

A-07-2021

Comunicación científico-técnica

Evaluación de la programación del riego de parcelas de cítricos mediante predicciones meteorológicas

Carricondo Anton, JM¹, Jiménez-Bello, MA¹, Sala, A², Martínez Gimeno, MA³, Bonet L.³, Pérez-Pérez, JG.³, Intrigliolo D.S.⁴

- 1 Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València mijibar@dihma.upv.es
- 2 Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (AI2), Universitat Politècnica de València
- 3 Institut Valencià d'Investigacions Agràries (IVIA), Generalitat Valenciana.
- 4 Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE). CSIC-UV-GV.

Resumen: Para realizar una programación del riego más ajustada a la demanda hídrica, se puede estimar la evapotranspiración potencial (ET_o), tal como describe el método FAO 56, con anterioridad al riego mediante predicciones meteorológicas (PM). En este trabajo se han utilizado PM del Global Forecast System (GFS) y Météo-France. Del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) se ha obtenido los datos meteorológicos de la zona de estudio. El objetivo ha sido conocer si el uso de distintas PM mejora la programación del riego que se realiza de manera habitual, además de determinar la mejor ventana temporal (VT) para realizar la programación de riego. El caso de estudio corresponde a 307 ha de cítricos de una Comunidad de Regantes en Picassent (Valencia). Se propone un modelo basado en la simulación de estimación de la ET_o mediante PM y se compara frente a los riegos realizado por los agricultores de la zona de estudio. Para reducir la incertidumbre entre la PM y las mediciones realizadas en estaciones meteorológicas se ha aplicado el Filtro de Kalman (FK) a cada variable de la PM. Para estimar la humedad del suelo se ha utilizado un modelo hidrológico simplificado teniendo en cuenta la evapotranspiración del cultivo, el riego, la precipitación efectiva y el drenaje. Los errores relativos en la estimación de la ET_o se han obtenido para 2 periodos temporales, el primero desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre y el segundo durante todo el año 2019. Como ejemplo, el sistema que menores errores presenta es GFS_K (con FK), reduciendo los errores respecto de la ET_o calculada mediante mediciones en estaciones meteorológicas del 9.9% al 6.3% para 1 y 7 días respectivamente. El error medio semanal de la ET_o mediante datos históricos para la misma época fue del 18.8%. Al aplicar el modelo hidrológico simplificado para calcular la humedad del suelo, esta se mantuvo por encima de un valor umbral de no estrés del cultivo para todos los escenarios. El volumen de agua drenado anualmente aumenta al reducir el número de días predichos para todos los escenarios, esto es debido a que al reducir la VT aumenta el volumen regado manteniendo una humedad del suelo próxima a la humedad objetivo. La programación del riego sobre la base de las PM se ha comparado con una llevada a cabo de forma empírica por agricultores de la zona obteniéndose un drenaje de 468.6 mm año⁻¹ frente a las PM de GFS_K a 7 días de VT que presenta 55.9 mm año⁻¹ para un suelo franco arenoso arcilloso. La VT de programación que evita una mayor pérdida por percolación profunda para un terreno franco arcilloso arenoso es la de 7 días para la PM de GFS_K. No obstante, en próximos estudios, se analizará la integral de estrés para determinar si las distintas programaciones de riego afectan al rendimiento del cultivo. **Palabras clave:** Evapotranspiración de referencia; Programación riego; Predicción necesidades riego.

A-07-2021

Comunicación científico-técnica

Evaluation of the irrigation scheduling of citrus plots by means of meteorological predictions

Carricondo Anton, JM¹, Jiménez-Bello, MA¹, Sala, A², Martínez Gimeno, MA.³, Bonet L.³, Pérez-Pérez, JG.³, Intrigliolo D.⁴

- 1 Instituto de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València mijibar@dihma.upv.es
- 2 Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial (AI2), Universitat Politècnica de València
- 3 Institut Valencià d'Investigacions Agràries (IVIA), Generalitat Valenciana.
- 4 Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE). CSIC-UV-GV.

