



A-12

BALANCE HÍDRICO DE UNA CUENCA REGABLE AL SUR DE ESPAÑA UTILIZANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN

Rodríguez Álvarez, F. J. (1,3), Salgado, R. (2,3), Lozano, D. (3), García-Vila, M. (3), Soriano, M. A. (4), Mateos, L.(P) (3).

¹ Estudiante, Máster en Producción, Protección y Mejora Vegetal, Universidad de Córdoba, Córdoba, España, z62roalf@uco.es

² Investigador, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria-Estación Experimental Agropecuaria Santiago del Estero, Argentina, salgado.ramiro@inta.gob.ar

³ Investigadores, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Alameda del Obispo, Córdoba, España, luciano.mateos@ias.csic.es

⁴ Profesora, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, España, aq1sojim@uco.es

Resumen

Se caracterizaron y evaluaron eventos hidrológicos en la estación de lluvias 2015-2016 y la calidad del riego entre el 21 de abril y 30 de septiembre de 2016 en una cuenca agrícola en la Zona Regable Genil-Cabra, al suroeste de Córdoba, España. El balance hídrico asumió que la percolación profunda fue despreciable ya que bajo el suelo subyacen margas impermeables a poca profundidad, siendo los flujos de salida solo la escorrentía (E_s) y la evapotranspiración de los cultivos (ET_c), esta última derivada de los índices de vegetación. La precipitación (P) y el agua de riego suministrada (R) fueron los flujos de entrada. Los indicadores de calidad del riego evaluados fueron el Coeficiente de Escorrentía (CE), Suministro Relativo de Agua (SRA), Suministro Relativo de Riego (SRR) y la Eficiencia de Aplicación del Riego (EA). La P fue 306 mm y la E_s 23 mm, con un CE de 7,5% para 27 eventos hidrológicos. R fue 56 mm, P 22 mm y E_s 0,24 mm, para el período de 1 de junio al 30 de septiembre de 2016. La ET_c para el conjunto de cultivos fue de 204 mm. El riego aplicado fue inferior al requerido ($SRR = 0,38$), indicando la práctica de riego deficitario, con una alta eficiencia de aplicación del agua de riego ($EA = 0,99$ y $CE = 0,31\%$), y que las precipitaciones no compensan la demanda de los cultivos ($SRA = 0,36$). Los sistemas de información geográfica, combinados con técnicas de teledetección, son herramientas muy útiles, casi imprescindibles, para los estudios hidrológicos de cuencas agrícolas, mejorando la precisión de los balances de agua. El patrón de escorrentía en respuesta a la lluvia observado en la cuenca de estudio concuerda con observaciones anteriores y permite predecir un CE aproximado para cada situación o episodio de lluvia en función de la humedad precedente. El riego en la cuenca de estudio es altamente eficiente y deficitario.

1- Introducción

Uno de los factores fundamentales que ha contribuido a la intensificación de la producción agrícola ha sido el regadío, aumentando la productividad de los cultivos y proporcionando, además, estabilidad a las producciones agrícolas y a los sectores que dependen de la misma.

A su vez, la producción agrícola debe incrementarse en los años venideros para poder satisfacer la demanda futura de alimentos, que, según estimaciones de la FAO (2015), aumentará en un 60% para 2050, por lo que el incremento de la producción agrícola y la seguridad alimentaria mundial van a depender de la expansión del regadío. Sin

embargo, la expansión del regadío está limitada por la escasez de recursos hídricos (actualmente la agricultura consume a nivel mundial el 70% de la totalidad de las captaciones de agua dulce) y por la disponibilidad de suelos con adecuada capacidad productiva para estas nuevas producciones.

La cuenca agrícola es la unidad apropiada para la gestión, monitorización y evaluación del desempeño del uso del agua (Soriano et al., 2015). Mediante la monitorización de las mismas se obtienen, fundamentalmente, datos de cantidad de agua, sedimentos y agroquímicos exportados fuera de la cuenca, que pueden ser usados para realizar balances hídricos y evaluaciones ambientales del uso del agua. Esta información permite desarrollar recomendaciones y estrategias del uso del agua de riego, para maximizar sus beneficios y minimizar los impactos ambientales.

