

B-04-2023

Comunicación científico-técnica

Efecto del método de estimación de la Evapotranspiración de Referencia sobre las dotaciones de riego anuales de cuatro cultivos en Albacete

Effect of the Reference Evapotranspiration estimation method on the annual irrigation requirements of four crops in Albacete.

Román, A.¹; López-Urrea, R.²; Royuela, A.³; Turégano-Pastor, J.V.⁴ González-Altozano, P.⁴; Martí, P.¹

¹ Departament d'Enginyeria Industrial i Construcció. Universitat de les Illes Balears. Palma. a.roman@uib.es

² Instituto Técnico Agronómico Provincial (ITAP). Albacete.

³ CVER. Universitat Politècnica de València. Valencia.

⁴ Departament d'Enginyeria Rural i Agroalimentària. Universitat Politècnica de València. Valencia

Resumen:

Las necesidades de riego de los cultivos se determinan a partir de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Ésta se suele calcular aplicando la metodología propuesta por la FAO, multiplicando la evapotranspiración de la superficie de hierba de referencia (ET_o) por un coeficiente de cultivo (K_c). La FAO propone adoptar unas curvas de K_c con 4 tramos diferenciados para cada estado fenológico del cultivo (inicial, desarrollo, mitad y final de temporada). Para generar estas curvas se sugiere para cada cultivo la duración orientativa de cada etapa y el valor de K_c correspondiente, así como la fecha aproximada de siembra.

Asimismo, la FAO propone la ecuación de Penman-Monteith (FAO-PM) como método estándar para estimar la ET_o . Sin embargo, su aplicación no es posible en muchos casos por la ausencia parcial o total de las variables climáticas requeridas. Por ello, se han desarrollado un gran número de métodos alternativos para dar solución a los diferentes escenarios de disponibilidad de datos. Entre éstos se halla la ecuación de Hargreaves-Samani (HS), cuyo uso está ampliamente extendido, porque solo requiere datos de temperatura del aire.

Existen un gran número de estudios sobre la precisión de diferentes métodos para estimar la ET_o . Sin embargo, pocos estudios han evaluado la repercusión de la precisión en la estimación

de ET_o sobre la estimación de ET_c . Este estudio pretende evaluar el efecto del método escogido para estimar ET_o sobre las dotaciones anuales de riego de 4 cultivos de interés en la provincia de Albacete (trigo, maíz, cebolla y almendro) asumiendo la duración (días) de los ciclos de K_c sugeridos en FAO56. Los valores de ET_o se han calculado mediante las ecuaciones de FAO-PM y HS. Asimismo se han utilizado valores lisimétricos de ET_o para calcular las dotaciones de referencia. Los datos corresponden a una serie de 8 años de la estación lisimétrica ubicada en Albacete. La FAO plantea 12 ciclos de cultivo diferentes para trigo y maíz, respectivamente, así como 6 ciclos para cebolla y 1 para almendro. Se aplicó la metodología de la FAO para el cálculo de la ET_c , asignando el K_c correspondiente a cada día juliano del ciclo del cultivo para la serie de 8 años disponible, y se calcularon las dotaciones anuales correspondientes. Asimismo, se calcularon los errores de estimación de ET_o y ET_c para los días del ciclo del cultivo.

La proporción entre ET_c y ET_o anual acumulada durante el ciclo del cultivo se mantiene constante para los tres tipos de valores considerados de ET_o . El efecto de la curva de K_c sobre las dotaciones de ET_c es variable y parece depender de la relación entre la estacionalidad del ciclo asignado y la precisión de las estimaciones de la ET_o durante cada etapa de dicho ciclo. El error medio de sesgo (MBE) de las estimaciones de ET_o es un indicador más adecuado que el error cuadrático medio relativo (RRMSE) para evaluar la pauta de infra-/sobredotación anual de ET_c . Un menor RRMSE en la estimación de la ET_o puede no corresponder con una menor infra-/sobredotación anual de ET_c .

Palabras clave: evapotranspiración del cultivo, necesidades de riego, lisímetro, coeficiente de cultivo, FAO Penman-Monteith.

