo se definió añadiendo a las variables antes mencionadas una variable de tipo ficticia la cual toma un valor binario para indicar la ausencia o presencia de algún efecto categórico, en este caso los cuatro cuartiles, o cuatrimestres, del año hidrológico (T_{t3} , T_{t4} , T_{t5} , T_{t6}) con ello se espera mejorar el ajuste del modelo frente al balance hidrológico acontecido en la cuenca objeto de estudio, definido en la Eq. 3.

$$\text{Modelo I: } Y_t = \beta_1 * X_t + U_t \quad (1)$$

$$\text{Modelo II: } Y_t = \beta_1 * X_{t1} + \beta_2 * X_{t2} + U_t \quad (2)$$

$$\text{Modelo III: } Y_t = \beta_1 * X_{t1} + \beta_2 * X_{t2} + \beta_3 * T_{t3} + \beta_4 * T_{t4} + \beta_5 * T_{t5} + \beta_6 * T_{t6} + U_t \quad (3)$$

3. Resultados y discusión

3.1. Hidrología de la cuenca

En términos de precipitación, el periodo de estudio fue variable (Fig. 2). La precipitación media anual, para dicho periodo, fue de 418 mm, el año hidrológico 2012-2013 fue especialmente húmedo, los años 2016-2017, 2017-2018 y 2018-2019 fueron cercanos a la media, mientras que

el resto de años estuvieron por debajo de la media (2011–2012, 2013–2014, 2014–2015, 2015–2016).

El coeficiente de escorrentía (ROC) medio fue de 0.12, valor cercano a los que podemos encontrar en ambientes mediterráneos [3]. El agua de riego genera mucha menos escorrentía que las precipitaciones (Fig. 3), a pesar de contribuir con algo más del 33% al volumen de agua total aportada a la cuenca, como se puede observar en los valores de mayo a septiembre de la Fig.3.

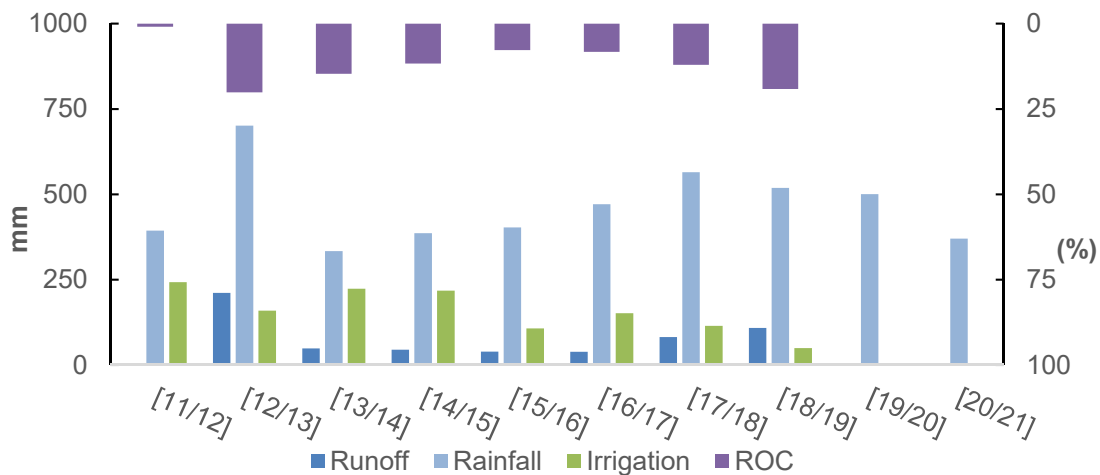


Figura 2. Precipitación anual, riego, escorrentía, y coeficiente de escorrentía (ROC) en la cuenca de estudio.