Por otra parte, el creciente desarrollo tecnológico permite la disponibilidad de más herramientas y métodos más precisos de trabajo, sistemas más eficientes de riego, acceso a fuentes de información a diferentes niveles de detalle (caudales utilizados para riego, precipitación, variables climáticas, etc.), que junto al uso de herramientas como la teledetección, los Sistemas de Información Geográfica y el análisis de imágenes satelitales permiten una caracterización más precisa de las parcelas de cultivo y de la variabilidad en el manejo del agua entre los agricultores (González-Dugo et al., 2013).

Diferentes estudios llevados a cabo en las cuencas del sur de España han evaluado el impacto de la actividad agrícola, determinando las relaciones entre los diferentes factores que influyen en el impacto ambiental (uso del agua, erosión hídrica, intensidad de precipitaciones, etc.) dentro de las mismas (Cid et al., 2016; Fernández et al., 2007). A pesar de ello, todavía falta conocimiento para establecer las relaciones entre los procesos hidrológicos que suceden en una cuenca y las prácticas llevadas a cabo por los agricultores. Por este motivo, resulta de gran importancia poder caracterizar los diferentes eventos hidrológicos que suceden en una cuenca agrícola mediante un balance de agua, cuantificando los ingresos y salidas de agua, junto con la evaluación de los efectos en el desempeño del riego.

2- Objetivo

Caracterizar y evaluar los eventos hidrológicos y la calidad del riego en una cuenca agrícola mediante un balance hídrico y utilizando técnicas de teledetección.

3- Área de estudio

La cuenca agrícola de estudio (cuenca del arroyo Fontanarejo) se encuentra situada dentro del término municipal de Santaella, en la Zona Regable Genil-Cabra, margen derecho del río Genil, al suroeste de la provincia de Córdoba, España. El relieve es típico de campiña: colinar, con pendientes en general suaves y una densa red natural de drenaje superficial (Figura 1).

El agua de riego procede del embalse de Iznájar, en el río Genil, que continúa su recorrido hasta el embalse de Cordobilla, donde está situada la estación principal de bombeo de agua de riego del sistema al canal principal. La gestión de la zona regable está a cargo de la Comunidad de Regantes Genil-Cabra, Colectividad de Santaella (Sectores hidráulicos del VIII al XVI), donde el riego es a la demanda y el suministro de agua es controlado individualmente para cada toma asociada a cada parcela mediante contadores.

El clima de la Zona Regable Genil-Cabra es mediterráneo continental, caracterizado por inviernos fríos y verano secos y calurosos. La precipitación anual media es de 498 mm,

presentando una gran variabilidad interanual (extremos: 300 mm en años secos; 900 mm húmedos). La evapotranspiración de referencia (ET_0) anual en la zona está alrededor de 1300 mm, alcanzándose los valores diarios máximos en el mes de julio. Los suelos predominantes en la cuenca de estudio son vertisoles y otros suelos poco desarrollados (regosoles y litosoles) (Fernández et al., 2007). Los cultivos principales son olivar, cereales de invierno (trigo), girasol, algodón, maíz, ajo, cebolla, hortalizas de verano (melón y sandía), todos bajo aspersión o riego por goteo.