To perform an irrigation scheduling more adjusted to water demand, the reference evapotranspiration (ET_o) can be estimated, as described in the FAO 56 method, prior to irrigation using meteorological predictions (PM). In this work, the PMs of the Global Forecast System (GFS) and Météo-France have been used. From the Agroclimatic Information System for Irrigation (SIAR) the meteorological data of the study area has been obtained. The objective was to know if the use of different PM improves the irrigation scheduling that is carried out on a regular basis, in addition to determining the best time window (VT) to carry out the irrigation scheduling. The case study corresponds to 307 ha of citrus trees in a Water User Association in Picassent (Valencia). A model is proposed based on the simulation of estimation of ET_o by PM and this is compared to the management carried out by farmers in the study area. To reduce the uncertainty between PM and measurements made in meteorological stations, the Kalman Filter (FK) has been applied to each PM variable. To calculate soil moisture, a simplified hydrological model has been used where the crop evapotranspiration, effective precipitation and drainage have been taken into account. The relative errors in the estimation of ET_o have been obtained for 2 time periods, the first being from April 1 to September 30 and the second throughout the year 2019. As an example, the system that presents the least errors is GFSK (with FK), reducing errors with respect to the ET_o calculated through measurements in meteorological stations, when the ET_o is estimated weekly with accumulated days for the time of maximum needs from 9.9% to 6.3%. % for 1 and 7 days respectively. The weekly mean error of the ET_o using historical data for the same period was 18.8%. When applying the simplified hydrological model to calculate soil moisture, it has been kept above a threshold value of no crop stress for all scenarios. The volume of water drained annually increases by reducing the number of days predicted for all scenarios, this is due to the fact that reducing the VT increases the volume irrigated while maintaining soil moisture close to the target humidity. Irrigation programming based on PM has been compared with one carried out empirically by farmers in the area, obtaining a drainage of 468.6 mm year⁻¹ compared to PM of GFSK at 7 days of VT that presents 55.9 mm year⁻¹ for a sandy clay loam soil. The programming VT that avoids a greater loss by deep percolation for a sandy clay loam soil is the 7 days for the PM of GFSK. However, for future studies, the stress integral will be analyzed to determine if the different irrigation schedules affect the water status of the crop.

Keywords: Reference evapotranspiration; Irrigation programming; Prediction of irrigation needs.

1. Introducción

Para aumentar la eficiencia de riego, es esencial conocer las necesidades del cultivo que hasta ahora se calculan de manera usual por la metodología descrita por Penman–Monteith [1]. Para poder determinar correctamente las necesidades de cada cultivo sería de gran utilidad conocer la ETo con anterioridad al riego para poder realizar una programación que suministre el agua necesaria a cada planta. El método de Penman–Monteith ha sido empleado utilizando predicciones de riego [2,3], aunque en estos trabajos no se ha combinado con un modelo agrohidrológico.

Existen diferentes servicios de predicciones meteorológicas, cada uno con sus características particulares. Para poder determinar cuáles son las que tienen menos incertidumbre para la zona de estudio, en este trabajo se han utilizado las previsiones meteorológicas del Global Forecast System (GFS) (www.nco.ncep.noaa.gov) del National Centers for Environmental Prediction del gobierno de US, y el servicio meteorológico francés Météo-France (MF) (www.meteofrance.com). Cabe destacar que cada sistema de datos meteorológicos posee un grid y unos datos libres con diferentes ventanas temporales (VT) siendo de 0.25° y hasta 16 días de previsión para GFS, 0.1° y hasta 4.75 días para MF. Para mejorar la calidad de los datos en diferentes trabajos se han utilizados técnicas estadísticas, como es el Filtro de Kalman [4], consiguiendo reducir la incertidumbre de las predicciones meteorológicas. Del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) se ha obtenido los datos meteorológicos de la zona de estudio.

El objetivo de este trabajo es conocer si el uso de diferentes servicios meteorológicos, con y sin aplicar sistemas estadísticos para reducir la incertidumbre entre las medidas reales y las predicciones mejoran la programación del riego, además de determinar la mejor VT para realizar esta. Se ha particularizado en el caso de los cítricos. Para ello se compararán dos tipos de programación del riego, siendo el primero la utilización de las ETo calculadas con datos de predicciones meteorológicas. El segundo es el más empleado habitualmente con una ventana semanal, basado en qué se aporta la dosis de riego a tiempo pasado calculando la suma de la ETo de la semana anterior ($STD_{\text{semana}-1}$). El uso de un modelo agrohidrológico permite cuantificar el contenido de agua del suelo dependiendo del tipo de este.

2. Materiales y métodos

El caso de estudio es la comunidad de regantes de Sector XI del canal Júcar-Turía (39°22'38,39" N y 0°28'22,51" O), próxima al municipio de Picassent (Valencia). Esta comunidad de regantes cuenta con una red de riego presurizada que funciona mediante peticiones de los agricultores, el cultivo principal son cítricos adultos y la técnica de riego empleada es el riego localizado. De todas las parcelas se han seleccionado tres parcelas representativas del caso de estudio (P1, P2 y P3), las cuales han sido monitorizadas.