Abstract:

Crop irrigation requirements are determined based on crop evapotranspiration (ET_c). Usually, its calculated using the methodology proposed by FAO, which involves multiplying the grass reference evapotranspiration (ET_o) by a crop coefficient (K_c). FAO recommends adopting K_c curves with four different sections for each phenological stage of the crop (initial, development, mid-season, and end of season). Therefore, FAO56 suggests for a wide range of crops indicative values for the duration of each stage for various planting periods and climatic regions.

FAO also recommends the use of the Penman-Monteith equation (FAO-PM) as the standard method for estimating ET_o . However, its application is often not possible in many cases, due to the partial or total lack of the required climatic variables. Consequently, numerous alternative methods have been developed to address different scenarios of data availability. Among these, the use of the Hargreaves-Samani (HS) equation is widely extended, as it only requires air temperature data.

While numerous studies have examined the accuracy of different methods for estimating ET_o , limited research has been dedicated to evaluating the impact of ET_o estimation accuracy on ET_c estimation. This study aims to assess the influence of the method adopted for estimating ET_o on the annual irrigation water requirements of 4 crops in the province of Albacete (wheat, maize, onion and almond). The study adopts the duration (in days) of the K_c cycles suggested in FAO56. ET_o values were calculated using both the FAO-PM and HS equations. Additionally, lysimetric ET_o values were used to determine the benchmark irrigation requirements. The data series used encompass an eight-year period from a lysimetric station located in Albacete.

FAO56 suggests 12 different crop cycles for wheat and maize, respectively, along with 6 cycles for onion and 1 for almond. The FAO56 methodology was applied to calculate ET_c , i.e., a K_c value was assigned to each Julian day of the crop cycle for the available eight-year series. Subsequently, the corresponding annual irrigation requirements were computed. Estimation errors for both ET_o and ET_c during the crop cycle stages were also calculated.

It is noteworthy that the ratio between ET_c and the annual cumulative ET_o during the crop cycle remains constant for the three types of ET_o values considered. The impact of the K_c curve on ET_c irrigation requirements is variable and seems to depend on the relationship between the seasonality of the assigned cycle and the accuracy of the ET_o estimates during each stage of the cycle. The mean bias error (MBE) in ET_o estimates seems more suitable than the relative root mean square error (RRMSE) for evaluating the pattern of annual under- or over-irrigation dosing. A lower RRMSE in ET_o estimation may not necessarily correspond to reduced annual under- or over-irrigation of ET_c .

Keywords: crop evapotranspiration, irrigation requirements, lysimeter, crop coefficient, FAO Penman-Monteith.

1. Introducción

En un contexto de limitación de recursos hídricos y de aumento de la demanda mundial de alimentos como consecuencia del crecimiento demográfico, una gestión adecuada del agua de riego es esencial para optimizar su eficiencia y mantener al mismo tiempo niveles satisfactorios de productividad y calidad de los cultivos. Las necesidades de riego se determinan a partir de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). Ésta, generalmente, se calcula aplicando la metodología propuesta por la FAO a partir del producto entre la evapotranspiración de la superficie de un pasto de referencia (ET_o) y un coeficiente de cultivo específico (K_c) variable en función de la etapa vegetativa del cultivo [1].

La ET_o representa la demanda de agua de un cultivo de referencia hipotético, definido como un pasto herbáceo, normalmente una pradera de gramíneas, con una altura de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 [2]. Este concepto se aplica para determinar la demanda evaporativa de la atmósfera, independientemente del tipo de cultivo, de su estado de desarrollo y de su manejo [3]. Por otra parte, la ET_c representa el requerimiento de agua de un cultivo específico cuando se encuentra exento de plagas y enfermedades, con una adecuada fertilización y que se desarrolla en parcelas extensas, bajo condiciones óptimas de suelo y agua, llegando a su máxima producción de acuerdo a las condiciones climáticas de la zona.

Uno de los dispositivos experimentales más precisos y fiables para medir la evapotranspiración es el lisímetro, que mide algunos de los componentes del balance de agua en una zona de cultivo controlada [4]. Aunque es un método muy preciso y fiable para la determinación de la ET_o , debido a su elevado coste y sus dificultades de manejo, se han desarrollado como alternativa una gran variedad de modelos matemáticos para estimar ET_o en las últimas décadas. La ecuación de FAO Penman-Monteith (FAO-PM) se estableció como método de referencia para la estimación de ET_o [1]. No obstante, su aplicación no es posible en muchos casos por la ausencia parcial o total de las variables climáticas requeridas. Por ello, han surgido métodos alternativos para dar solución a los diferentes escenarios de disponibilidad de datos. Entre éstos se halla la ecuación de Hargreaves-Samani (HS) [5], cuyo uso está ampliamente extendido, porque solo requiere datos de temperatura del aire.