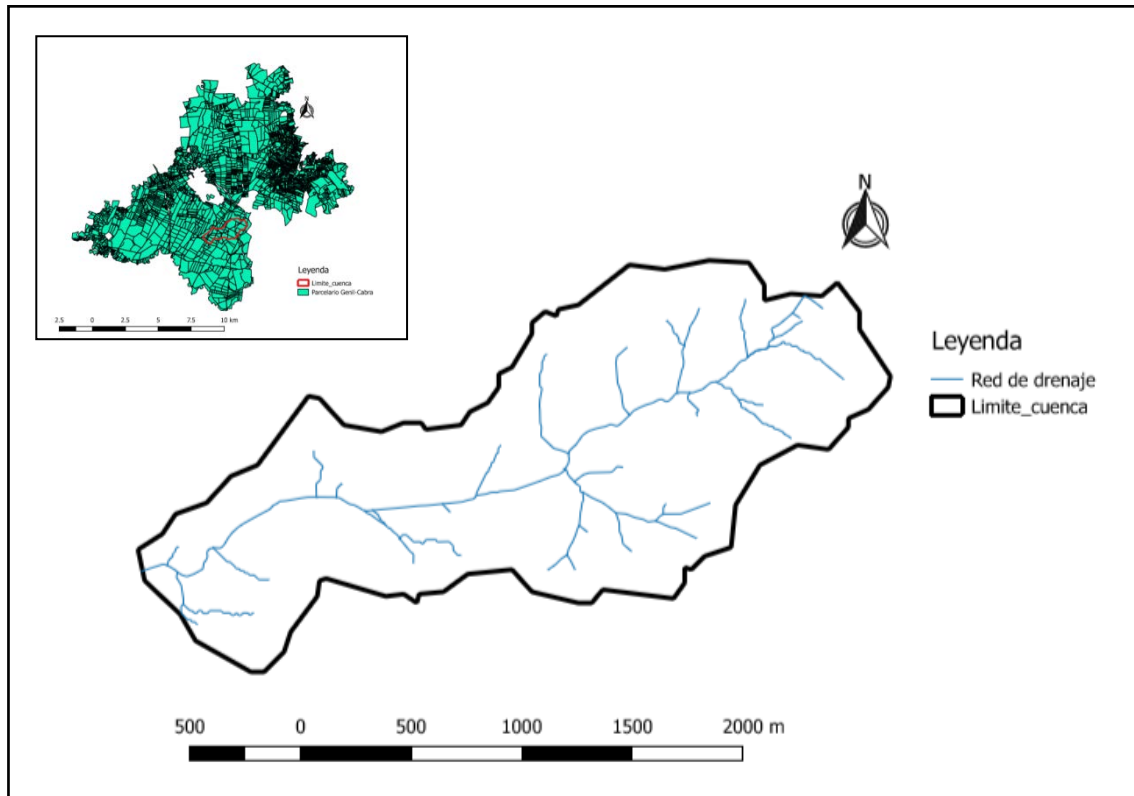


Figura 1. Mapa de la red de drenaje en la cuenca agrícola 'arroyo Fontanarejo' (Santaella, Zona Regable Genil-Cabra) y su localización en la Colectividad de Santaella.

4- Materiales y Métodos

La dinámica de los flujos de entrada y salida de agua en la cuenca agrícola se contabilizó mediante la ecuación de balance de agua. Los términos de la ecuación de balance de agua son: precipitación (P), riego (R), evapotranspiración (ET), escorrentía superficial y subsuperficial (Es), percolación profunda (I) y variación en el almacenamiento de agua en el suelo (ΔS). En los suelos de la cuenca agrícola de estudio existe una capa de margas impermeables a poca profundidad, haciendo que los flujos de retorno provengan solamente de la Es (Fernández et al., 2007; Gómez, 2014) y que la percolación profunda pueda considerarse despreciable ($I = 0$), simplificando la ecuación del balance de agua en la cuenca agrícola:

$$P + R = ET + Es + \Delta S \quad (1)$$

donde las entradas de agua en la cuenca se registraron en los pluviómetros localizados en la cuenca (P) y de las lecturas de los contadores en cada toma de riego (R). Las salidas de agua se registraron en la estación hidrológica o de aforo situada en el límite suroeste de la

cuenca, en el punto de desagüe (E_s), la evapotranspiración de los cultivos (ET_c) se estimó combinando técnicas de teledetección, basadas en la relación casi lineal entre los índices de vegetación, que para este caso fue el "Normalized Difference Vegetation Index" ($NDVI$) (Rouse et al., 1974), y el coeficiente de cultivo basal (Mateos et al., 2013), con un modelo de balance de agua en el suelo basado en la metodología propuesta por el manual FAO-56 (Allen et al., 1998) y descrito en Mateos (2007).

Para la estimación del $NDVI$ se han utilizado 13 imágenes de los satélites Landsat 7 y 8 de la aplicación EEFlux de Google Earth Engine. Debido a la baja disponibilidad de imágenes libres de nubes en invierno, el balance hídrico solo se realizó para los meses de verano. Por lo tanto, la parte de este estudio que utilizó las estimaciones de la ET_c se llevó a cabo entre el 1 de junio y 30 de septiembre de 2016, y el inicio del balance hídrico se consideró a partir del 21 de abril por las abundantes lluvias caídas anteriormente, asumiendo que el contenido de agua en el suelo estaría próximo a capacidad de campo.