2.1. Descripción del modelo

Esta metodología pretende reducir el error entre las necesidades de riego del cultivo y la dosis que se aportan mediante la mejora de la programación del riego. Se propone un modelo donde el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) se realiza mediante predicciones meteorológicas. Las necesidades de riego se calcularán mediante datos procedentes de 2 servicios climáticos, siendo el primero el Global Forecast System (GFS) y el segundo e Météo-France (MF). Se realizan predicciones meteorológicas con una VT de 1, 4 y 7 días para GFS y de 1 y 4 días para MF para todo el año 2019. Se asume que se realizan riegos todos los días la media de la ventana calculada. Las PM pueden ser usadas directamente para el cálculo de las necesidades de los cultivos, pero para reducir la incertidumbre entre

la predicción meteorológica y las mediciones realizadas se puede aplicar el Filtro de Kalman a cada variable de la predicción meteorológica.

Las predicciones de NR mediante predicciones meteorológicas se estudian frente a las predicciones de las NR calculadas mediante el procedimiento tradicional basado en restablecer las necesidades de cultivo sucedidas en un periodo pasado, generalmente una semana (7 días) $STD_{semana-1}$, aunque en este estudio se estudiara también para 1 y 4 días STD_{dia-1} y STD_{dia-4} respectivamente.

Una vez obtenidas las necesidades de riego para cada escenario se calcula el balance hídrico que depende de las texturas de suelo

2.2. Cálculo de Necesidades de Riego (NR).

Las NR se han calculado utilizando la metodología de Penman Monteith para el cálculo de la ETo. Una vez calculada la ETo se determina las necesidades de evapotranspiración del cultivo (ETc), para cítricos con porcentajes de cubierta vegetal mayores al 70% [5] y a la ETc se le resta la precipitación efectiva.

$$ETc = ETo \cdot Kc \cdot fc_{mes} \quad (1)$$

$$NR = ETc - P_e$$

Donde ETo es la evapotranspiración de referencia, Kc es el coeficiente de cultivo, fc_{mes} es el factor de corrección mensual para cítricos, ETc es la evapotranspiración del cultivo (cítricos) y P_e es la precipitación efectiva.

La ETo se calcula mediante dos métodos: a) por predicción, mediante las PM de la Temperatura media ($^{\circ}C$), humedad relativa (%), velocidad del viento a 2 metros de altura (ms^{-1}) y la radiación solar observada de onda corta descendente (Wm^{-2}); (b) en el segundo método o método estándar, se determina las NR para la próxima semana utilizando la ETo de la semana anterior, empleando los datos meteorológicos de la estación agroclimática más próxima a la zona de estudio.

2.3.1. Determinación de parámetros climáticos predichos para el cálculo de las NR mediante el FK.

El problema de las predicciones es que tienen una incertidumbre o error generado en el propio modelo de estimación de esas predicciones. Para reducir la incertidumbre entre el modelo predictivo y la medida realizada en estaciones meteorológicas se ha empleado un Filtro de Kalman. Las ecuaciones de dicho filtro tienen dos etapas [6]. Cuando se dispone de una medida se ejecuta el paso "corrector" dado por:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R)^{-1} \quad (2)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$$

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 [6] lo que se suele denominar etapa de "predictor" en la literatura:

$$\hat{x}_k^- = A \hat{x}_{k-1} \quad (3)$$

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q$$

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. Si se deseara simular a varios pasos en el futuro sin observaciones intermedias, se supone en el predictor (3) $P_k = P_k^-$ y sin ejecutar las ecuaciones del corrector (2).

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 y radiación solar de onda corta. Mediante los 4 parámetros se calcula la ETo mediante la metodología de Penman Monteith. Una vez determinadas las NR para los escenarios con GFS (GFS_{std} (sin aplicar FK), GFS_K (aplicando FK)) para las VT de 1, 4 y 7 días, y para los escenarios con MF (MF_{std}, (sin aplicar FK), MF_K (aplicando FK)) para las VT de 1 y 4 días se calculan estos escenarios compensando los errores entre las mediciones y las predicciones del periodo predicho anterior. Obteniendo escenarios con errores compensados (-C) con GFS (GFS-C_{std} y GFS-C_K) para 1, 4 y 7 días, y los escenarios con MF (MF-C_{std} y MF-C_K) para 1 y 4 días. Con ello las NR para los escenarios GFS_{std}, GFS_K, MF_{std}, MF_K para las VT de 1, 4 y 7 días se calculan

$$GFS_{VT} = GFS_{VT} - P_{eVT} \quad (4)$$

$$MF_{VT} = MF_{VT} - P_{eVT} \quad (5)$$

y de los escenarios GFS-C_{std}, GFS-C_K, MF-C_{std} y MF-C_K para las VT 1, 4 y 7 días se calculan

$$GFS - C_{VT} = GFS_{VT} - P_{eVT} - (GFS_{VT} - ETc_{MVT}) \quad (6)$$

$$MF - C_{VT} = MF_{VT} - P_{eVT} - (MF_{VT} - ETc_{MVT}) \quad (7)$$

Donde P_{eVT} es la precipitación efectiva de la VT anterior, ETc_{MVT} es la ETc calculada mediante mediciones de parámetros meteorológicos de la VT anterior.