Se pueden encontrar en la bibliografía un gran número de estudios sobre la precisión de diferentes métodos para estimar ET_o , cuya revisión está fuera del alcance de este trabajo. Sin embargo, pocos estudios han centrado sus esfuerzos en evaluar la repercusión de la precisión de las estimaciones de ET_o sobre las estimaciones de ET_c . Los estudios sobre ET_o se centran en períodos anuales íntegros y no contemplan ningún ciclo de cultivo concreto, cuya estacionalidad podría provocar eventualmente un sesgo diferente en la estimación de la dotación anual.

Este estudio pretende evaluar el efecto del método escogido para estimar la ET_o sobre las dotaciones anuales de riego de 4 cultivos de interés en la provincia de Albacete, concretamente

el trigo (*Triticum aestivum* L.), el maíz (*Zea mays* L.), la cebolla (*Allium cepa* L.) y el almendro (*Prunus dulcis* Mill.), adoptando las curvas de Kc sugeridas en FAO56 [1].

2. Materiales y métodos

2.1 Conjunto de datos

El conjunto de datos de las variables climáticas utilizadas para este estudio ha sido obtenido de la estación lisimétrica de “Las Tiasas” ubicada en Albacete, sureste de España, representativa del entorno de las 110.000 ha de regadío, con una altitud respecto al nivel del mar de 695 m, latitud 39°3′ Norte y longitud 2°5′ Este.

Se han tomado medidas diarias de temperatura máxima (T_{max}), mínima (T_{min}) y media (T_{mean}), humedad relativa del aire máxima (HR_{max}) y mínima (HR_{min}), radiación solar (R_s), velocidad media del viento a 2 m de altura (u_2). Estas variables se han utilizado para el cálculo de la ET_o , entre el mes de enero de 2007 hasta diciembre del 2015. Este periodo climatológico se puede considerar normal, sin presencia de cambios bruscos o notables entre años. La Tabla 1 presenta para cada parámetro climático su valor promedio anual y global, así como su desviación estándar para el periodo 2007-2015. Los datos técnicos del equipo utilizado en la estación agroclimática se pueden consultar en Martí et al. [4].

Tabla 1. Promedio y desviación estándar de los parámetros climáticos de la estación del estudio.

Año	T_{max} (°C)		T_{min} (°C)		T_{mean} (°C)		ΔT (°C)		HR (%)		R_s (W/m ²)		u_2 (m/s)		ET_o (mm)	
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
2007	20.65	8.32	6.27	6.56	13.17	7.41	14.38	4.78	73.49	20.00	160.23	76.87	2.58	1.26	3.35	2.42
2008	20.78	8.34	5.84	6.43	12.95	7.03	14.95	5.01	70.34	15.46	153.55	75.24	3.02	1.50	3.44	2.64
2009	22.13	9.11	6.55	6.44	13.95	7.46	15.58	5.09	68.55	15.84	156.87	76.93	2.98	1.69	3.67	2.42
2011	20.27	8.17	6.56	6.30	13.18	7.13	13.71	4.89	75.68	14.93	153.65	74.78	2.56	1.32	3.35	2.32
2012	21.49	8.82	6.06	6.96	13.72	7.83	15.44	5.11	67.36	16.62	174.19	69.21	2.60	1.38	3.79	2.41
2013	19.88	8.64	6.56	6.68	12.93	7.72	13.32	4.58	74.81	13.11	162.68	80.53	3.14	1.82	4.11	2.52
2014	21.05	8.15	7.50	5.92	14.19	6.82	13.55	4.65	73.80	14.44	161.91	78.35	3.08	1.71	4.07	2.29
2015	21.34	8.43	6.79	7.00	13.84	7.67	14.56	4.65	74.17	14.49	157.01	72.97	2.72	1.66	3.34	2.01
\bar{X}	20.95	8.50	6.51	6.54	13.49	7.38	14.44	4.84	72.28	15.61	160.01	75.61	2.83	1.54	3.64	2.38

T_{max} : temperatura máxima del aire, T_{min} : temperatura mínima del aire, T_{mean} : temperatura media del aire, ΔT : rango térmico diario, HR: humedad relativa media, R_s : radiación solar, u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura, ET_o : evapotranspiración de referencia.