La información de los límites de las subparcelas (terreno ocupado por un cultivo) fue corroborada con visitas sobre el terreno y la toma de puntos con sistema GPS, entrevistas a los agricultores y con la ayuda de fotografías aéreas de la zona de estudio. Luego, utilizando la herramienta "Estadística de zona" de QGIS (Sistema de Información Geográfica de licencia libre y código abierto) se obtuvieron los valores medios del $NDVI$ para cada una de las subparcelas de cultivo. La información de las características de los suelos, necesaria para incorporarla en el modelo de balance de agua, se tomó de estudios previos en la zona (Fernández et al., 2007). La información referente a los cultivos se tomó del manual FAO-56 (Allen et al., 1998) y de estudios previos (Mateos et al., 2013). Para la estimación de la ET_c derivada del $NDVI$ se utilizó un conjunto de hojas de cálculo (Mateos, 2007) que asociadas a la herramienta "Macros" en Microsoft Excel permitió automatizar las tareas de cálculos.

Los indicadores de calidad del riego son útiles para la descripción y evaluación del riego (Malano y Burton, 2001; Malano et al., 2004). Continuando estudios previos (Lorite et al., 2004; Fernández et al., 2007; Gómez, 2014), y una vez establecido el balance de agua en la cuenca, se calcularon los siguientes índices de desempeño del riego que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 1. Indicadores de calidad del riego utilizados en el estudio.

Indicador	Fórmula
Coeficiente de Escorrentía (CE)	$CE = \frac{E_s}{P + R} \quad (2)$
Suministro Relativo de Agua (SRA)	$SRA = \frac{P + R}{ET_c} \quad (3)$
Suministro Relativo de Riego (SRR)	$SRR = \frac{R}{R \text{ requerido}} \quad (4)$
Eficiencia de Aplicación del Riego (EA)	$EA = \frac{R - E_s}{R} \quad (5)$

5- Resultados y Discusión

Una cuenca agrícola como la de este estudio suele tener un comportamiento hidrológico muy diferente durante el periodo de lluvias y durante la campaña de riego. Por ello, el análisis de los eventos de precipitación-escorrentía comenzó el 1 de noviembre de 2015, fecha de las primeras precipitaciones del año hidrológico, y finalizó el 31 de mayo de

2016, cuando finalizó la estación de lluvias en la cuenca. Los eventos se clasificaron en función de la magnitud del caudal máximo de Es : eventos con caudales punta menores a 50 l s^{-1} (a), eventos intermedios entre 50 l s^{-1} y 120 l s^{-1} (b) y eventos que superan los 120 l s^{-1} (c) (Tabla 2).

Tabla 2. Número y tipo de eventos de precipitación (P) y escorrentía (Es), fechas de inicio, finalización y su duración (T), intensidad máxima de la precipitación (I_{max}), caudal máximo escurrido (Q_{max}) y coeficiente de escorrentía (CE).