Se utilizan las siguientes condiciones:

1. Si GFS_{std}, GFS_K, MF_{std}, MF_K, GFS-C_{std}, GFS-C_K, MF-C_{std}, MF-C_K para las VT 1, 4 y 7 días son inferiores a 0 mm, no se producirá riego durante el periodo de la siguiente predicción.
2. Si la humedad del suelo (W_t) más las NR (GFS_{std}, GFS_K, MF_{std}, MF_K, GFS-C_{std}, GFS-C_K, MF-C_{std}, MF-C_K) para las VT 1, 4 y 7 días es mayor a la Capacidad de Campo (CC), no se producirá riego durante el periodo de la siguiente predicción.

2.3.2. Determinación de las NR mediante sistema estándar.

Los NR estándar (STD_{semana+1}, STD_{dia+4} y STD_{dia+1}) se determinan tradicionalmente asumiendo la ETo de la semana pasada (Li et al., 2018), aunque en este estudio además se ha realizado con VT de 1 y 4 días. Del mismo modo que en el caso anterior, se ha compensado el error la ETo del periodo anterior (STD-C_{semana+1}, STD-C_{dia+4} y STD-C_{dia+1}), calculando las NR para las STD para las VT de 1, 3 días y 1 semana mediante las siguientes ecuaciones:

$$STD_{VT} = STD_{VT} - P_{eVT} \quad (8)$$

$$STD - C_{VT} = STD_{VT} - P_{eVT} - (STD_{VT} - ETc_{MVT}) \quad (9)$$

Se utilizan las siguientes condiciones:

1. Si STD o STD-C para las VT 1, 4 y 7 días son inferior a 0 mm, no se producirá riego durante el siguiente periodo de riego.
2. Si la humedad del suelo (W_t) más STD o STD-C para las VT 1, 4 y 7 días es mayor a la CC, no se producirá riego durante el periodo siguiente.

2.4. Humedad en el suelo

El seguimiento de la humedad del suelo determinará una perspectiva de la eficiencia del uso del agua cuantificando la pérdida de agua por drenaje e intentando mantenerla humedad mínima en el suelo para que las plantas no sufran estrés. La determinación de humedad del suelo (W_t) se establece, mediante la ecuación:

$$W_t = W_{dia(-1)} - ET_{CM} + I + P_e - DP \quad (10)$$

Donde $W_{dia(-1)}$ 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), P_e es la precipitación (mm) y DP es el drenaje en profundidad (mm). En este modelo se ha simplificado no teniendo en cuenta la escorrentía superficial ni la capilaridad al tratarse de un riego localizado.

La textura de suelo de las tres parcelas es franco arcilloso arenoso (FAA). Para comprobar cómo afecta la textura a los tipos de programación, se estudiarán dos texturas adicionales donde se pueden desarrollar el cultivo de los cítricos, una más arcillosa (Arcillo limoso (AL)) y otra más arenosa (Franco arenoso (FA)). El cálculo de DP se realiza cuando la humedad al suelo está entre Saturación (SAT) y CC teniendo en cuenta las texturas y Conductividades hidráulicas (K_{sat}). Los suelos se describen en la Tabla 1.

$$DD = 0.0866 \cdot K_{sat}^{0.35} \cdot (SAT - FC) \quad (11)$$

Para el estudio de la humedad del suelo en los diferentes escenarios se estudia con la textura del suelo de las parcelas del caso de estudio (FAA) y las texturas FA y AL. La profundidad del sistema radicular es de 50 cm. Los parámetros de las texturas (SAT, FC, Punto de marchitamiento (PM) y K_{sat}) se establecen según [7].

Tabla 1. Datos de suelos usados.

	SAT vol(%)	CC vol(%)	PM vol(%)	K_{sat} (mm/day)
Franco arenoso	41	22	10	1200
Franco arcilloso arenoso	47	32	20	225
Arcillo limoso	54	50	32	100

3. Resultados y discusión

3.1 Errores de ET_o por días de predicción

Los errores en la estimación de la ET_o para las distintos métodos y ventanas temporales comparada con la ET_o registrada en la estación meteorológica, se han obtenido para 2 periodos de tiempo, siendo el primero desde el 1 de abril hasta el 30 de septiembre y el segundo durante todo el año 2019. Los errores descienden al aumentar el número de días de predicción de ET_o , ya que los errores se compensan de un día para otro. Los errores relativos para MF descienden cuando se estima la ET_o de 1 y 4 días acumulados para la época de máximas necesidades del 10.12% al 6.5% para MF_k y del 16.44% al 12.96% para MF_{std} . Sin embargo, cabe reseñar que los errores relativos para GFS_k , GFS_{std} descienden cuando se estima la ET_o de 1 y 5 días acumulados para la época de máximas necesidades del 9.88% al 5.6% para GFS_k y del 11.69% al 6.85% para el GFS_{std} , ya que los datos de GFS son horarios las primeras 120 h. El sexto y séptimo día de predicción GFS abastece de datos cada 3 horas, siendo esta reducción de datos la causante del aumento del error relativo medio semanal para la época de máximas necesidades en predicciones a 7 días los errores del 6.31% para GFS_k y del 7.62% para el GFS_{std} . La determinación del

