



ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y REGADÍO. EL CASO DE LA COMUNIDAD DE REGANTES DEL VALLE INFERIOR DEL GUADALQUIVIR

van de Loo, M.R.^{1,*}, Flores Cayuela, J.A.¹, Fernández García, I.², Rodríguez Díaz, J.A.², Camacho Poyato, E.²

¹ Investigador/a contratado/a, Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba

² Catedrático/a, Departamento de Agronomía, Área de Ingeniería Hidráulica. Universidad de Córdoba. Campus de Rabanales, Edif. Leonardo da Vinci, 14071. Córdoba

**maaike.vandelloo@wur.nl*

RESUMEN

En el actual contexto de escasez de recursos hídricos y elevados costes energéticos es cada vez más frecuente encontrar grandes consumidores de energía que apuestan por el uso de las energías renovables, entre las que destaca la energía solar fotovoltaica. Cuando se da esta situación, es indispensable encontrar un óptimo en la gestión del nexo agua-energía, a la vez que se reducen los costes del consumo. Este es el caso de la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir, que cuenta con una planta solar fotovoltaica de generación de 6 MWp; y de la que se han analizado los datos referentes al consumo de agua y a la generación y consumo de energía, así como posibles alternativas de manejo y organización del riego con el fin de proponer mejoras para un mayor y mejor uso de la energía solar generada. En este sentido, se ha analizado la posibilidad de concentrar el riego durante el día, reduciendo las horas de riego disponibles; una alternativa con la que se pueden conseguir ahorros en la cantidad de energía consumida de la red entre el 25 y el 50 %, lo que se traduce en un ahorro en el coste energético del 20-40 %.

Palabras clave

Energía solar fotovoltaica, Comunidades de Regantes, Autoconsumo energético

1. INTRODUCCIÓN

Con fuentes de agua cada vez más escasas debido al crecimiento económico y a los efectos del cambio climático, cada vez son más las nuevas técnicas que se están implementando en el sector agrícola para usar conseguir un uso más eficiente del agua. Una medida de ahorro de agua es el cambio del riego superficial a sistemas de riego a presión, tales como los sistemas de aspersión y goteo [1]. Estos sistemas tienen como objetivo el ahorro de agua, pero un efecto negativo de este cambio es el aumento significativo de los requerimientos energéticos de los sistemas de riego [2]. Para combatir estos mayores costes energéticos, la energía solar se ha convertido en una alternativa realmente interesante para los sistemas de suministro de agua de riego. Sin embargo, además de la conocida ventaja de que la energía solar es más sostenible que los combustibles fósiles, el uso de energía solar para riego también presenta desafíos, por ejemplo, hacer coincidir la disponibilidad de energía solar con la demanda de riego. Este es especialmente el caso en las grandes redes de distribución de

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

agua donde el riego es bajo la demanda, como es el caso de muchas de las Comunidades de Regantes (CC.RR.). Por lo tanto, este trabajo se centra en una mejor comprensión del equilibrio de la energía solar producida y el uso del agua en grandes sistemas de riego que utilizan energía solar.

La Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir (Sevilla) es un claro ejemplo de sistema de riego a gran escala, que comenzó a usar la energía solar fotovoltaica en 2019 con el fin de satisfacer parte de su elevada demanda energética y reducir así sus costes. Esta comunidad de regantes cuenta con una gran planta solar fotovoltaica, de 6 MWp, capaz de producir energía para satisfacer toda su demanda. Sin embargo, debido a la organización actual del riego, que permite regar las 24 horas del día, se sigue consumiendo una elevada cantidad de energía convencional de la red eléctrica. La Comunidad cuenta con un sistema de telemedida que registra la producción de energía solar y el consumo energético de ambas fuentes, convencional y solar, cada 15 minutos. Además, cuenta con la posibilidad de vender los excedentes de energía producida en la planta solar a la red eléctrica. Este trabajo, además de analizar la generación y consumo de energía solar, plantea alternativas con las que mejorar y aumentar el aprovechamiento de esa energía solar generada.