Nº	Tipo	Inicio	Fin	T (h)	P (mm)	I_{max} (mm h ⁻¹)	Es (mm)	Q_{max} (l s ⁻¹)	CE (%)
1	c	01/11/15	06/11/15	115	43,8	10,0	3,46	638,4	7,9
2	a	02/12/15	04/12/15	42	0	0	0,26*	11,8	-
3	a	06/12/15	12/12/15	135	0	0	0,28*	9,7	-
4	a	13/12/15	21/12/15	200	0,4	0,2	0,12	14,8	12,2
5	b	31/12/15	04/01/16	99	9,8	1,6	0,78	74,3	8,0
6	b	04/01/16	06/01/16	47	18,0	8,6	0,63	89,7	3,5
7	c	09/01/16	10/01/16	45	19,4	13,2	1,68	448,4	8,6
8	b	13/01/16	14/01/16	38	0,2	0,2	0,57	100,6	56,6
9	b	15/01/16	17/01/16	50	1,2	0,4	0,27	54,8	22,1
10	b	19/01/16	21/01/16	62	2,0	0,8	0,45	81,3	22,7
11	a	25/01/16	31/01/16	155	8,8	3,4	0,29	26,9	3,3
12	b	01/02/16	01/02/16	16	0,2	0,2	0,38	104,8	189**
13	b	10/02/16	12/02/16	33	7,4	3,8	0,27	62,9	3,6
14	a	12/02/16	14/02/16	46	2,8	0,6	0,27	39,9	9,8
15	a	26/02/16	27/02/16	23	11,0	1,4	0,22	32,2	2,0
16	a	15/03/16	20/03/16	109	8,6	2,6	0,33	15,8	3,9
17	a	20/03/16	26/03/16	151	9,4	3,8	0,37	13,3	3,9
18	a	30/03/16	03/04/16	91	0	0	0,18*	9,5	-
19	c	04/04/16	05/04/16	45	29,2	8,8	2,78	333,9	9,5
20	b	12/04/16	15/04/16	77	13,0	3,4	0,96	47,9	7,4
21	b	16/04/16	17/04/16	24	7,0	6,0	0,32	74,3	4,6
22	c	19/04/16	21/04/16	63	21,8	4,6	2,87	291,1	13,2
23	c	07/05/16	09/05/16	34	18,6	5,4	1,31	473,6	7,9
24	c	09/05/16	10/05/16	26	10,2	3,2	1,79	310,4	17,5
25	c	10/05/16	11/05/16	29	9,6	5,6	2,68	510,2	28,0
26	a	17/05/16	25/05/16	199	1,6	0,4	0,12	12,1	7,6
27	a	28/05/16	31/05/16	86	52,0	21,2	0,13	22,5	0,3

* Eventos asociados al riego de los cultivos.

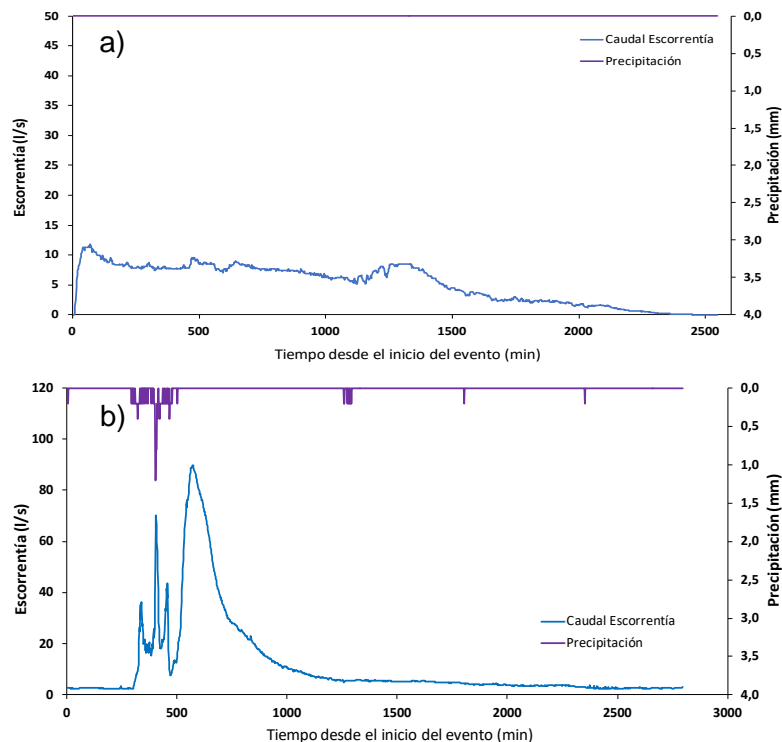
** Eventos asociados a posibles roturas de tuberías de riego.

P y Es fueron 306 mm y 23 mm, respectivamente, con un CE del 7,5%, siendo este último muy inferior al 25% reportado por Fernández et al. (2007) para octubre de 2005 a abril de 2006. Sin embargo, fue superior al 1,3% que reportó Gómez (2014) para el período de 1 de octubre de 2011 a 31 de mayo de 2012, en un año notablemente más seco (191 mm de P acumulada durante el periodo de análisis). No obstante, guarda coherencia con lo

reportado por Cid et al. (2016) ($CE = 14\%$) para una serie de años en una cuenca cercana a la de este estudio, aunque de menor tamaño.