error medio semanal de ETo mediante datos históricos ($STD_{semana+1}$) para la época de máximas necesidades no presenta una disminución al acumular días siendo el error relativo medio semanal un 18.8% mientras que para todo el año 2019 el error medio semanal asciende a 25.6%. En la figura 1 se pueden observar los errores para el año 2019.

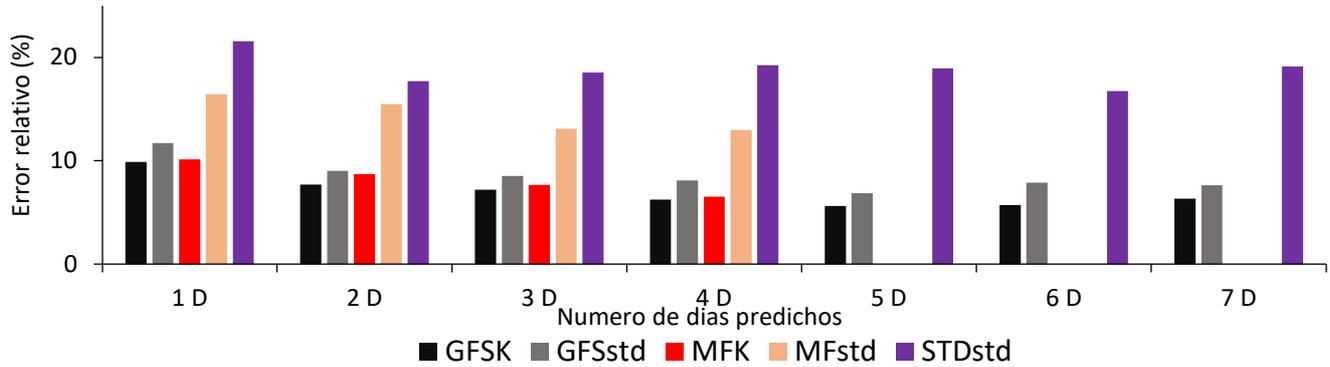


Figura 1. Errores de ETo para el periodo de maximas necesidades según si la programación se hace entre 1 a 7 días para GFSk, GFSstd, STD y de 1 a 4 días para MFstd y MFk (%).

Al confrontar las ETc medidas frente a las ETc predichas o estimadas se obtienen los siguientes R^2 para cada escenario para las VT de 1, 4 y 7 días (ver Tabla 2).

Tabla 2. R^2 de ETo predichas y estimada con datos historicos frente a ETo medida para las VT de 1,4 y 7 días.

	$GFS_{k_{semana+1}}$	$GFS_{std_{semana+1}}$	$STD_{semana+1}$	$GFS_{k_{dia+4}}$	$MF_{k_{dia+4}}$	$GFS_{std_{dia+4}}$	$MF_{std_{dia+4}}$	STD_{dia+4}	$GFS_{k_{dia+1}}$	$MF_{k_{dia+1}}$	$GFS_{std_{dia+1}}$	$MF_{std_{dia+1}}$	STD_{dia+1}
R^2	0,85	0,82	0,57	0,90	0,89	0,86	0,84	0,59	0,91	0,91	0,88	0,86	0,77

Las mayores R^2 se obtienen al disminuir la VT obteniendo R^2 de 0,91, 0,9 y 0,85 para las VT de 1, 4 y 7 días respectivamente. El servicio meteorológico que mayor R^2 presenta frente a los datos medidos es GFSk.

3.2 Efectos de los escenarios en la humedad del suelo

En este apartado se estudia la evolución de la humedad para las texturas de suelo determinadas frente a los escenarios para las VT de 1, 4 y 7 días, además de simular el estado de la humedad parcelas agrícolas (P1, P2 y P3) gestionadas por usuarios del caso de estudio. La figura 2 muestra la evolución de la humedad en un suelo FAA para la predicción de ETo generada con el servicio climático GFS, al cual se le ha aplicado el FK y se ha compensado la predicción con el error de la anterior, para las VT de 1, 4 y 7 días, con ello, se puede observar la diferencia de humedad en la programación con diferentes VT. Como se indica la humedad que se produce con la predicción de $GFS-C_{k_{dia+1}}$ mantiene la humedad más próxima a la humedad objetivo (CC), que la predicción $GFS-C_{k_{dia+4}}$ y a su vez, esta mantiene la humedad más próxima a la humedad objetivo que la predicción $GFS-C_{k_{semana+1}}$. Esto es debido, en este último caso, a que la humedad desciende debido a que esta más la predicción es mayor a la humedad objetivo (CC) no se produce riego durante la siguiente predicción. Con el fin de evitar que los niveles de humedad no disminuyeran por debajo de un determinado valor para la VT 7 de días, se podría programar el riego hasta la humedad objetivo y reprediendo el riego cuando se llegara a una humedad objetivo inferior. Esta sería una de las mejoras a introducir dentro de las simplificaciones adoptadas.

