

## Evaluación del uso de predicciones climáticas para la operación de bombeos mediante energía fotovoltaica de inyección directa.

Carricondo-Antón, JM<sup>1</sup>, Jiménez-Bello, MA<sup>2</sup>, Manzano Juárez, J<sup>1</sup>, Royuela Tomas, A<sup>1</sup>, Sala Piñeras, A<sup>3</sup>.

1 Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVERT), Universitat Politècnica de València; juacaran@upv.es

2 Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València

3 Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (AI2), Universitat Politècnica de València

**Resumen:** Este trabajo presenta una propuesta donde se reduce la incertidumbre en el riego fotovoltaico (FV) directo de oportunidad mediante predicciones meteorológicas (PM), pudiendo estimar con una semana de ventana temporal (VT) la irradiancia ( $Wm^{-2}$ ), la temperatura ( $^{\circ}C$ ), la velocidad del viento ( $ms^{-1}$ ) y la humedad (%) y con ello la Potencia Neta generada por día y hora ( $P_{netD,h}$ , W) y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). Las PM son corregidas con un filtro del Kalman para el cálculo de las horas de potencia disponible (donde  $P_{netD,h} > Potencia\ requerida (P_{bD,h})$ ) y de las necesidades de riego ( $N_r$ ) y se compara frente a la forma tradicional de operar con los datos históricos y reemplazando la ET<sub>o</sub> sucedida en un periodo temporal. Además, se ha incorporado un modelo suelo-planta-agua el cual permite conocer el estado de humedad del suelo para establecer la programación del riego dentro de unos umbrales de humedad que no perjudiquen al cultivo. El objetivo es evaluar, en instalaciones con suministro energético FV, una metodología de programación de riego que utiliza las PM en lugar de los datos históricos manteniendo la humedad del suelo por encima de una humedad mínima. Se aplica en un caso real de estudio de la red de riego Camí Albalat, compuesta por 4 sectores y es gestionada por la comunidad de regantes de Massalet, próximo al término municipal de Carlet (Valencia), en el este de España. El uso de las PM a 7 días permite estimar con mayor precisión la  $P_{netD,h}$  y las Necesidades de riego ( $N_r$ ) de los cultivos, pudiendo programar con antelación el funcionamiento de la instalación. Para el caso de estudio, el error relativo diario cometido para la época de mayores  $N_r$  (1 de abril a 30 de septiembre) de la estimación de la  $P_{net}$  y de la ET<sub>o</sub> ha sido para las PM de un 26,3 % y un 6,3 % respectivamente, frente a un error utilizando los datos históricos del 50 % en la  $P_{net}$  y del 15,2 % para la ET<sub>o</sub>. La humedad en el sector de máximos requerimientos de  $P_b$  no suele alcanzar la humedad mínima establecida (es el 25% menos de la Capacidad de Campo), esto es debido a que es el sector que aprovecha primero las horas de energía disponible. En contraposición está el sector de mínimo requerimiento de  $P_b$  que sí alcanza la humedad mínima establecida debido a que es el último sector en regarse a lo largo de la semana y por ello este sector es el que más energía eléctrica requiere. Con esto, el uso de PM ha permitido mejorar el consumo de energía FV de un 68,7 % a un 79,3 % y pasar del uso de energía disponible de un 11.64 % a un 13.37 % para el caso de estudio. No obstante, toda predicción está sometida a una incertidumbre y en caso de que no se cumpla se necesita una fuente de energía adicional.

**Palabras clave:** Riego fotovoltaico, pronóstico necesidades de riego, riego de precisión, disponibilidad de energía.

B-12-2021

Scientific-technical communication

## Evaluation of the use of climate predictions for the operation of pumping using direct injection photovoltaic energy.

Carricondo-Antón, JM1., Jiménez-Bello, MA2., Manzano Juárez, J1., Royuela Tomas, A1., Sala Piqueras, A3.

1 Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVERT), Universitat Politècnica de València; juacaran@upv.es

2 Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València

3 Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (AI2), Universitat Politècnica de València

**Abstract:** This work presents a proposal where the uncertainty in direct photovoltaic irrigation (PV) of opportunity is reduced by means of meteorological predictions (PM), being able to estimate irradiance ( $Wm^{-2}$ ), temperature ( $^{\circ}C$ ), wind speed ( $ms^{-1}$ ) and humidity (%) and with it the Net Power generated per day and hour ( $P_{netD, h}$ , W) and the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). The PM are corrected with a Kalman filter to calculate the hours of available power (where  $P_{netD, h} > P_{bD, h}$ ) and the irrigation needs (In) and it is compared against the traditional way of operate with the historical data and replacing the ET<sub>o</sub> that occurred in a temporary period. In addition, a soil-plant-water model has been incorporated which allows knowing the soil moisture status to establish the irrigation scheduling within humidity thresholds that do not harm the crop. The objective is to evaluate, in facilities with PV energy supply, an irrigation scheduling methodology that uses PM instead of historical data, keeping soil moisture above a minimum humidity. It is applied in a real case study of the Camí Albalat irrigation network, made up of 4 sectors and managed by the community of irrigators of Massalet, close to the municipality of Carlet (Valencia), in eastern Spain. The use of the 7-day PM allows the  $P_{netD, h}$  and In of the crops to be estimated with greater precision, allowing the operation of the installation to be programmed in advance. For the case study, the daily relative error made for the period of older In (April 1 to September 30) in the estimation of the Pnet and ET<sub>o</sub> has been 26.3% and 6% for the PM, 3% respectively, against an error using the historical data of 50% in the Pnet and 15.2% for the ET<sub>o</sub>. The humidity in the sector with maximum Pb requirements does not usually reach the minimum humidity established (25% of the Field Capacity), this is due to the fact that it is the sector that takes advantage of the hours of available energy first. In contrast, there is the sector with the minimum Pb requirement, which does reach the minimum humidity established because it is the last sector to be watered throughout the week and therefore this sector is the one that requires the most electrical energy. With this, the use of PM has made it possible to improve the consumption of PV energy from 68.7% to 79.3% and to go from the use of available energy from 11.64% to 13.37% for the case study. However, any prediction is subject to uncertainty and if it is not fulfilled, an additional source of energy is needed.