En mayo se registró la mayor P , con 92 mm, y la Es asociada fue de 6 mm, con un CE del 6,6%. En enero la P fue 59 mm y la Es 4,7 mm, con un CE del 7,9%. A pesar de que la P fue menor en enero que en mayo, el CE fue mayor, debido principalmente al mayor contenido de agua en el suelo por las lluvias precedentes, sumado a que en invierno la demanda evaporativa es más baja y que parte de la cuenca se encuentra sin cultivos. Este comportamiento ya fue observado detalladamente por Duarte (2006) en una cuenca de regadío similar en Portugal.

El evento tipo “a” observado en la Figura 2a presenta una Es debida a los riegos (de pre-emergencia o establecimiento) de cultivos hortícolas de invierno (ajo). La Figura 2b representa un evento de tipo “b”, donde la Es es generada por las precipitaciones previas. El mismo ocurrió cuando el suelo de la cuenca se encontraba húmedo, dando lugar a un aumento rápido de la escorrentía tras el inicio de la precipitación. La escorrentía alcanzó su caudal máximo poco después de que la lluvia cayera con máxima intensidad, y la fase de receso del hidrograma duró mucho más que la de crecida (Soriano et al., 2015; Cid et al., 2016). En la Figura 2c se representa un evento extraordinario producido por una rotura en la red de tuberías de riego que originó la Es . La Figura 2d representa un evento tipo “c” ocurrido tras un período sin lluvia, lo que explica que las primeras lluvias no originaran escorrentía ya que el suelo se encontraba seco, pero sí iban humedeciendo el mismo.



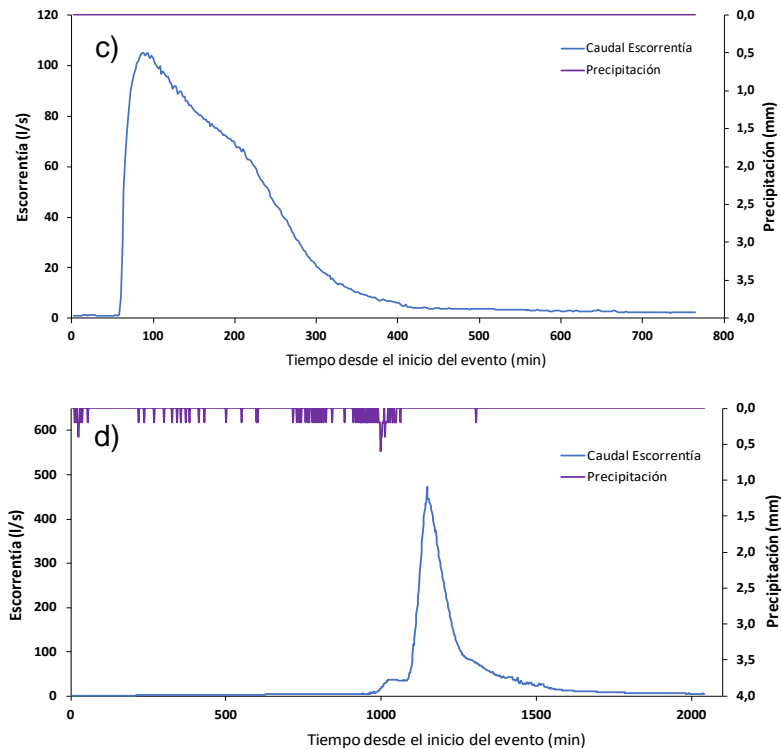


Figura 2. Hidrogramas de descarga de los eventos a) N° 2, b) N° 6, c) N° 12 y d) N° 23 en la cuenca de estudio.

La Figura 3 nos muestra la ET_c durante el periodo de riego (1 de junio al 30 de septiembre de 2016) para cada parcela de cultivo. Los valores mínimos presentados corresponden a las superficies ya cosechadas (sin cultivo), mientras que los valores superiores corresponden a los cultivos hortícolas (melón, sandía) y a las superficies con olivar adulto (intensivo y seto).