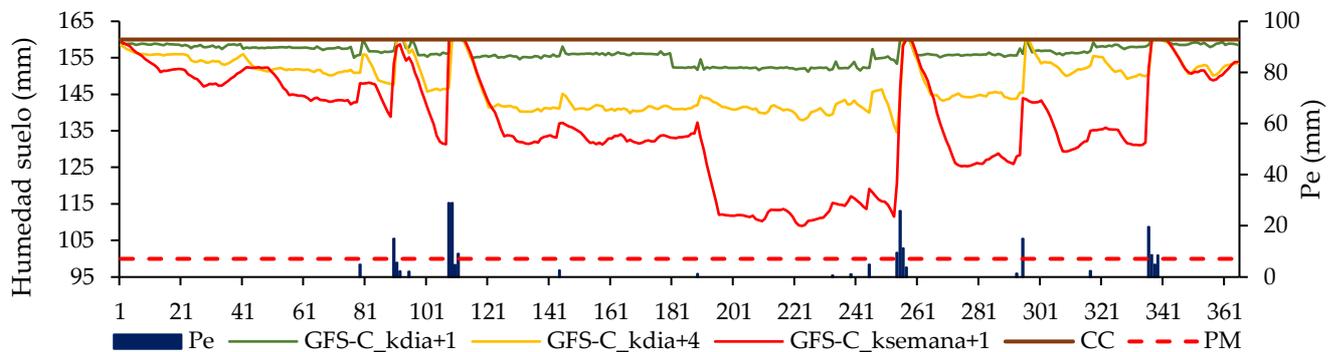


Figura 2. Evolución de la humedad del suelo (mm) en el año 2019, para el servicio climático de GFS, habiendo aplicado el FK y compensando su error con la predicción anterior para las VT de 1, 4 y 7 y la Pe (mm) del año 2019 para un suelo FAA.

El riego llevado a cabo por los usuarios, produce variaciones en la humedad del suelo dependiendo de la dosis de riego que se aplica. Como se observa en la figura 3, los riegos determinan que la humedad esté cerca de la humedad objetivo (CC) produciendo un elevado drenaje, y no teniendo en cuenta la precipitación, la cual drena en su mayoría.

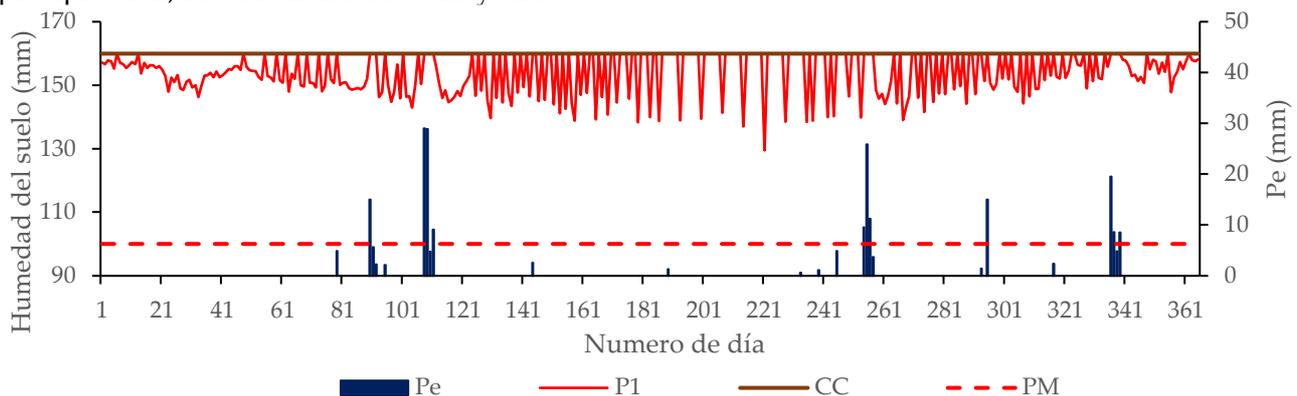


Figura 3. Evolución de la humedad del suelo (mm) producida por el riego para la parcela P1 y la Pe (mm) del año 2019.