Además, la ET_o se midió mediante un lisímetro de pesada, instalado en una parcela de 15.000 m² de pasto (*Festuca arundinacea* Schreb., cv. "Galatea") regado mediante aspersión y mantenido en condiciones óptimas de crecimiento. El vaso del lisímetro (2.3 x 2.7 m² y 1.7 m de fondo) sembrado y mantenido en condiciones idénticas las del resto de la parcela, transmite su peso, con un sistema de vigas y contrapesos, a una célula de carga conectada a un datalogger que registra de forma continua las variaciones del mismo. Se pueden encontrar más detalles sobre las características técnicas y el funcionamiento del lisímetro en López-Urrea et al. [6].

2.2 Métodos para la estimación de la ET_c

Aplicando la metodología de la FAO para el cálculo de la ET_c , y asignando el K_c correspondiente a cada día juliano del ciclo del cultivo para la serie de 8 años disponible, se calcularon las necesidades hídricas anuales (NR_c ; $m^3 ha^{-1}$) correspondientes de cada cultivo a partir de la suma de los valores diarios de ET_c , considerando valores de ET_o de lisímetro o estimaciones de FAO-PM o HS.

2.2.1 Ecuación FAO56 Penman Monteith

La estimación de valores diarios de ET_c ($mm día^{-1}$) mediante valores de ET_o FAO-PM [1] se realizó utilizando la siguiente expresión:

$$ET_c^{PM} = K_c ET_o^{PM} = K_c \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

donde R_n es la radiación neta de la superficie del cultivo ($MJ m^{-2} d^{-1}$); G es el flujo de calor del suelo ($MJ m^{-2} d^{-1}$), nulo para estimaciones diarios; T es la temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}C$); u_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura ($m s^{-1}$); e_s corresponde a la presión de saturación de vapor (kPa); e_a es la presión real de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de saturación de la temperatura del aire ($kPa ^{\circ}C^{-1}$); γ es la constante psicométrica ($kPa ^{\circ}C^{-1}$) y K_c es el coeficiente de cultivo correspondiente a cada día del ciclo.

2.2.2 Ecuación Hargreaves-Samani

La estimación de valores diarios de ET_c ($mm día^{-1}$) mediante valores de ET_o HS [5] se realizó utilizando la expresión:

$$ET_c^{HS} = K_c ET_o^{HS} = K_c AHC R_a (T + 17.8) \sqrt{\Delta T} \quad (2)$$

donde R_a es la radiación extraterrestre ($mm día^{-1}$); ΔT es el rango térmico diario ($^{\circ}C$); T es la temperatura media diaria del aire ($^{\circ}C$); AHC es el coeficiente de ajuste de Hargreaves, igual a 0.0023 en la ecuación original.

2.3 Cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos

Se han determinado las necesidades hídricas anuales de cada cultivo (NR_c ; $m^3 ha^{-1}$) como la suma de los valores de ET_c diarios, calculados con valores de ET_o de lisímetro, FAO-PM y HS, respectivamente. Adicionalmente, se han calculado unas necesidades hídricas anuales de referencia (i.e. a partir de ET_o : NR_o ; $m^3 ha^{-1}$) para cada valor considerado de ET_o (FAO-PM, HS y lisímetro) como el sumatorio de los valores de ET_o de los días del ciclo del cultivo considerados para calcular ET_c .

En concreto, se han seleccionado cuatro cultivos de interés en la provincia de Albacete adoptando las curvas de K_c sugeridas en FAO56. Se consideran, por tanto, 12 ciclos diferentes para trigo y maíz, respectivamente, así como 6 ciclos para cebolla y 1 para almendro. La Tabla 2 muestra los datos seleccionados para construir la curva de K_c de los cultivos seleccionados.