**Keywords:** Photovoltaic irrigation, forecast irrigation needs, precision irrigation, energy availability.

## 1. Introducción

Se están implementando sistemas de riego solar directo, cuando se efectúa solo si hay suficiente energía fotovoltaica es denominando Riego Fotovoltaico de Oportunidad (PVOI), presenta la problemática de la incertidumbre en el tiempo de riego (TR), ya que este depende de la irradiación. Por ello, este trabajo presenta una propuesta donde se reduce la incertidumbre del PVOI mediante predicciones meteorológicas (PM), pudiendo estimar con una semana de antelación las horas de irradiación y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>). Se pretende así conocer de antemano los tiempos de energía disponible y los tiempos de energía requerida. Además, se ha incorporado un modelo suelo-planta-agua que permite conocer el estado de humedad del suelo para establecer la programación del riego dentro de unos umbrales de humedad que no perjudiquen al cultivo.

El objetivo es evaluar, en instalaciones con suministro energético fotovoltaico, una metodología de programación de riego que utiliza las PM en lugar de los datos históricos. De esta manera, se busca maximizar el uso de la irradiación disponible por los grupos de bombeo y ajustar las dosis de riego a las estrictamente necesarias. Esta metodología se aplica en sistemas de inyección directa con múltiples hidrantes donde es fundamental conocer previamente la programación de la operación del sistema.

## 2. Materiales y métodos

### 1.1. Caso de estudio

El caso de estudio se centra en la red de riego Camí Albalat gestionada por la comunidad de regantes (CR) de Massalet. Se ubica en el término municipal de Carlet (Valencia, 39°13'27.45"N, 0°30'8.83"W), en el este de España. El cultivo de la CR son cítricos adultos que se abastecen desde el Canal Júcar-Turia. La presión mínima requerida en cada hidrante es de 28 m, por lo que se han instalado bombas que son abastecidas energéticamente mediante una instalación fotovoltaica (FV). Para los periodos donde la energía suministrada por la instalación sea menor que la requerida, se podrá suplir mediante energía eléctrica no renovable. El suelo es Franco arenoso con una Conductividad hidráulica (K<sub>sat</sub>) para el cálculo de la capacidad de drenaje de 800 mm día<sup>-1</sup>.

La red hidráulica está alimentada desde una balsa de 50.000 m<sup>3</sup>, la cual abastece mediante una conducción a dos cabezales; el de Camí Albalat que abastece 681 ha y el de Plaça Massalet que abastece 783 ha. La red de riego del cabezal de Camí Albalat, está a una cota de 42,6 m y cuenta con un total de 147 hidrantes en servicio y 198 tuberías con diámetros entre DN-90 y DN-710. El sistema de impulsión de agua que consta de 3 bombas, las cuales abastecen a 4 sectores de riego, funcionando con presión de consigna variable. Cada hectárea tiene instalados 4.200 emisores de 4 lh<sup>-1</sup> lo que equivale a un caudal por unidad de superficie de 1.68 lh<sup>-1</sup>m<sup>-2</sup>.

El sistema FV está formado por 912 paneles con 72 células FV de 6 pulgadas de material policristalino las cuales producen 325 W con una capacidad de generar 296,4 kW. Además, el sistema FV está formado por 3 inversores con función de variador de frecuencia. El factor o relación entre la potencia del generador FV y el sector de riego que demanda mayor P<sub>mini</sub> es de 2,23.

### 1.2. Descripción de la metodología

Se pretende disminuir el consumo de energía eléctrica convencional y ajustar el consumo de agua al estrictamente necesario en instalaciones de riego FV, estableciendo con un tiempo de antelación el funcionamiento de las tomas o hidrantes y los grupos de bombeo, para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Para ello se van a utilizar las estimaciones de las necesidades de riego y la irradiación horaria mediante el uso de las PM. La estimación de necesidades de riego, temperatura y de irradiación se calculan mediante la metodología estándar descrita en el apartado **¡Error! No se encuentra**

**el origen de la referencia..** Posteriormente se describe el cálculo de la predicción de necesidades de riego, temperatura e irradiancia mediante la metodología basada en predicciones climáticas corregidas con el Filtro de Kalman, descrito en el apartado 1.3.2. Las PM se han obtenido del servicio climático del Global Forecast System (GFS) ([www.nco.ncep.noaa.gov](http://www.nco.ncep.noaa.gov)). Del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) se han obtenido los datos meteorológicos de la zona de estudio. Una vez estimada la irradiancia y la temperatura, se determina la energía que generaría el sistema FV para el segundo método (basado en predicciones). Por último, una vez conocidas la energía generada a una semana vista, los tiempos de riego de esa semana y la energía requerida por las bombas de agua, se determina la programación de los sectores de riego. Además, se establece la condición de que la humedad en el suelo no produzca estrés al cultivo y se evite el drenaje. Para ello calcula para cada día y sector la humedad del suelo ( $W_{i,d}$ ).