Los resultados de los escenarios para las VT de 1, 4 y 7 días se dividen en dos apartados, por un lado, las predicciones de las necesidades del cultivo compensando el error con la predicción anterior y por otro lado sin compensarla. En el apartado que se describen los resultados de los escenarios sin compensar el error de la predicción anterior, se introducen las tres parcelas ya que los usuarios no compensan los errores pasados.

3.3.1. Efectos de los escenarios en la humedad del suelo con escenarios no compensados.

Al aumentar el número de días de predicción se reduce la cantidad de riego (mm año^{-1}). Esto es debido a que hay mayor número de semanas que no riegan porque la humedad del suelo más las NR son superiores a la humedad objetivo. En cuanto a las parcelas seleccionadas por los usuarios, la parcela P1 se le aporta $927,8 \text{ mm año}^{-1}$, estando muy por encima de las dosis para los escenarios predichos con datos meteorológicos y mediante datos históricos, y de las parcelas P2 y P3 a las que se les aportan $543,8$ y $423,3 \text{ mm año}^{-1}$ respectivamente, como se puede ver en la figura 4. Por otro lado, el drenaje aumenta al reducir el número de días predichos para todos los escenarios, también el posible estrés que sufra el

cultivo, y como cabía esperar es mayor en suelos más arenosos que de arcillosos. Para el riego producido por el agricultor la parcela P1 presenta drenajes de 841.9, 468.6 y 352.8 mm año⁻¹ para los suelos FA, FAA y AL respectivamente siendo drenajes muy superiores al resto de escenarios predichos y estimados.

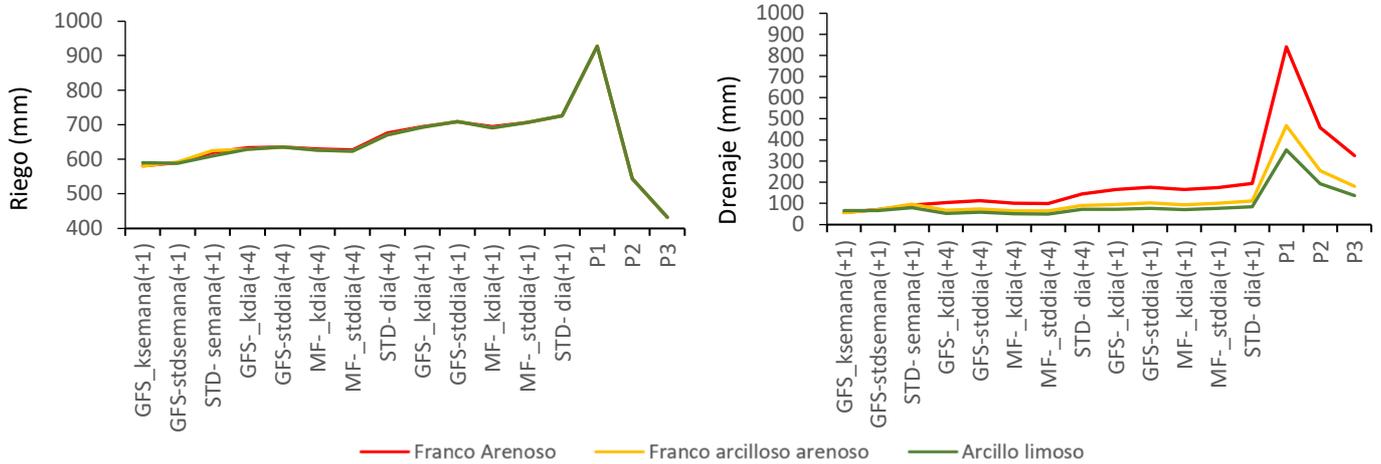


Figura 4. Riego y drenaje con errores no compensados con VT de 1, 4 y 7 días para la parcela tipo y de las 3 parcelas agrícolas (mm), para 3 tipos de textura de suelo. La escala de las gráficas es diferente.

3.3.2. Efectos de los escenarios en la humedad del suelo con escenarios compensados

Como en los escenarios con errores no compensados al aumentar el número de días de VT de 1 a 4 o 7 días, se reduce la cantidad de NR anual. Esto es debido a que hay mayor número de semanas que no riegan en predicciones a 7 días que en predicciones a 4 días y estas a su vez a las predicciones a 1 día, porque la humedad del suelo más las NR son superiores a la humedad objetivo. Por otro lado, el drenaje aumenta al reducir el número de días predichos debido al aumento de la NR y al situar la humedad más próxima a la CC para todos los escenarios; el drenaje es mayor en suelos más arenosos que de arcillosos como se puede ver en la figura 5.