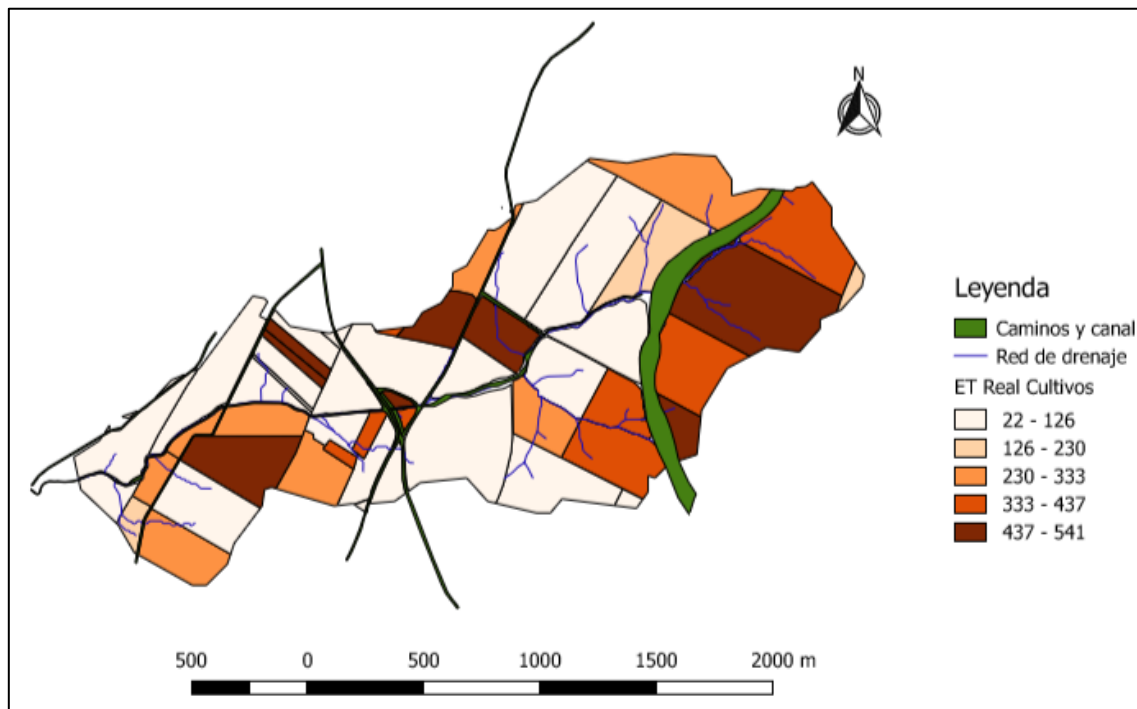


Figura 3. Valores de ET_c (mm) para cada parcela de cultivo en la cuenca hidrográfica "arroyo Fontanarejo" en el periodo 1 de junio al 30 de septiembre de 2016.

Tabla 3. Balance de agua en la cuenca agrícola (1 de junio al 30 de septiembre de 2016).

Componente del Balance de Agua	(mm)
Precipitación	22,4
Riego	56,1
ET_c	204
Escorrentía	0,24
Humedad del suelo inicial	380
Humedad del suelo final	254
Balance final	0,0

Tabla 4. Valores obtenidos de los indicadores de desempeño del riego en la cuenca agrícola (1 de junio al 30 de septiembre de 2016).

Indicador	
Suministro relativo de agua (SRA)	0,38
Suministro relativo de riego (SRR)	0,36
Eficiencia de aplicación del riego (EA)	0,99
Coeficiente de escorrentía (CE ; %)	0,31

El riego aplicado fue inferior al requerido ($SRR < 1$) o bien el riego en la cuenca fue globalmente deficitario. A pesar de tener en cuenta el aporte de las P durante el periodo, no se compensa la demanda de los cultivos ($SRA < 1$) (Tabla 6). Estos resultados concuerdan con los estimados por Lorite et al. (2004) durante cuatro temporadas de riego en la Zona Regable del Genil-Cabra, y con los medidos por Gómez (2014) en la misma cuenca en la estación de riego en el año 2012.

La dosis de riego aplicada fue superior en los cultivos hortícolas, seguidos del olivar adulto, mientras que el olivar joven y el girasol recibieron una dosis de riego menor. El SRR para el olivar fue de 0,7. Para olivar en seto (plantación de segundo año) fue 0,4 y para el olivar intensivo (plantación primer año) fue 1,2. Lorite et al. (2004) reportaron valores de $SRR < 1$ en el olivar bajo riego para esta área y Gómez (2014) de 0,35 para olivar en la misma cuenca. Esto confirma la práctica del riego deficitario en el olivar.