Antes de realizar la programación del riego se determina la Capacidad de Campo de cada sector ( $CC_i$ ). Este término se puede sustituir por la humedad objetivo a mantener en el suelo, y la humedad para cada día de la semana  $W_{i,d}$ . Esta humedad no debe ser inferior al valor crítico que pueda causar estrés excesivo al cultivo ( $W_{i,crit}$ ), tal como se describe en el apartado. 1.4. Del mismo modo se determina un tiempo de riego mínimo ( $TR_{min}$ ) que implique la conexión de las bombas, evitando que haya riegos de corta duración durante los cuales el sistema no alcance el régimen permanente.

La determinación de la programación de riego, es decir cuando riega cada sector cada semana, se realiza de la siguiente manera:

1. Se calcula el tiempo de riego semanal para cada uno de los sectores. En el caso de estudio y al tratarse de monocultivo de cítricos, se obtiene un mismo tiempo de riego para cada uno de los sectores ( $TR_{std}$  o  $TR_{Pred\_semanal}$ ).
2. Para cada sector, cada día, se calcula el tiempo de riego acumulado  $TR_{acu,i}$  que al final de la semana deberá ser igual a  $TR_{std}$  o  $TR_{Pred\_semanal}$ . Este tiempo de riego se conseguirá o bien con suministro de energía FV o bien con energía convencional.
3. Se determina la potencia horaria neta  $P_{net,D,H}$  para cada una de las horas y días de la semana.
4. Los sectores de riego se ordenan según la  $P_{min,i}$  de mayor a menor
5. Se asignan las horas de mayor  $P_{net}$  a los sectores cuando  $P_{net} \geq P_{min,i}$
6. Se comienza por el sector de mayor  $P_{min,i}$  a realizar un bucle recorriendo las horas de cada día de la semana estableciendo las horas de riego de cada sector cuando  $P_{net} \geq P_{min,i}$ .
7. Se determina para cada sector el tiempo de riego máximo diario  $TR_{max,i}$  siempre que  $P_{net} \geq P_{min,i}$  hasta que llegue a  $CC_i$ ;  $TR_{max,i} = \{TR_{std}, TR_{Pred\_semanal}\}$ . Si  $W_{i,d} < W_{crit,i}$  o si  $TR_{max,i}$  es positivo habrá que realizar el riego.
8. Se comprueba para ese sector si  $P_{net} < P_{min,i}$ . En caso de que lo sea se asigna esa hora hasta que  $TR_{acu,i} = TR_{max,i}$ . Las horas utilizadas quedan descartadas para los siguientes sectores. En caso de que  $P_{net,i} < P_{min,i}$  y  $W_{i,d} < W_{crit,i}$  se utiliza energía convencional.
9. El sector  $i$  no vuelve a regar hasta que  $TR_{max,i}$  es positivo y mayor que  $TR_{min}$
10. El bucle se repite para cada día de la semana y para cada sector

Al final de la programación semanal  $TR_{acu,i} \leq TR_{max,i}$ .  $TR_{acu,i}$  puede ser menor a  $TR_{max,i}$  cuando el suelo esté en  $CC_i$  o cuando  $TR_{max,i} < TR_{min}$ . Para evaluar la metodología propuesta se compara  $P_{min,i}$  con la potencia horaria neta real que ha sucedido durante esa hora y ese día ( $P_{real,d,h}$ ). Si  $P_{real,d,h} > P_{net,d,h}$

el sistema funciona con energía FV y se contabilizan como  $TR_{FV}$ . En caso de que  $P_{real,d,h} < P_{net,d,h}$  el sistema debe funcionar con energía convencional y las horas de riego se contabilizan como  $TR_{Ci}$ . Este proceso se repite para toda la campaña del riego 2019 con frecuencia semanal tomando los lunes como día de referencia.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de los resultados de riego en varios escenarios, dependiendo de varias opciones en cuanto a la irradiancia y el cálculo de  $ET_o$ , se pretende saber qué método es mejor para disminuir la incertidumbre del sistema operativo. En cuanto al cálculo de la irradiancia, un primer escenario considera que la irradiancia de la próxima semana será igual a la radiación media de los últimos 10 años ( $Irrad_{10\text{-años}}$ ), mientras que una segunda opción será la que surja del uso de PM basadas en datos meteorológicos ( $Irrad_{predicha}$ ). Por último, respecto a las estimaciones de  $ET_o$ , se vuelven a considerar dos opciones: siendo la primera donde la  $ET_o$  es igual al valor que alcanzó dicho indicador la semana anterior y en la segunda opción se usa el valor de  $ET_o$  pronosticado [1]. En resumen, hay cuatro escenarios posibles considerando todas las opciones, SC1 ( $Irrad_{predicha}$  y  $ET_{Cpredicha}$ ), SC2 ( $Irrad_{predicha}$  y  $ET_{Csemana-1}$ ), SC3 ( $Irrad_{10\text{ años}}$  y  $ET_{Cpredicha}$ ) y SC4 ( $Irrad_{10\text{ años}}$  y  $ET_{Csemana-1}$ ).