Tabla 2. Duración de las etapas del ciclo de cultivo (días) y coeficiente de cultivo (Kc) de cada una de ellas de los cultivos seleccionados en el estudio

Nombre científico	Cultivo	Observaciones	Abreviación	Linic	Ldes	Lmed	Lfin	Total	Época plantación	Kc ini	Kc med	Kc end
Punus dulcis	Almendra	sin cubierta vegetal	Almond	30	50	130	30	240	Marzo	0,40	0,90	0,65
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 1	-	Spr. Wheat 1	15	25	50	30	120	Noviembre	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 2	-	Spr. Wheat 2	20	25	60	30	135	Marzo	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 3	-	Spr. Wheat 3	15	30	65	40	150	Julio	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 4	-	Spr. Wheat 4	40	30	40	20	130	Abril	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 5	-	Spr. Wheat 5	40	60	60	40	200	Noviembre	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de primavera 6	-	Spr. Wheat 6	20	50	60	30	160	Diciembre	0,30	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 1	Baja humedad de grano	Win. Wheat LGM 1	20	60	70	30	180	Diciembre	0,70	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 1	Alta humedad de grano	Win. Wheat HGM 1	20	60	70	30	180	Diciembre	0,70	1,15	0,40
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 2	Baja humedad de grano	Win. Wheat LGM 2	30	140	40	30	240	Noviembre	0,70	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 2	Alta humedad de grano	Win. Wheat HGM 2	30	140	40	30	240	Noviembre	0,70	1,15	0,40
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 3	Baja humedad de grano	Win. Wheat LGM 3	160	75	75	25	335	Octubre	0,70	1,15	0,25
Triticum aestivum	Trigo blando de invierno 3	Alta humedad de grano	Win. Wheat HGM 3	160	75	75	25	335	Octubre	0,70	1,15	0,40
Allium cepa	Cebolla 1	Seca	Onion dry 1	15	25	70	40	150	Abril	0,70	1,05	0,75
Allium cepa	Cebolla 2	Seca	Onion dry 2	20	35	110	45	210	Octubre	0,70	1,05	0,75
Allium cepa	Cebolla 1	Verde	Onion green 1	25	30	10	5	70	Abril	0,70	1,00	1,00
Allium cepa	Cebolla 2	Verde	Onion green 2	20	45	20	10	95	Octubre	0,70	1,00	1,00
Allium cepa	Cebolla 3	Verde	Onion green 3	30	55	55	40	180	Marzo	0,70	1,00	1,00
Allium cepa	Cebolla	Semilla	Onion seed	20	45	165	45	275	Septiembre	0,70	1,05	0,80
Zea mays	Maiz 1	Baja humedad de grano	Maize LGM 1	30	50	60	40	180	Abril	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 1	Alta humedad de grano	Maize HGM 1	30	50	60	40	180	Abril	0,30	1,20	0,60
Zea mays	Maiz 2	Baja humedad de grano	Maize LGM 2	25	40	45	30	140	Diciembre	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 2	Alta humedad de grano	Maize HGM 2	25	40	45	30	140	Diciembre	0,30	1,20	0,60
Zea mays	Maiz 3	Baja humedad de grano	Maize LGM 3	20	35	40	30	125	Junio	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 3	Alta humedad de grano	Maize HGM 3	20	35	40	30	125	Junio	0,30	1,20	0,60
Zea mays	Maiz 4	Baja humedad de grano	Maize LGM 4	20	35	40	30	125	Octubre	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 4	Alta humedad de grano	Maize HGM 4	20	35	40	30	125	Octubre	0,30	1,20	0,60
Zea mays	Maiz 5	Baja humedad de grano	Maize LGM 5	30	40	50	30	150	Abril	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 5	Alta humedad de grano	Maize HGM 5	30	40	50	30	150	Abril	0,30	1,20	0,60
Zea mays	Maiz 6	Baja humedad de grano	Maize LGM 6	30	40	50	50	170	Abril	0,30	1,20	0,35
Zea mays	Maiz 6	Alta humedad de grano	Maize HGM 6	30	40	50	50	170	Abril	0,30	1,20	0,60

2.4 Evaluación de los modelos

Se han calculado varios indicadores para evaluar la precisión de los modelos propuestos. El error cuadrático medio relativo (RRMSE), y el error medio de sesgo (MBE) se obtuvieron de acuerdo con las ecuaciones 3 y 4, respectivamente, siendo x_i el valor de referencia, y_i el valor estimado y n el número total de datos diarios. Las medidas lisimétricas se han considerado como referencia y los valores de FAO-PM y HS como estimaciones. En un segundo escenario, las estimaciones de HS se han evaluado tomando FAO-PM como referencia.