2. METODOLOGÍA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

El esquema de la Figura 1 muestra cómo se relacionan entre sí los diferentes conceptos empleados en este análisis y se utiliza a lo largo del mismo como guía para vincular los dos recursos: agua y energía. Esta investigación analiza en primer lugar las necesidades brutas de agua de riego y la disponibilidad de agua, para analizar a continuación la cantidad real de agua de riego utilizada y sus requerimientos de energía. Por último, se relacionan el consumo energético y la energía solar producida para ver cómo se puede armonizar el uso de ambos recursos. El objetivo de este trabajo no es el de proponer cambios en las infraestructuras del Valle Inferior; sino que se centra en el análisis y propuestas de mejora de la gestión del agua y de la energía en la comunidad. Los recuadros amarillos del esquema de la Figura 1 indican los conceptos en los que no es posible actuar y los blancos en los que sí.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

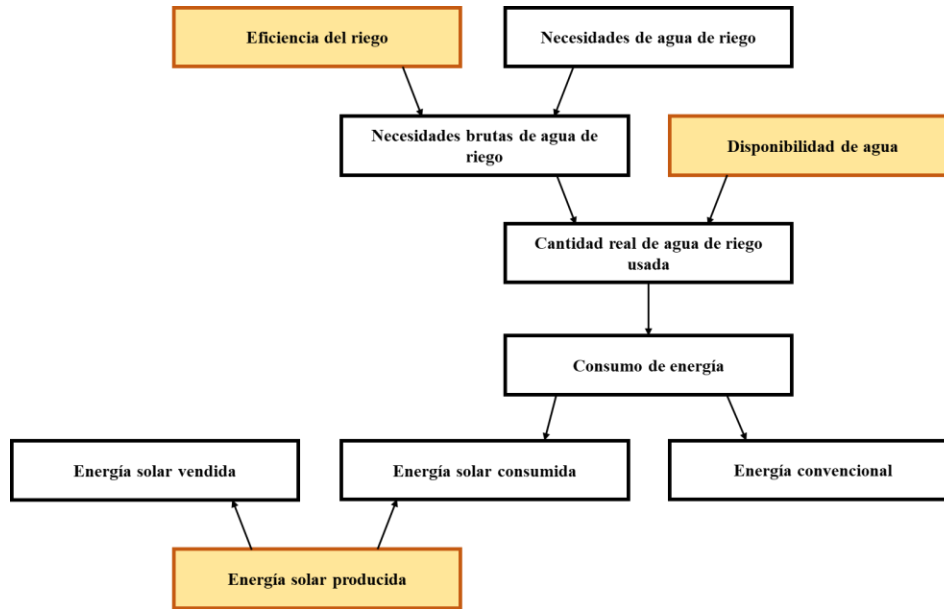


Figura 1. Esquema de los conceptos utilizados en esta investigación y sus vínculos. Los recuadros amarillos indican que estos conceptos no se ajustarán en esta investigación.

2.2. NECESIDADES DE RIEGO

Las necesidades diarias de riego neto de los cultivos son equivalentes a la evapotranspiración diaria de los mismos menos los aportes de agua de lluvia. Con el fin de compararlas con los consumos de agua reales de la comunidad, se han calculado las necesidades teóricas de riego neto de los diez cultivos mayoritarios, que suponen el 85,45 % de la superficie total regada. Estas necesidades de riego netas, o riego neto (R_n), se calculan según la siguiente fórmula:

$$R_n = ET_0 \cdot K_c - P_{ef} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia, K_c el coeficiente de cultivo y P_{ef} la precipitación efectiva, que representa la fracción de precipitación que se infiltra en el suelo y queda disponible para los cultivos.

Para poder comparar las necesidades de riego de los cultivos con el consumo de agua de la comunidad, es necesario calcular las necesidades de riego brutas (R_b) teniendo en cuenta la eficiencia de cada sistema de riego. Los principales sistemas de riego de la comunidad son el riego por goteo (62 % de la superficie) y por superficie (38 % de la superficie), sistemas que presentan unas eficiencias en su aplicación en torno al 90-95 % en el caso del goteo y del 50-60 % en el riego por superficie [3]. Teniendo en cuenta el porcentaje de cada sistema de riego dentro de la comunidad, la eficiencia global de la comunidad se ha considerado del 85 %.