### 1.3. Cálculo de Necesidades de Riego (NR).

Para calcular las necesidades de riego, se utiliza la metodología de Penman Monteith [2] para el cálculo de la  $ET_o$ . A partir de la  $ET_o$  se determinan las necesidades de evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), utilizando para ellos los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ), basados en los porcentajes de cubierta vegetal corregidos por un factor de corrección mensual  $f_{c_{mes}}$ . Se asume que todas las parcelas tienen una cubierta vegetal mayor al 70%. Una vez calculada la  $ET_c$ , a esta se le resta la precipitación efectiva ( $P_e$ ).

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \cdot f_{c_{mes}} \quad (3)$$

$$NR = ET_c - P_e$$

Las variables para el cálculo de la  $ET_o$  se obtienen mediante dos procedimientos:

1. El primero calcula la  $ET_o$  mediante las PM de la Temperatura media ( $^{\circ}C$ ), humedad relativa (%), velocidad del viento a 2 metros de altura ( $ms^{-1}$ ) y radiación solar de onda corta descendente observada ( $Wm^{-2}$ ), equivalente a la irradiancia, a una semana de ventana temporal (7 días de predicción).

2. El segundo, calcula las necesidades de riego para la próxima semana utilizando la  $ET_o$  de la semana anterior, empleando los datos meteorológicos de estaciones agroclimáticas del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) (<http://portal.mapa.gob.es/websiar/Inicio.aspx>). Para el caso de estudio aquí considerado, se usa la correspondiente a la de E.A. Carlet, situada a 3.786m del cabezal de riego *Cami Albalat*.

#### 1.3.1. Determinación de la Irradiancia y tiempos de riego mediante sistema tradicional

En este apartado se calcula la irradiancia de la semana con la radiación media observada durante la misma semana de los últimos 10 años, la cual se midió en el plano horizontal utilizando un piranómetro modelo CMP3 (Kipp & Zonen BV Delft, Holanda), para programar el riego de la próxima semana.

Los TR estándar ( $TR_{std}$ ) se determinan tradicionalmente asumiendo la  $ET_o$  de la semana previa, aunque en este estudio, para que ambas metodologías sean comparables, se ha decidido compensar el error de la  $ET_o$  de la semana anterior en los tiempos de riego de la semana que se va a regar. Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$IT_{std} = (ET_{Csemana+1} - (ET_{Csemana-1} - ET_{CMsemana-1}) - P_{e\ semana-1}) \cdot q^{-1} \quad (4)$$

Donde  $ET_{Csemana+1}$  es la predicción de  $ET_c$  para la semana próxima,  $ET_{Csemana-1}$  es la predicción de  $ET_c$  para la semana anterior,  $ET_{CMsemana-1}$  es la  $ET_c$  calculada mediante medidas de estación

meteorológica de la semana anterior,  $P_{e\text{ semana-1}}$  es la precipitación efectiva de la semana anterior y  $q$  son los  $l\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$ . Si  $TR_{\text{std}}$  es inferior a 0 o si  $TR_{\text{std}}$  es menor a  $TR_{\text{min}}$ , no se producirá riego.

### 1.3.2. Predicciones de datos meteorológicos y tiempos de riego.

Las NR de los cultivos se realiza mediante las PM del servicio climático, Global Forecast System (GFS) de la National Centers for Environmental Prediction (NCEP), perteneciente al gobierno de USA.

Para reducir la incertidumbre entre el modelo predictivo y la medida realizada en estaciones meteorológicas se ha empleado un Filtro de Kalman [3]. Las ecuaciones de dicho filtro se resuelven en dos etapas [4]. Cuando se dispone de una medida se ejecuta el paso "corrector" dado por:

$$\begin{aligned} K_k &= P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-) \\ P_k &= (I - K_k H_k) P_k^- \end{aligned} \quad (5)$$

Donde  $P_k^-$  es la matriz de varianza del estado o el error de estimación,  $H_k$  es la matriz de medición,  $K_k$  es la ganancia de Kalman,  $z_k$  es la observación real en el instante  $k$ ,  $x$  es el estado inicial estimado y  $R$  es la matriz de varianza del ruido de medición.

Una vez se obtiene el vector corregido para las mediciones de los datos y del modelo pasado, se determina la predicción futura ajustando el modelo de los siguientes días, mediante las ecuaciones de simulación [4] lo que se suele denominar etapa de "predictor" en la literatura:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= A \hat{x}_{k-1} \\ P_k^- &= A P_{k-1} A^T + Q \end{aligned} \quad (6)$$

Donde  $P_k^-$  es la matriz de varianza del estado o el error de estimación,  $\hat{x}_{k-1}$  es el estado estimado en la iteración anterior (o las condiciones iniciales en la primera iteración). Si se deseara simular a varios pasos en el futuro sin observaciones intermedias, se supone en el predictor (6)  $P_k = P_k^-$  y sin ejecutar las ecuaciones del corrector (5).