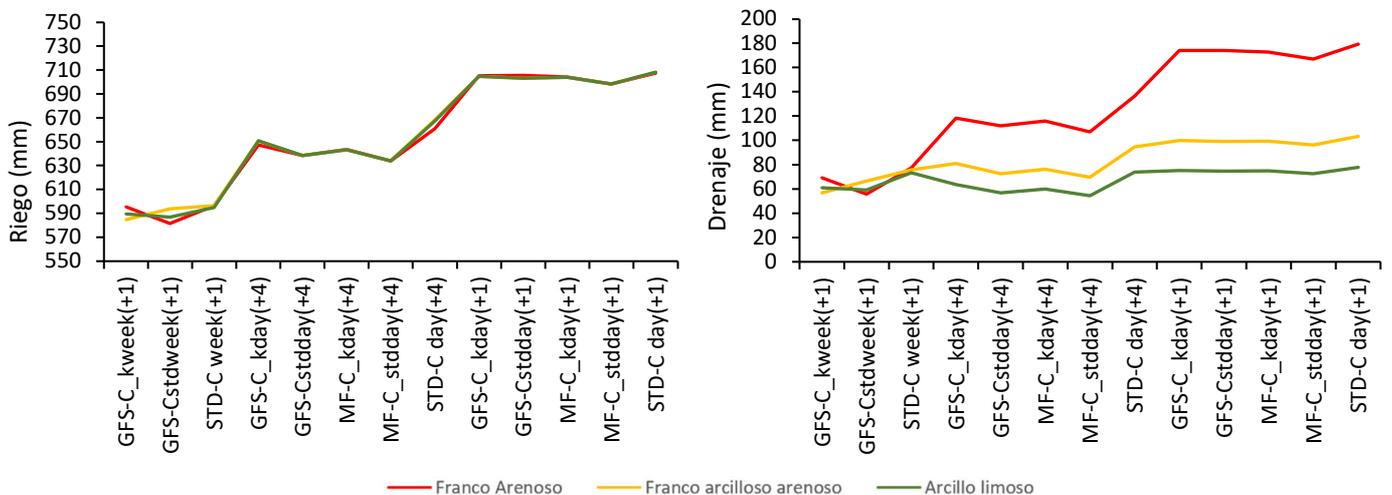


Figura 5. Riego y drenaje con errores no compensados para VT de 1, 4 y 7 días y 3 tipos de textura de suelo (mm). La escala de las gráficas es diferente.

4. Conclusiones

Los servicios climáticos GFS y MF se pueden utilizar para la programación de riego con un menor error que al trabajar con la metodología tradicional de utilizar la ETo de la semana anterior para compensar la ETc sucedida. Al aplicar el Filtro de Kalman se redujo la incertidumbre entre las medidas y las predicciones al disminuir el error entre la ETo predicha o estimada frente a la determinada mediante medidas de parámetros climáticos en las estaciones meteorológicas. La VT que mejor mantiene la humedad del suelo próxima a la humedad objetivo es la de 1 día para todos los escenarios, aunque la VT de 7 días es la que más eficiente es en cuanto al volumen a aportar anualmente y la que menor drenaje produce, bajo la suposición de no regar si la predicción más la humedad del día anterior se superará la CC.

La relación o coeficiente entre el volumen de agua drenado y el volumen aportado (riego y precipitación) para un suelo franco arcillo arenoso considerando la programación de riego empírica de los agricultores es del 40,8%, 33,3% y del 27,6% para las fincas P1, P2 y P3 respectivamente y del 7% cuando se utiliza las necesidades de riego son calculadas mediante la predicción meteorológica $GFS_{K_{semana}+1}$.

Aunque todos los escenarios simulados han mantenido la humedad del suelo por encima del punto de marchitamiento, habría que validar agrónomicamente los distintos escenarios modelizados para verificar cómo influye finalmente la programación del riego sobre el estado hídrico de la planta y la producción final.

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. Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration guide- lines for computing crop water requirements., (1998).
2. D. Vanella, D.S. Intrigliolo, S. Consoli, G. Longo-Minnolo, G. Lizzio, R.C. Dumitrache, E. Mateescu, J. Deelstra, J.M. Ramírez-Cuesta, Comparing the use of past and forecast weather data for estimating reference evapotranspiration, *Agric. For. Meteorol.* 295 (2020) 108196. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108196>.
3. I.J. Lorite, J.M. Ramírez-Cuesta, M. Cruz-Blanco, C. Santos, Using weather forecast data for irrigation scheduling under semi-arid conditions, *Irrig. Sci.* 33 (2015) 411–427. <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0478-0>.
4. 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>.
5. Castel, J. Water use of developing citrus canopies in Valencia, *Proceeding Int. Soc. Citric.* IX Congres (2000)223–226.
6. Albertos, P.; Sala, A. Multivariable control systems : an engineering approach, (2004).
7. FAO. AquaCrop training handbooks Book I . Understanding AquaCrop, (2015) 49.