2.3. INDICADORES DEL USO DEL AGUA Y LA ENERGÍA

El uso de indicadores permite evaluar el uso tanto de la energía como del agua y, al mismo tiempo, hace que se puedan comparar los datos con los de otras comunidades de regantes. Además, los indicadores son muy útiles a la hora de evaluar la relación entre el uso del agua de riego y otras variables como el coste del agua, las necesidades teóricas de los cultivos o la productividad económica, entre otros. Los principales indicadores empleados son:

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

- El suministro relativo anual de agua, RWS (Relative Water Supply). Se obtiene como la suma del volumen total de agua empleada para el riego más la precipitación efectiva dividido todo por el volumen total de agua demandada por el cultivo para satisfacer su demanda evapotranspirativa, es decir la ET_c. Su fórmula es:

$$RWS = \frac{I + P_{ef}}{ET_c} \quad (\text{Ec. 2})$$

donde I = suministro anual de agua de riego por unidad de superficie regada (mm); P_{ef} = precipitación efectiva anual (m³); y ET_c = evapotranspiración del cultivo (m³). Este indicador se utiliza para evaluar si el agua disponible es suficiente para cubrir las necesidades de los cultivos. Valores de RWS cercanos a uno indican que el agua disponible es suficiente para satisfacer las necesidades teóricas del cultivo [4].

- El suministro relativo anual de agua de riego, RIS (Relative Irrigation Supply) es la relación entre el volumen anual total de agua de riego aplicado y el volumen total de agua requerido por el cultivo menos la precipitación efectiva:

$$RIS = \frac{I}{ET_c - P_{ef}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Este valor indica si el riego aplicado es suficiente. Valores menores a uno indican riego deficitario, mientras que valores superiores a uno indican que el riego ha sido excesivo.

- El consumo de energía por unidad de superficie regada (E_S). Se define como la energía total consumida (kWh) dividida por la superficie total (ha). Este indicador se calcula tanto para la energía solar (E_{S-PV}) como para la procedente de la red (E_{S-G}).
- El consumo de energía por unidad de agua de riego suministrada (E_{IR}). Es la energía total consumida (kWh) dividida por el volumen total de agua suministrada a los agricultores (m³). Al igual que el anterior, este indicador se calcula para la energía solar (E_{IR-PV}) y para la procedente de la red (E_{IR-G}).

2.4. ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN

En este trabajo, se han estudiado distintos escenarios de manejo del riego con los que incrementar la cantidad de energía destinada a autoconsumo y, por tanto, disminuir la energía tomada de la red. Para uno de estos posibles escenarios se ha estudiado cual habría sido el ahorro económico potencial por reducir el consumo de la energía convencional.

3. RESULTADOS

3.1. USO DEL AGUA

El cultivo de cítricos es el más extendido dentro de la comunidad, con una superficie en 2021 de 7.611,74 ha, que suponían el 40,18 % del total de la superficie cultivada. Esto hace que sea el principal cultivo demandante de agua de riego; sin embargo, no es el cultivo con mayores requerimientos, siendo el algodón es el de mayores necesidades de riego con una media en los años 2020 y 2021 de 915,17 mm. Estas necesidades teóricas se corresponden con las necesidades netas de riego, por lo que para poder compararlas con los consumos de

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

agua de la comunidad es necesario calcular las necesidades brutas, es decir, el agua de riego a aplicar teniendo en cuenta la eficiencia de los sistemas de riego que se estima es del 85 %. Con esta eficiencia global de la comunidad, se pueden calcular las necesidades brutas de riego, que para la campaña de riego 2020-2021 se estiman en 172.455.884 m³, un valor muy por debajo de la dotación para esa campaña y el consumo total de agua, que fue de 58.439.944 m³, tal y como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de agua, energía, requerimientos de riego y factor energía/agua calculados por mes.