Alimentando a cuatro filtros de Kalman, se obtienen (recursivamente) los cuatro parámetros de la corrección para cada una de las variables de temperatura, humedad, viento a 2 m e irradiancia.

Mediante los 4 parámetros se calcula la  $ET_0$  mediante la metodología de Penman Monteith. Una vez conocidas la NR se determina el tiempo de riego predicho  $TR_{\text{Pred\_semanal}}$ , donde se corrige cada semana con el error de la semana anterior, mediante la siguiente ecuación:

$$IT_{\text{Pred\_semanal}} = (ET_{C\text{ semana+1}} - (ET_{C\text{ semana-1}} - ET_{C_M\text{ semana-1}}) - P_{e\text{ semana-1}}) \cdot q^{-1} \quad (7)$$

Donde  $ET_{C\text{ semana+1}}$  es la predicción de  $ET_c$  para la semana próxima,  $ET_{C\text{ semana-1}}$  es la predicción de  $ET_c$  para la semana anterior,  $ET_{C_M\text{ semana-1}}$  es la  $ET_c$  calculada mediante medidas de estación meteorológica de la semana anterior,  $P_{e\text{ semana-1}}$  es la precipitación efectiva de la semana anterior y  $q$  son los  $l\text{h}^{-1}\text{m}^{-2}$  que pueden proporcionarse como caudal de riego. Si  $TR_{\text{std}}$  es inferior a 0 o si  $TR_{\text{std}}$  es menor a  $TR_{\text{min}}$ , no se producirá riego.

### 1.4. Humedad en el suelo

El uso adecuado del agua supone el punto de control de esta metodología, buscando mantener una alta eficiencia hídrica, se controla la humedad del suelo. Al disponer paneles FV se reduce el consumo eléctrico de energías convencionales, pero también se deben de ajustar los TR para no perder agua por drenaje si estos tiempos fueran excesivos.

La determinación de humedad del suelo para cada sector ( $W_{i,d}$ ) se establece diariamente, mediante la ecuación:

$$W_{i,d} = W_{i,d(-1)} - ET_{C_M} + I + P_e + DP \quad (8)$$

Donde  $W_{i,d(1)}$  es la humedad del suelo del día anterior (mm),  $ET_{CM}$  es la  $ET_c$  calculada mediante mediciones en estaciones meteorológicas (mm),  $I$  es el riego (mm),  $Pe$  es la precipitación efectiva (mm) y  $DP$  es el drenaje en profundidad (mm).

En este modelo se ha simplificado no teniendo en cuenta la escorrentía superficial, al tratarse de un riego localizado. Se asume que  $ET_{CM}$  y  $Pe$  es la misma para cada sector. El cálculo de  $DP$  se realiza cuando la humedad del suelo está entre Saturación (SAT) y Capacidad de Campo (CC), el drenaje se calcula con la siguiente ecuación [5-7].

$$DP = 0.0866 \cdot K_{sat}^{0.35} \cdot (SAT - FC) \quad (9)$$

Se ha determinado la fracción de la CC de agua del suelo ( $p_s$ , %) para que cítricos con cobertura mayor al 70% no sufran estrés. Esta fracción limita la mínima cantidad de agua (mm) que debería de contener el suelo para que los cítricos no sufran estrés. Esto se ha realizado según la ecuación:

$$W_{crit,i} = 0.5 + 0.04 \cdot (5 - p_s \cdot ET_{c(mm.dia^{-1})}) \quad (10)$$

#### 1.4. Sistema fotovoltaico

La eficiencia de las células FV que conforman el panel FV, se ve afectada por la temperatura que pueden alcanzar al estar sometidas a la irradiancia. Para calcular la temperatura de la célula de cada hora de cada día de la semana ( $T_{cel,d,h}$ , °C) se emplea la siguiente fórmula.

$$T_{cel,d,h} = T + \frac{(TONC - 20) \cdot SR}{800} \quad (11)$$

Donde  $T$  es Temperatura en (°C),  $TONC$  es la temperatura nominal de funcionamiento de la célula FV (en este caso 45 °C) y  $SR$  es la irradiancia media horaria ( $Wm^{-2}$ ).

El cálculo de la potencia horaria neta disponible FV para cada día de la semana se determinó mediante la ecuación:

$$P_{d,h} = P_p \cdot \frac{SR}{1000} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_p}{100} \cdot (T_{cel} - 25)\right) \quad (12)$$

Donde  $P_p$  es la potencia pico de la placa FV,  $\alpha_p$  es el coeficiente de variación de  $P_p$  con la temperatura (%/°C) y  $T_{cel,d,h}$  es la temperatura de la célula FV.

Por último, se debe de tener en cuenta que la potencia neta disponible por cada hora y día de la semana ( $P_{net,d,h}$ ) de las bombas se ve afectada por la eficiencia del inversor y del motor del equipo.

$$P_{net,d,h} = P_{d,h} \cdot \eta_{fc} \cdot \eta_m \quad (13)$$

Donde  $\eta_{fc}$  es la eficiencia estimada del inversor que es de 0.9 y  $\eta_m$  es la eficiencia estimada del motor que es de 0.8.