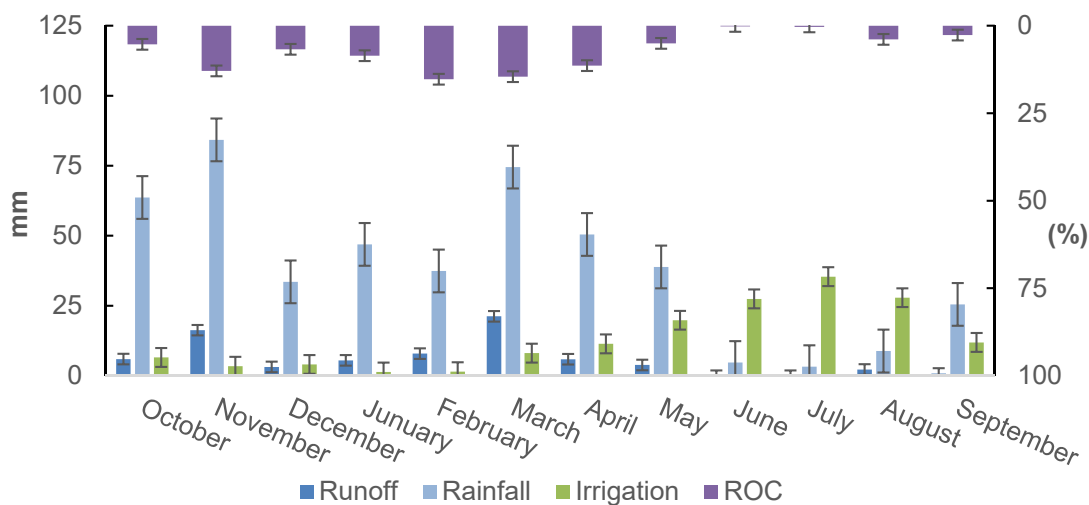


Figura 3. Precipitación mensual, riego, escorrentía y coeficiente de escorrentía (ROC) en la cuenca de estudio para la serie histórica en que dichas variables han sido analizadas, nótese que los valores de estas variables atienden a un valor promedio mensual.

Los indicadores de uso del agua derivados del cálculo del balance de agua de la campaña de riego 2015-2016 (Tabla 2), muestran valores bajos de ROC, altos de IE, y valores RWS y RIS que reflejan una estrategia de riego claramente deficitaria. Estos indicadores ponen de manifiesto un buen rendimiento del riego, que nos lleva a considerar métodos más sofisticados para cerrar la ya pequeña brecha de rendimiento en el uso del agua.

Tabla 2. Indicadores de uso del agua para la campaña de riego del año 2016.

Indicador	Valor
RWS	0.38
RIS	0.36
IE	0.99
ROC	0.31

La relación precipitación-escorrentía para periodos húmedos (Fig.4), muestra una relación de aumento de la escorrentía con aumentos en la precipitación.

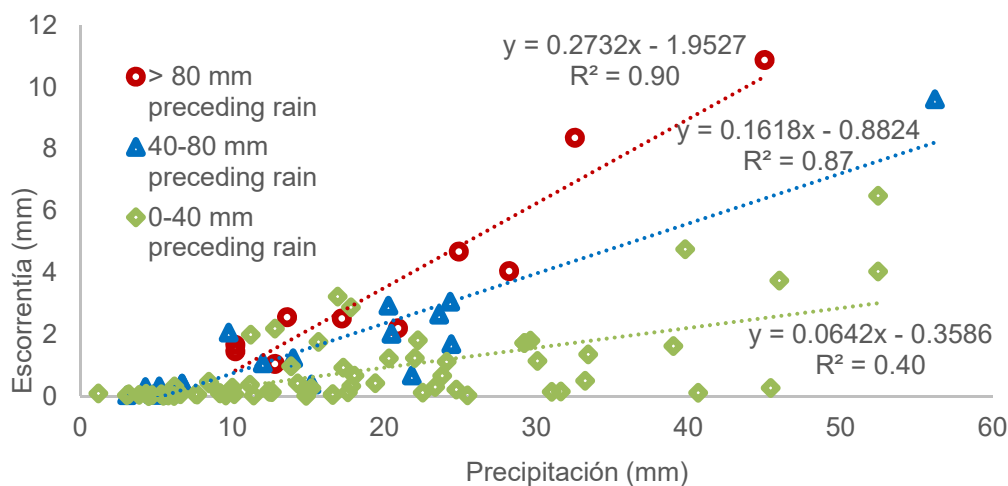


Figura 4. Relación precipitación-escorrentía para un set de 100 episodios de escorrentía durante el periodo de estudio 2011-2021, clasificados de acuerdo a las precipitaciones en los 10 días previos en tres grupos: 0-40 mm, 40-80 mm y >80 mm.