Año	Mes	Uso del agua	Requerimientos de agua de riego	Uso de energía	Producción energía solar	Factor agua/energía
		[m ³]	[m ³]	[kWh]	[kWh]	[kWh/m ³]
2020	Octubre	3.431.307	9.774.827	475.375	662.137	0,14
2020	Noviembre	1.711.292	4.054.076	132.031	474.952	0,08
2020	Diciembre	0	0	98.581	416.830	-
2021	Enero	20.779	0	85.018	496.554	4,09
2021	Febrero	34.694	1.261.268	85.134	543.231	2,45
2021	Marzo	2.824.556	11.171.231	593.180	1.025.820	0,21
2021	Abril	6.622.591	10.810.869	869.107	995.461	0,13
2021	Mayo	7.280.655	27.229.876	1.044.535	1.426.020	0,14
2021	Junio	10.245.744	32.432.607	1.597.119	1.445.793	0,16
2021	Julio	12.544.049	34.910.098	1.776.500	1.438.602	0,14
2021	Agosto	9.618.202	29.324.482	1.443.680	1.261.572	0,15
2021	Septiembre	4.106.075	11.486.548	747.479	958.166	0,18
	Total	58.439.944	172.455.884	8.947.739	11.145.138	0,15

Para la evaluación en el suministro del agua se han calculado los indicadores RWS y RIS. En el caso del RIS, el valor obtenido es 0,52, valor menor que uno que indica que existió déficit de riego. Igual ocurre con el valor de RWS, que es igual a 0,83, lo que indica que el agua disponible para satisfacer las necesidades de los cultivos durante la campaña no fue suficiente.

3.2. USO DE LA ENERGÍA

En las figuras 3 y 4 se muestra de una forma general cómo ha sido el uso de energía de la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir durante los años 2020 y 2021, diferenciando entre la energía que se ha usado de la planta solar fotovoltaica y la que se ha tomado de la red. En esta figura se observa como en los meses de invierno el consumo es mínimo, mientras que los mayores consumos se producen en los meses de verano, coincidiendo con los meses de mayores requerimientos de riego por parte de los cultivos.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

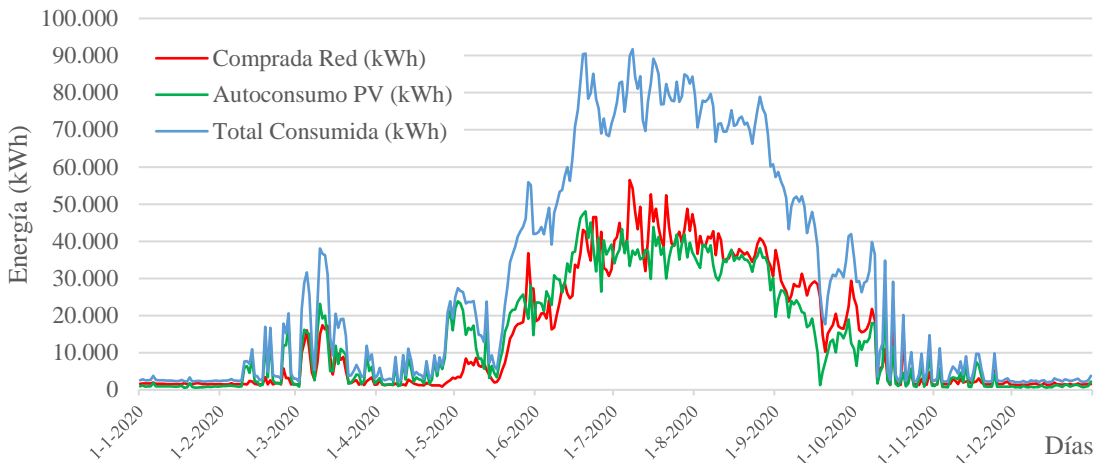


Figura 2. Consumo de energía diario durante el año 2020.