Las parcelas con cultivos hortícolas presentaron un valor de SRR de 0,9, deduciendo que estos no sufrieron déficit hídrico. Esto explica que el riego aplicado es generalmente próximo al requerido para alcanzar la máxima producción. Gómez (2014) reportaron valores de SRR entre 1,15-1,33 para hortícolas (pimiento, calabacín y melón).

El CE en la cuenca fue despreciable (0,31%) durante el período de análisis, debido a las escasas precipitaciones y a la aplicación de riego deficitario a los cultivos. La EA fue del 99,6% por el buen uso de los sistemas de riego, una adecuada programación de los riegos

por parte de los agricultores y al hecho, sobre todo en este caso, de que el riego fue globalmente deficitario en la cuenca de estudio, así como en general lo es en la zona regable.

6- Conclusiones

Los sistemas de información geográfica, combinados con técnicas de teledetección, son herramientas muy útiles, casi imprescindibles, para los estudios hidrológicos de cuencas agrícolas ya que mejoran su precisión. El patrón de escorrentía en respuesta a la lluvia observado en la cuenca de estudio concuerda con observaciones anteriores y permite estimar un *CE* aproximado para cada situación o episodio de lluvia. El riego en la cuenca de estudio es altamente eficiente y deficitario.

7- Bibliografía

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage *Paper* No. 56. Rome, Italy.

Cid, P., Gómez-Macpherson, G., Boulal, H., & Mateos, L. (2016). Catchment scale hydrology of an irrigated cropping system under soil conservation practices . *Hydrological Processes*, 30, 4593-4608.

Duarte, A.C. (2006). Contaminación difusa de los recursos hídricos superficiales originada por la actividad agrícola de riego, a la escala de la cuenca hidrográfica. Tesis Doctoral. Noviembre 2006. Universidad de Córdoba.

Fernández, M., Carmona, M., Mateos, L., & Fereres, E. (2007). Comportamiento del riego a la escala de una pequeña cuenca. En: Metodologías e instrumentos para la planificación y la gestión sostenible del riego en condiciones de escasez de agua, Proyecto MIP AIS, pp. 31-50. Córdoba.

Gómez, C. (2014). Estudio de balance hídrico y caracterización de los flujos de retorno en una cuenca de regadío (Zona Regale Genil-Cabra). Trabajo Profesional de Fin de Carrera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba.

González-Dugo, M., Escuin, S., Cano, F., Cifuentes, V., Padilla, F., Tirado, J., Mateos, L. (2013). Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images II. Application on basin scale. *Agricultural Water Management*, 125, 92-104.

Lorite, I., Mateos, L., & Fereres, E. (2004). Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers. *Irrigation Science*, 23, 82-92.

Malano, H., & Burton, M. (2001). Guidelines for Benchmarking Performance in the Irrigation and Drainage Sector. In: International Programme for Technology and Research in Irrigation and Drainage (IPTRID), Rome, Italy. 44 pp.

Malano, H., Burton, M., & Makin, I. (2004). Benchmarking performance in the irrigation and drainage sector: a tool for change. *Irrigation and Drainage. The journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 53(2), 119-133.

Mateos, L. (2007). Metodología "MIPAIS" para el riego en condiciones de escasez de agua. En: Metodologías e instrumentos para la planificación y la gestión sostenible del riego en condiciones de escasez de agua, pp. 25-29. Córdoba.

Mateos, L., González-Dugo, M., Testi, L., & Villalobos, F. (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.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). (2015). El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo 2015: cumplimiento de los objetivos internacionales para 2015 en relación con el hambre: balance de los desiguales progresos.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Deering, D. W. & Sehell, J. A., (1974): Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation. Final Rep. RSC 1978-4, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station

Soriano, M., García-Vila, M., Gómez-Armayones, C., & Mateos, L. (2015). Irrigation return flows at catchment scale. *Emerging Technologies for Sustainable Irrigation*, ASABE/IA Irrigation Symposium, Paper Number: 2147621. Long Beach, California, November 10–12, 2015.