Por otro lado, agrupando los datos según la precipitación precedente, en los 10 días previos al episodio, la pendiente de la línea de tendencia precipitación-escorrentía aumenta según aumentan las precipitaciones previas al episodio (grupos rojo, azul y verde Fig. 4).

Una regresión lineal simple del total de los episodios mostró que la precipitación explica menos del 50% ($R^2 = 0.42$) de la varianza de escorrentía. Pero al agrupar según las precipitaciones en los 10 días anteriores al episodio, la regresión lineal múltiple explica más del 60% ($R^2 = 0.64$) de la varianza en la escorrentía. Podemos decir por tanto que la humedad precedente influye en los valores de escorrentía. Esta variable relacionada con la humedad en el suelo apoya la hipótesis de que a mayor humedad inicial en el suelo mayor será el coeficiente de escorrentía.

Por otro lado, la intensidad de las precipitaciones debe tener un efecto importante en esta respuesta, como mencionan Borga y Morin [2], variable que aún debemos explorar en este trabajo en progreso.

3.2. Resultados de la modelización hidrológica

Los modelos ANCOVA descritos en las ecuaciones 1, 2 y 3 de la sección 2.5, explicaron el 50%, 60% y 75% respectivamente, de la varianza de la esorrentía. Sus estadísticos (Tabla 3), y coeficientes (Tabla 4) han sido calculados, encontrando en el modelo III el mejor ajuste a los datos de esorrentía medidos en la estación de aforo. Por tanto, elegimos este modelo III para mostrar los resultados.

Tabla 3. Estadísticos de los modelos ANCOVA: coeficiente de correlación (r), R cuadrado (R^2), R cuadrado ajustado (R_a^2), desviación estándar (ST), F de Fisher y su valor p .

Modelos	r	R^2	R_a^2	ST	F	p-value
I	0.75	0.57	0.56	1.53	130.2	1.1E-19
II	0.80	0.64	0.62	1.40	86.6	2.6E-08
III	0.86	0.74	0.72	1.22	44.6	1.9E-25

Tabla 4. Valores de los coeficientes de los modelos ANCOVA, ecuaciones 1 a 3.

Modelos	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
I	0.081	-	-	-	-	-
II	0.060	0.018	-	-	-	-
III	0.097	0.025	-1.161	-1.904	-1.361	*

Los coeficientes del modelo elegido fueron estadísticamente significativos (Tabla 5) excepto por el del último periodo **propuesto**. Ya que, al ser el cuatrimestre, o cuarto cuartil, del año hidrológico correspondiente con los meses de verano en los cuales no hay episodios de lluvia significativos, y, además, esta variable no tenía significancia estadística puesto que no superaba los test post hoc realizados. Por lo tanto, decidimos eliminar esta última variable del modelo y recalculamos íntegramente los estadísticos, el valor de las variables explicativas con los respectivos estadísticos que confieren solidez al modelo **propuesto**.

Tabla 5. Estadísticos para el modelo III: desviación estándar (ST), estadístico t (t stat), valor p (p-value).

	ST	t stat	p-value
Precipitación en los 10 días anteriores al episodio (mm)	0.01	3.85	2.1E-04
Precipitaciones (mm)	0.02	6.48	4.1E-09
Cuatrimestre I	0.45	2.57	1.2E-02
Cuatrimestre II	0.46	4.10	8.7E-05
Cuatrimestre III	0.47	2.89	4.8E-03

Al comparar la escorrentía estimada por el modelo y la medida por la estación de aforo (Fig. 5) se observa que el modelo sobreestima levemente los valores más bajos de escorrentía y subestima los valores más altos.