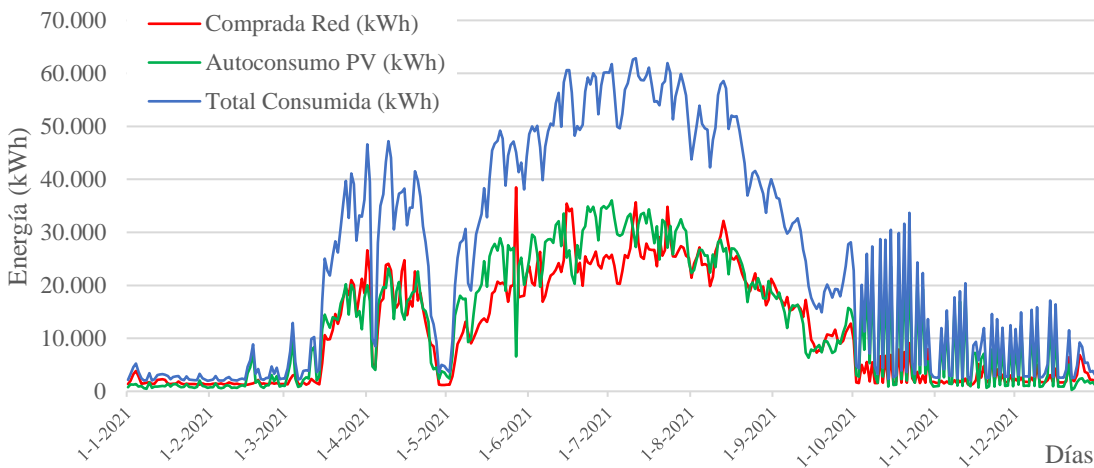


Figura 3. Consumo de energía diario durante el año 2021.

En cuanto a la producción de energía solar, esta es variable a lo largo de un año e incluso en meses en los que se presupone estable, como son los de verano, no es tal, ya que la presencia de nubes, lluvias y otros fenómenos meteorológicos provocan que haya variabilidad en la energía generada. Los días de menor generación coinciden con aquellos en los que se registraba menor irradiación que la media y en los que, en ocasiones, también se registraban precipitaciones.

La planta solar fotovoltaica de la comunidad de regantes genera anualmente más energía de la que se consume dado que solo un 45 % se destina a autoconsumo, vendiéndose el 55% restante a la red eléctrica. Por el contrario, la energía solar supone en torno al 50 % de la energía total consumida en el suministro de agua, mientras que el 50 % restante se toma de la red. Esto se debe a la organización actual del riego, en la que se permite regar a la demanda durante las 24 horas del día por lo que los sistemas de bombeo tienen que estar funcionando continuamente, de manera que durante las horas centrales del día consumen la energía generada por la planta solar, pero durante la noche, cuando la planta solar no genera, tienen que tomar la energía de la red. Además, en años de sequía con restricciones en las dotaciones

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

de agua, como son los dos años de estudio, al requerirse menos caudal en la red y, por tanto, menos potencia en la impulsión, se da la situación de que en los meses de mayor consumo energético se produce más energía de la necesaria en las horas centrales del día, lo que explica que incluso en días de máximo consumo de agua se haya vertido energía solar a la red (Figura 4).

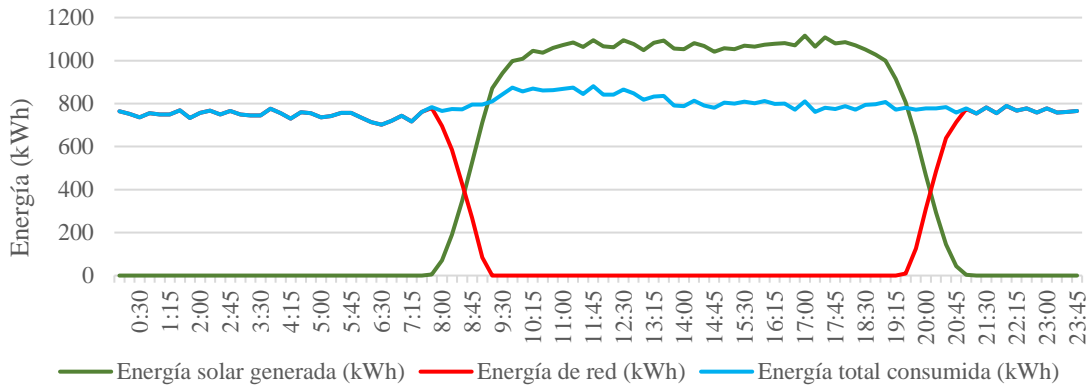


Figura 4. Evolución cuarterna de consumo y producción de energía durante el día 15 de agosto de 2020.