Durante los periodos donde las horas y energía de riego sean mayores a las horas y energía suministradas por la instalación FV, se riega mediante energía eléctrica convencional.

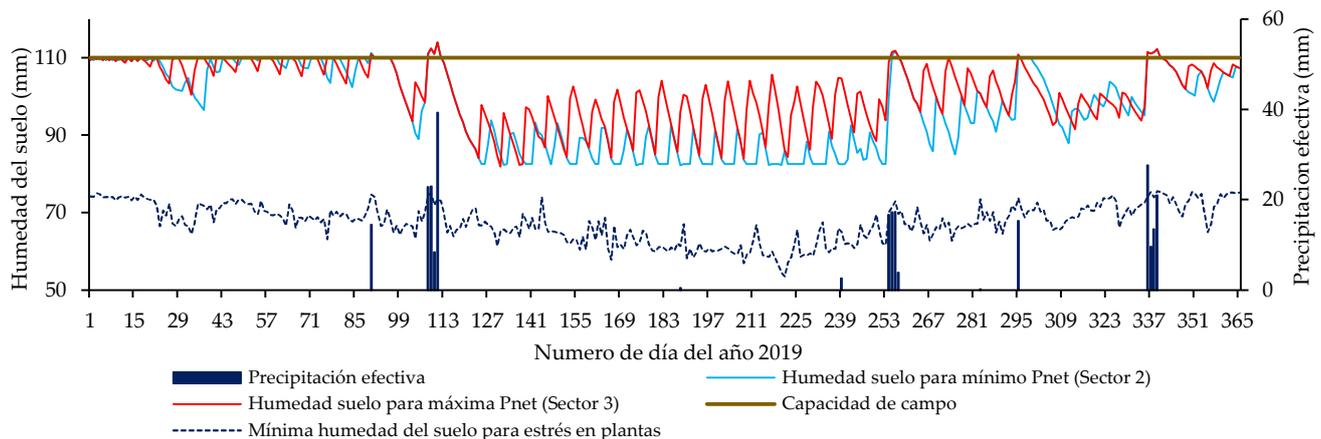
### 3. Resultados y discusión

En este apartado se estudia cómo afecta la programación de riego mediante predicciones al uso de la energía FV y convencional. La evaluación de la programación de riego para cada sector se realiza estudiando las dosis de riego y el drenaje, las horas de riego regadas mediante energía convencional y energía FV y la humedad del suelo para los 4 sectores.  $TR_{min}$  se estableció en 0.5 h para evitar excesivos arranques y paros del sistema. La humedad objetivo se estableció en la  $CC_i$  (110 mm) y el punto de mínima humedad se estableció un 25% inferior a  $CC_i$  siendo de 82.5 mm. El drenaje se produciría debido a la precipitación ya que a la humedad del suelo se añade la precipitación superando la humedad la CC, tal como se describe en las ecuaciones 8 y 9.

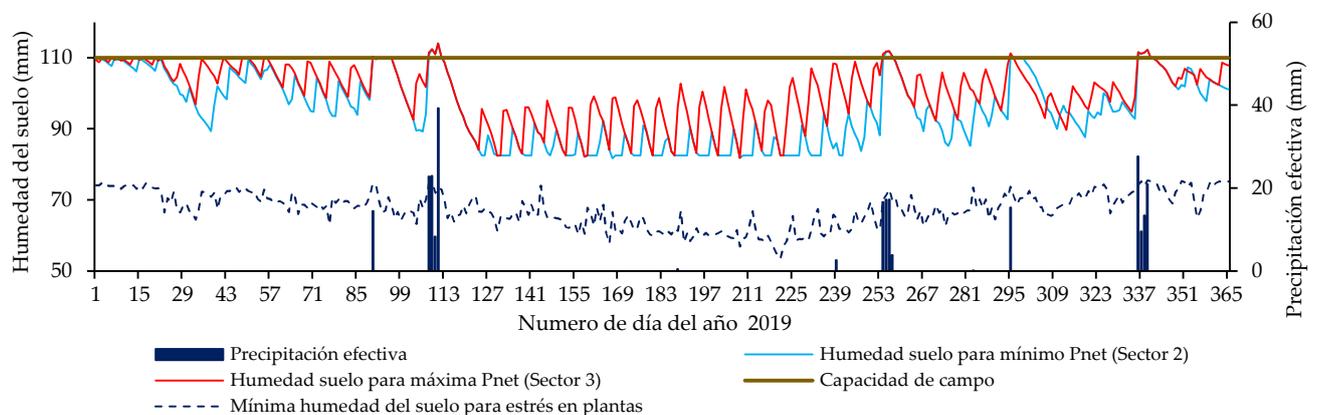
### 3.1. Evaluación de los sectores según el contenido de la humedad del suelo

En este apartado se presentan los resultados de humedad del suelo para los 2 escenarios SCE1 (figura 1) y SCE4 (figura 2).

En ambas gráficas se representa los sectores de mínimo y máximo requerimiento de potencia para que funcionen las bombas, la precipitación efectiva y la mínima humedad del suelo para que las plantas no sufran estrés. En ninguno de los 4 escenarios las plantas han sufrido estrés. Además, se puede observar que la humedad en el sector de máximo requerimiento de potencia para el bombeo no suele alcanzar la humedad mínima establecida, esto es debido a que es el sector que aprovecha primero las horas de energía disponible.