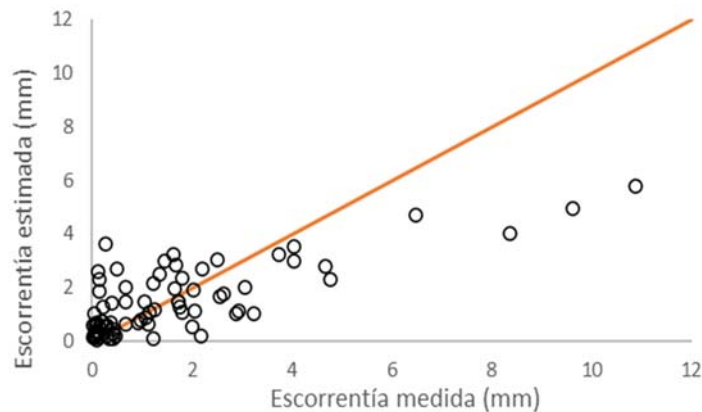


Figura 5. Comparación entre escorrentía estimada por el modelo, y medida por la estación de aforo, la línea diagonal representa un ajuste perfecto, cuyo R^2 tendría valor 1.

No obstante, y aunque esta modelización se encuentra aún en fase de desarrollo, el estado actual parece estimar valores aceptables, que pueden ayudar tanto en los cálculos necesarios para estimar una programación y magnitud de las aportaciones de riego a los cultivos, como también posibles estimaciones de la calidad de los flujos de retorno, el riesgo de erosión y la pérdida de suelo debido a la escorrentía en las parcelas agrícolas que conforman, en mayor o menor medida, la cuenca objeto de estudio.

3.2. Propuesta para alertas de rendimiento del riego

Una de las principales innovaciones identificadas en nuestro Fab-Lab son alertas en tiempo real basadas en la monitorización de la escorrentía. Se propone implementar alertas en las que se establezca un umbral de intervención basado en la cantidad de los flujos de retorno de la cuenca, que se activará cuando se exceda una determinada tasa de escorrentía.

El umbral ilustrado en la Fig. 6, es un sexto de la capacidad de riego de los hidrantes en la cuenca. Esta es la base del desarrollo, en proceso, de un sistema de alarma para mejorar el rendimiento del riego. Para ello, se continuará analizando el resto de episodios de escorrentía debidos al riego y registrados durante el periodo de estudio.