Para evaluar el uso de la energía de la comunidad de regantes se han calculado una serie de indicadores, muy útiles para comparar esta con otras comunidades de regantes. Comparando el valor de estos indicadores con los de otras comunidades se puede afirmar que la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir es una pequeña consumidora, ya que el uso medio por metro cúbico de agua (E_{IR}) está en torno a $0,15 \text{ kWh/m}^3$; aunque si solo se tuviese en cuenta la energía tomada de la red (E_{S-G}) este indicador bajaría hasta los $0,07-0,08 \text{ kWh/m}^3$. El uso de energía por superficie (E_S), que de media es de 512 kWh/ha , está por debajo del de otras comunidades cercanas y de características similares como son las del Genil-Cabra (654 kWh/ha), Margen Derecha del Bembézar (766 kWh/ha) o Las Coronas (1901 kWh/ha) [5]. Según los indicadores calculados en la Tabla 1 se puede concluir que la comunidad del Valle Inferior que gracias a la planta solar fotovoltaica el uso de energía convencional para impulsar cada metro cúbico de agua se ha reducido significativamente.

3.3. ESCENARIOS DE MANEJO DEL RIEGO

Con el fin de optimizar el uso de la energía generada por la planta solar se ha estudiado la posibilidad de modificar el manejo actual del riego, en el que se puede regar las 24 horas del día, para pasar a escenarios de riego en 8 y 12 horas diarias. Para ello se ha supuesto que el uso de energía constante a lo largo del día. Además, se han estudiado subescenarios con dotaciones de agua de 1.000 , 3.000 y $6.000 \text{ m}^3/\text{ha}$.

La posibilidad de depender totalmente de la energía solar depende de dos factores: el horario de riego y la disponibilidad de agua. Con un horario de riego de 24 horas, la energía convencional siempre es necesaria durante las horas en las que no se produce energía solar. Sin embargo, en los escenarios de 12 y 8 horas se puede depender completamente o casi completamente de la energía solar. En cuanto a la disponibilidad de agua, se puede observar que en los subescenarios de las restricciones 1.000 y $3.000 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Figuras 5 y 6) es más fácil

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

depender únicamente de la energía solar que en el subescenario de 6.000 m³/ha (Figura 7), ya que en estos escenarios hay menos agua disponible y también se necesita menos energía.

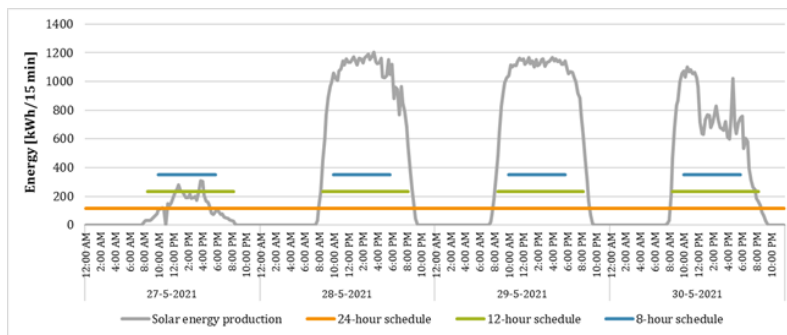


Figura 5. Energía solar producida y energía necesaria para los tres horarios de riego con una restricción de 1.000 m³/ha del 27 al 30 de mayo de 2021.

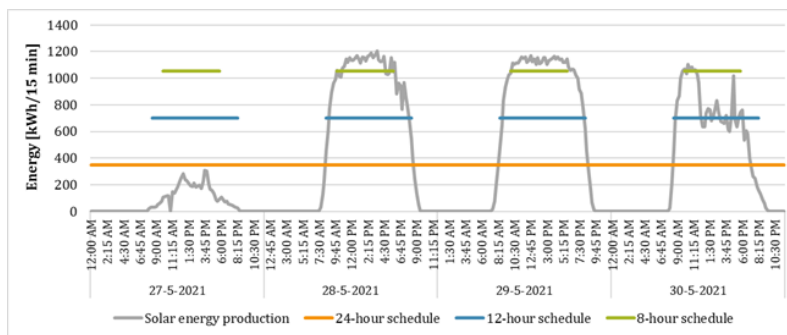


Figura 6. Energía solar producida y energía necesaria para los tres horarios de riego con una restricción de 3.000 m³/ha del 27 al 30 de mayo de 2021.