**Figura 1.** Capacidad de campo, Humedad del suelo mediante ET<sub>c</sub> predicha e irradiancia predicha con PM y mínima humedad de suelo para estrés en cítricos.



**Figura 2.** Capacidad de campo, Humedad del suelo mediante ET<sub>c</sub> de la semana anterior, irradiancia media de 10 años y mínima humedad de suelo para estrés en cítricos.

### 3.2. Evaluación de la dosis de riego y del drenaje.

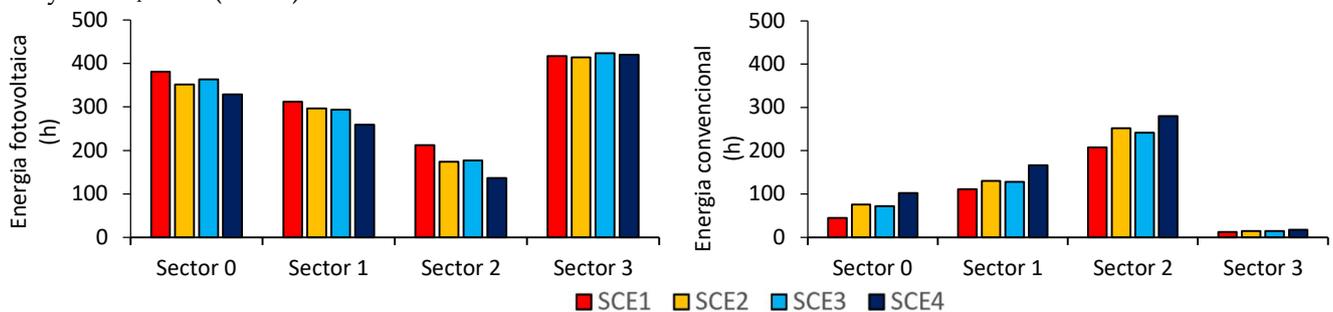
Los consumos anuales para los 4 sectores son de 2.853,6 mm, 2869 mm, 2.877,2 mm y 2897mm para los escenarios SCE 1, SCE2, SCE3 y SCE4 respectivamente, mostrando la menor cantidad de agua regada cuando se utiliza ET<sub>c</sub> Predicho y Irrad<sub>predicho</sub> (SCE1).

El drenaje del caso de estudio no se produce debido al riego ya que cuando se alcanza la humedad objetivo (CC<sub>i</sub>) el riego se detiene, pero en los periodos que se producen precipitaciones, el drenaje dependerá de la proximidad de la humedad objetivo a la humedad del suelo.

### 3.3. Evaluación de los sectores por el uso de energía fotovoltaica.

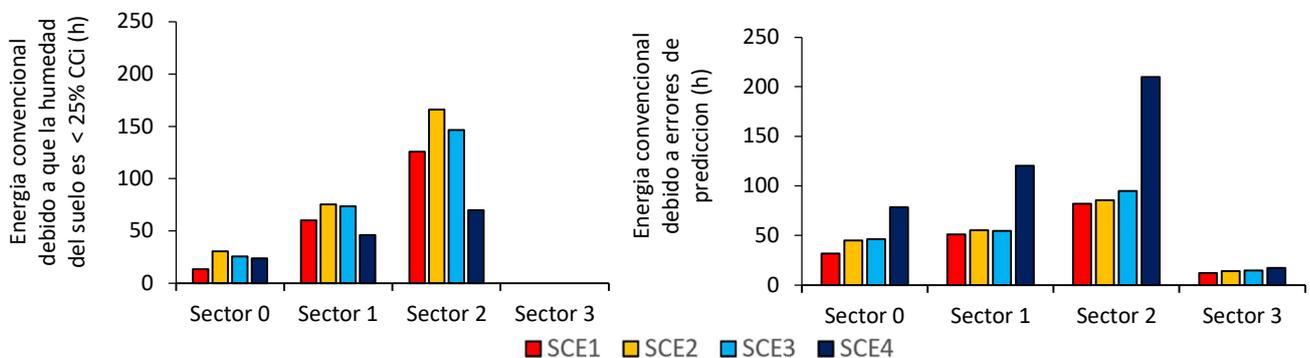
Las horas anuales de funcionamiento para abastecer los 4 sectores son 1698.5h, 1707.7h, 1712.6h y 1710.2h para los escenarios SCE 1, SCE2, SCE3 y SCE4 respectivamente, mostrando la menor necesidad de horas cuando se utilizan  $ET_C$  Predicho y  $Irrad_{predicho}$  (SCE1). La figura 3 muestra las horas de riego suministradas con energía FV y con energía convencional. La suma de las dos son las horas totales de riego que se deben de aportar a lo largo de un año para cubrir las necesidades de riego que se ha establecido.