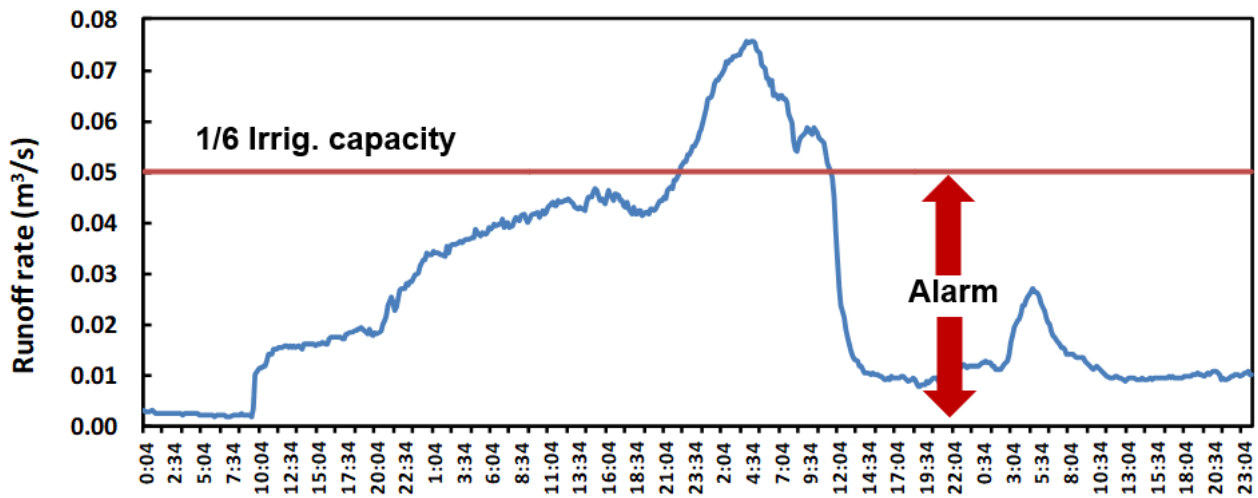


Figura 6. Episodio hidrológico causado por el riego el 22 de julio de 2014. La línea roja horizontal delimita el umbral de alarma, que ha sido basado en la capacidad de los hidrantes de la cuenca.

Otra de las innovaciones aún no implementadas en nuestro Fab-Lab es explorar la posibilidad de desarrollar alarmas de la calidad del agua de escorrentía, lo que requiere la disponibilidad de medidas mediante una sonda multiparamétrica.

4. Conclusiones

Los modelos ANCOVA han permitido simular, de una forma sencilla, valores razonables de escorrentía como respuesta a las precipitaciones en la cuenca de estudio. El mejor ajuste se encontró al introducir variables de las precipitaciones 10 días antes del episodio, y las precipitaciones en los diferentes trimestres del año hidrológico de estudio.

Se analizaron datos de episodios de riego para un año tipo, los resultados muestran un valor bajo para el coeficiente de escorrentía y una alta eficiencia del riego, mientras que el abastecimiento de agua relativo refleja una estrategia de riego deficitario. Por último se han abordado los criterios y reglas para el desarrollo de un sistema de alerta en caso de rotura o mal uso del sistema de riego, basado en la monitorización del agua de escorrentía. Estos resultados han sido debatidos regularmente por los miembros del Fab-Lab, examinando las mejoras potenciales de la eficiencia del riego a escala de parcela y cuenca.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del proyecto HubIS, perteneciente al Programa PRIMA (con fondos para CSIC de la Agencia Estatal de Investigación. PCI2020-112125). Nos gustaría

también agradecer el trabajo de D. Lozano and M. Salmoral en el mantenimiento de la cuenca, así como la ayuda del personal y regantes de la zona regable Genil-Cabra.

Queremos hacer una mención especial a nuestro querido Luciano, autor de este trabajo y su motor principal, que nos dejó el pasado diciembre de 2022.

Referencias

1. Allen. R.G., Pereira. L.S., Raes. D., Smith. M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome. Italy.
2. Borga. M., Morín E., 2014. Characteristics of flash flood regimes in the Mediterranean region. In: Diodato. N., Bellochini. G., (Eds.). Storminess and Environmental Change Climate Forcing and Responses in the Mediterranean Region. Springer. Dordrecht. pp. 65-76.
3. Casalí. J., Gastesi. R., Alvarez-Mozos. J., De Santisteban. L.M., Del Valle de Lersundi. J., Giménez. R., Larrañaga. A., Goñi. M., Aguirre. U., Campo. M.A., López. J.J., & Donézar. M., (2008). Runoff. erosion. and water quality of agricultural watersheds in central Navarre (Spain). *Agric. Water Manage.* 95. 1111-1128.
4. Duarte. A.C., Mateos. L., 2022. How changes in cropping intensity affect water usage in an irrigated Mediterranean catchment. *Agric. Water Manag.* 260 (2022). Article 107274.
5. Mateos. L., González-Dugo. M.P., Testi. L., Villalobos. F.J., (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. *Agricultural Water Management.* 125:81-91.
6. Molden. D.J., Gates. T.K., 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water-delivery systems. *J. Irrig. Drain. Eng.* 116. 804-823.
7. Rodríguez Álvarez. F. J., Salgado. R., Lozano. D., García-Vila. M., Soriano. M. A., Mateos. L. (2019). Balance hídrico de una cuenca regable al sur de España utilizando técnicas de teledetección. *Actas del XXXVII Congreso Nacional de Riegos.* Junio 2019. Don Benito. Badajoz. Spain. DOI 10.17398/AERYD.2019.A12.