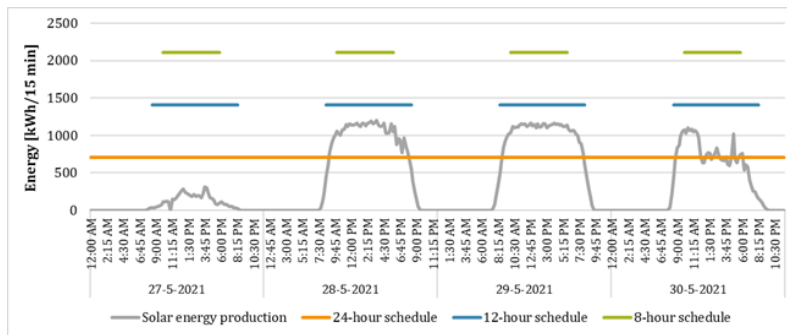


Figura 7. Energía solar producida y energía necesaria para los tres horarios de riego con una restricción de 6.000 m³/ha del 27 al 30 de mayo de 2021.

Las figuras anteriores muestran que, para poder regar todos los días, independientemente del tiempo disponible o la dotación, es necesario disponer de una fuente de energía estable además de la energía solar. Con un horario de riego de 24 horas es siempre necesario, ya que se necesita otra fuente de energía para suministrar energía durante la noche. Pero también en los escenarios de 12 y 8 horas se necesita otra fuente de energía, ya que los gráficos muestran que la energía solar, debido a su variabilidad, no es suficiente para un suministro continuo de energía. Como se puede ver en las figuras, la producción de energía solar fluctúa entre días y también a lo largo del propio día, por lo que para seguir regando cuando se producen esas fluctuaciones es necesaria otra fuente de energía.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Al trasladar lo expuesto en las figuras anteriores al resto de la campaña de riego, se estima un aumento notable en el porcentaje de la energía solar consumida sobre la total para la mayoría de los escenarios y subescenarios planteados, alcanzando valores por encima incluso del 80 %, como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentajes de energía solar consumida sobre la total para cada escenario y subescenario planteados.

Dotación	Horario de riego	Media campaña
1.000 m ³ /ha	24 h	46 %
	12 h	87 %
	8 h	98 %
3.000 m ³ /ha	24 h	43 %
	12 h	78 %
	8 h	84 %
6.000 m ³ /ha	24 h	39 %
	12 h	60 %
	8 h	61 %

Para estimar el ahorro que estos escenarios pueden suponer para el Valle Inferior, se ha analizado en profundidad el ahorro que habría supuesto en el término de energía de la factura eléctrica el haber implantado el horario de riego de 12 horas en la campaña 2020-2021, en la que la dotación fue de 1.000 m³/ha. De dicho análisis se extrae que la medida habría supuesto una reducción en la factura anual cercana al 34 %. Sin embargo, esta podría no ser una solución viable desde el punto de vista económico en años sin restricciones en la dotación, ya que, si esta es elevada, el consumo en las horas centrales del día, en las que la energía de la red es más cara, también sería mayor y, por tanto, el ahorro con respecto a la situación actual podría no ser tal. Además, habría que estudiar cómo se modificaría el término de potencia de la factura y cómo se reducirían los ingresos por la venta de excedentes. A pesar de esto, desde el punto de vista medioambiental, el escenario planteado presenta grandes ventajas, ya que al disminuir el consumo de la red también se reduce la cantidad de energía consumida procedente de fuentes de energía convencionales, es decir, no renovables.