El sector que menos horas de energía convencional ha requerido ha sido el de mayor  $P_{mini}$  y así sucesivamente hasta llegar al sector de menor  $P_{mini}$ . Las horas anuales de riego FV para abastecer los 4 sectores son 1.322,6h, 1.236h, 1.257,1h y 1.144,6h para los escenarios SCE 1, SCE2, SCE3 y SCE4 respectivamente, mostrando el mayor uso de horas de riego de energía FV cuando se utiliza  $ET_C$  Predicho y  $Irrad_{predicho}$  (SCE1). Por el contrario, las horas anuales de riego con energía convencional para abastecer los 4 sectores son 375,9h, 471,8h, 455,6h y 565,7h para los escenarios SCE 1, SCE2, SCE3 y SCE4 respectivamente, mostrando el menor uso de horas de riego de energía convencional cuando se utiliza  $ET_C$  Predicho y  $Irrad_{predicho}$  (SCE1).



**Figura 3.** Horas de riego mediante energía FV y horas de riego mediante energía convencional por sectores según los diferentes escenarios SCE1, SCE2, SCE3 y SCE4.

La energía convencional se conectó en aquellas ocasiones donde la irradiancia no fue suficiente para realizar el riego ya programado mediante las predicciones tanto  $Irrad_{predicho}$  y  $Irrad_{10-años}$ . Por otro lado, también se conectará la energía convencional en aquellos momentos que la humedad del suelo sea inferior al 25% de la humedad objetivo ( $CC_i$ ) y no se produzca energía FV para abastecer al sistema como indica la figura 4. Aquí podemos observar como las horas de riego donde se usa energía convencional en los escenarios SCE1 y SCE2 son debidas a que la humedad descende por debajo del 25% de la  $CC_i$  y se han de conectar las bombas mediante energía convencional. Sin embargo, para los escenarios SCE3 y SCE4 el uso de energía convencional se debe principalmente a los errores en la predicción meteorológica.



**Figura 4.** Horas de riego mediante energía convencional debidas a que la humedad del suelo es inferior al 25% del  $CC_i$  o debido a errores en la programación del riego por sectores según los diferentes escenarios SCE1, SCE2, SCE3 y SCE4.

El porcentaje entre las horas de riego ejecutadas mediante energía FV frente a las horas de energía disponible son de 13.37%, 12.52%, 12.74 y de 11.64 % para los escenarios SCE1, SCE2, SCE3 y SCE4.

De aquí se determina que los mayores aprovechamientos de energía FV se dan en los escenarios SCE1 y SCE3 donde se usa  $Irrad_{predicho}$ . Estos dos escenarios utilizan el 79% y el 75 % de energía FV frente a SCE2 y SC4 que utilizan el 74% y el 68 % de la energía FV.

El sector 3, al ser el primero que se le asigna  $P_{net,d,h}$ , es el que se cubre con un mayor porcentaje de energía FV y no es necesario utilizar la energía convencional para mantener el nivel de humedad por encima de  $W_{crit,i}$ . Solamente el error debido a la predicción, obliga al uso de energía convencional. Por otro lado, el sector 2, el sector de menor  $P_{min,i}$ , es el que mayor uso de energía convencional hace y mayor porcentaje de ésta se debe a que no se alcanza  $W_{crit,i}$ .

#### 4. Conclusiones

El uso de las predicciones metodológicas a corto plazo, una semana de ventana temporal de antelación, permite estimar con mayor precisión la irradiancia y las necesidades de riego de los cultivos, por lo que se puede programar con antelación el funcionamiento de la instalación. No obstante, toda predicción está sometida a una incertidumbre y en caso de que no se cumpla se necesita una fuente de energía adicional.

Esto ha permitido que la aplicación de las PM para el cálculo de la irradiancia y de las necesidades del riego (SCE1) frente al uso de los datos históricos y del cálculo de la evapotranspiración tomando como referencia lo sucedido en el pasado (SCE4) haya permitido mejorar el uso de energía renovable de un 68,7 % a un 79,3 % y pasar del uso de energía fotovoltaica disponible de un 11.64 % a un 13.37 %.

Para la mejora de este último indicador se debe actuar sobre la programación del riego diseñando turnos dinámicos cuya potencia mínima de cada sector se adapte a lo largo de potencia neta.

La mejora de las predicciones acompañada junto con la reducción temporal de la ventana de predicción mejorará el porcentaje de uso de energía renovable y el aumento del uso de las horas de energía disponible.

#### Agradecimientos

Este estudio ha sido parcialmente financiado por el proyecto ADAPTAMED (RTI2018-101483-B-I00), financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y con fondos de la UE FEDER

#### Referencias

1. Carricondo-Anton, J.M.; Jiménez-Bello, M.; Martínez Alzamora, F.; Sala, A. Análisis de las Predicciones Climáticas a partir de distintos Servicios Climáticos para la Programación del Riego, XXXVII Congr. Nac. Riegos. (2019).
2. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration guide- lines for computing crop water requirements., (1998).
3. Kalman, R. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans. ASME - J. Basic Eng. 82 (1960) 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>.
4. Albertos, P.; Sala, A. Multivariable control systems : an engineering approach, (2004).
5. Raes, D. summary simulation model of the water budget of a cropped soil, Leuven Uni, Leuven, Belgium, 1982.
6. Raes, D.; Lemmens, P. H.; Van Aelst, M.; Bulcke, V.; Smith, M. IRSIS – Irrigation scheduling information system, Dep. Land Management, Reference Manual 3, 1988.
7. Raes, D.; Geerts, S.; Kipkorir, E.; Wellens, J.; Sahli, A. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model, Agric. Water Manag. 81 (2006) 335–357. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.006>.