4. CONCLUSIONES

Del análisis de los datos aportados se concluye que, gracias a la planta solar fotovoltaica, la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir ha conseguido una importante reducción del consumo de energía de la red eléctrica de hasta el 55 %, lo cual tiene importantes repercusiones en la facturación energética. Además, la creación de la planta solar ha supuesto una mayor libertad para los agricultores a la hora de organizar el riego al poder disponer de la misma presión en la red durante las 24 horas del día, y no tener que atender a las recomendaciones de regar en P6, sobre todo en el caso de agricultores con sistema de riego de presión.

No obstante, con el actual manejo del riego, tan solo el 50 % de la energía total consumida procede de la generada por la planta solar, por lo que se han estudiado otros posibles escenarios de manejo. De estos, el basado en la concentración del riego en 12 horas durante

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

el día, de haberse aplicado en la campaña de estudio, habría supuesto un autoconsumo entre cercano al 87 % de la energía total consumida. Aunque este tipo de medidas requieren de un estudio en profundidad, pues entran en juego factores, como la potencia contratada o la reducción en la venta de excedentes, que pueden hacer que no se consiga el beneficio económico esperado.

Técnicamente, los escenarios planteados son viables y pueden llegar a suponer un beneficio económico; sin embargo, de las encuestas realizadas a los agricultores de la zona se puede concluir que estos prefieren regar durante la noche para minimizar las pérdidas por evaporación, las cuales son mínimas en el sistema de riego por goteo, que es el mayoritario dentro de la comunidad. Por tanto, es evidente que para la implantación de nuevos escenarios de riego es necesario estudiar tanto la viabilidad económica como la social y que, sin ambas, cualquier medida adoptada no conseguirá los efectos esperados.

AGRADECIMIENTOS

A la Comunidad de Regantes del Valle Inferior del Guadalquivir, por todos los datos facilitados y su inestimable ayuda.

Al proyecto de investigación “Técnicas de inteligencia artificial, sensores IoT y energías renovables para la gestión sostenible de los sistemas de riego” (PID2020-115998RB-C21).

A la Unidad de Excelencia María de Maeztu DAUCO.

Nomenclatura

CC.RR.	Comunidades de regantes
E_{IR}	Consumo de energía por unidad de agua de riego suministrada
E_{IR-G}	Consumo de energía de red por unidad de agua de riego suministrada
E_{IR-PV}	Consumo de energía fotovoltaica por unidad de agua de riego suministrada
E_S	Consumo de energía por unidad de superficie regada
E_{S-G}	Consumo de energía de la red por unidad de superficie regada
E_{S-PV}	Consumo de energía fotovoltaica por unidad de superficie regada
ET_0	Evapotranspiración de referencia
I	Suministro anual de agua de riego por unidad de superficie regada
K_c	Coefficiente de cultivo
P_{ef}	Precipitación efectiva
RIS	Relative Irrigation Supply (suministro relativo anual de agua de riego)
R_b	Riego bruto
R_n	Riego neto
RWS	Relative Water Supply (suministro relativo anual de agua)

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

REFERENCIAS

- [1] J. M. Tarjuelo, J. A. Rodríguez-Díaz, R. Abadía, E. Camacho, C. Rocamora, and M. A. Moreno, “Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies,” *Agricultural Water Management*, vol. 162. Elsevier B.V., pp. 67–77, Dec. 01, 2015. doi: 10.1016/j.agwat.2015.08.009.
- [2] J. Berbel, A. Expósito, C. Gutiérrez-Martín, and L. Mateos, “Effects of the irrigation modernization in Spain,” *Water Resources Management*, vol. 33, no. 5, pp. 1835–1849, 2019.
- [3] R. Q. Grafton *et al.*, “The paradox of irrigation efficiency,” *Science (1979)*, vol. 361, no. 6404, pp. 748–750, Aug. 2018, doi: 10.1126/science.aat9314.
- [4] Luis. Pérez Urrestarazu, “Aplicación de los indicadores para el análisis de las acciones de mejora en zonas regables y para el desarrollo de un modelo de gestión integral del agua de riego.” Universidad de Córdoba, Córdoba, 2007.
- [5] J. A. Rodríguez Díaz, E. Camacho Poyato, and M. Blanco Pérez, “Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spain,” *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 137, no. 10, pp. 644–650, Oct. 2011, doi: 10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000338.