$$RRMSE = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - y_i \quad (4)$$

Se han calculado ambos indicadores tanto para valores de ET_c , así como para los valores de ET_o correspondientes exclusivamente a los días julianos del ciclo del cultivo. Además, se propone la determinación de un factor adimensional de relación entre las NR_c y las NR_o para cada modelo a partir de la ecuación 5:

$$\frac{NR_c}{NR_o} = \frac{\sum_{i=1}^n ET_{Ci}}{\sum_{i=1}^n ET_{oi}} \quad (5)$$

3. Resultados y discusión

La Figura 1 muestra el MBE de NR_o y NR_c ($m^3 ha^{-1}$) de valores de ET_o de HS usando FAO-PM como referencia y de valores de ET_o de HS y FAO-PM usando valores de ET_o de lisímetro como referencia. Los valores negativos indican una sobreestimación de las necesidades hídricas anuales medias mientras que los valores positivos indican una infraestimación. Al comparar el MBE de NR_o vs. NR_c , parece no haber una tendencia clara. En algunos cultivos NR_c presenta mayor error que NR_o y, en otros, es al revés. Por ejemplo, en el caso del maíz (Maize) HGM 1 el MBE entre lisímetro vs. HS es de $368.07 m^3 ha^{-1}$ en NR_c frente a $329.67 m^3 ha^{-1}$ en NR_o . En el trigo blando de primavera 3 (Spr. Wheat 3) sucede lo contrario, con valores de 325.24 vs. $372.51 m^3 ha^{-1}$ respectivamente. En el caso Spr. Wheat 2, el MBE entre lisímetro vs. FAO-PM es de $93.24 m^3 ha^{-1}$ en NR_c frente a $67.94 m^3 ha^{-1}$ en NR_o . Análogamente, en Spr. Wheat 3, los valores respectivos serían de 255.69 vs. $267.88 m^3 ha^{-1}$. Aunque hay excepciones, las estimaciones de ET_o del modelo FAO-PM conducen a MBE menores en las estimaciones de NR_o y NR_c que las de HS, como podía esperarse, al ser un modelo más preciso. Sin embargo, las posibles diferencias de estimación de ET_o entre los dos modelos podrían no traducirse en diferencias significativas de NR_o y NR_c . Para un mismo cultivo, los valores de NR_o y NR_c serían relativamente similares para los diferentes valores de ET_o considerados, especialmente al comparar valores procedentes de estimaciones de ET_o a partir de modelos.

Las diferencias de NR_o y NR_c (así como sus respectivos MBE) fluctúan entre cultivos y entre ciclos de un mismo cultivo. Por ejemplo, el almendro (Almond) presenta estimaciones anuales promedios de NR_c de 7740.54 , 7463.38 y $7442.64 m^3 ha^{-1}$ para lisímetro, FAO-PM y HS,

respectivamente. El trigo blando de invierno 3 (Win. Wheat LGM 3, 8574.07 m³ ha⁻¹ y HGM 3, 8665.59 m³ ha⁻¹), con inicio de ciclo en octubre, presenta mayores necesidades hídricas que el trigo blando de invierno 1 (Win. Wheat LGM 1, 2450.94 m³ ha⁻¹ y HGM 1, 2541.07 m³ ha⁻¹), con inicio de ciclo en diciembre, y que el trigo blando de invierno 2 (Win. Wheat LGM 2, 4005.81 m³ ha⁻¹ y HGM 2, 4123.47 m³ ha⁻¹), con inicio de ciclo en noviembre. Éstos tres ciclos presentan idénticos K_c, pero con diferentes duraciones de cada etapa y fecha de siembra. El mismo hecho sucede en ciclo del maíz 1 (Maize LGM 1, 7494.68 m³ ha⁻¹ y HGM 1, 7696.44 m³ ha⁻¹), siembra en abril, con mayores requerimientos hídricos respecto a los ciclos 5 (Maize LGM 5, 6270.48 m³ ha⁻¹ y HGM 5, 6466.52 m³ ha⁻¹) y 6 (Maize LGM 6, 6960.16 m³ ha⁻¹ y HGM 6, 7244.7 m³ ha⁻¹). Ambos ciclos se inician en abril y presentan los mismos K_c que el maíz 1, pero con menores necesidades hídricas debido a tener una menor duración (días) de su ciclo.

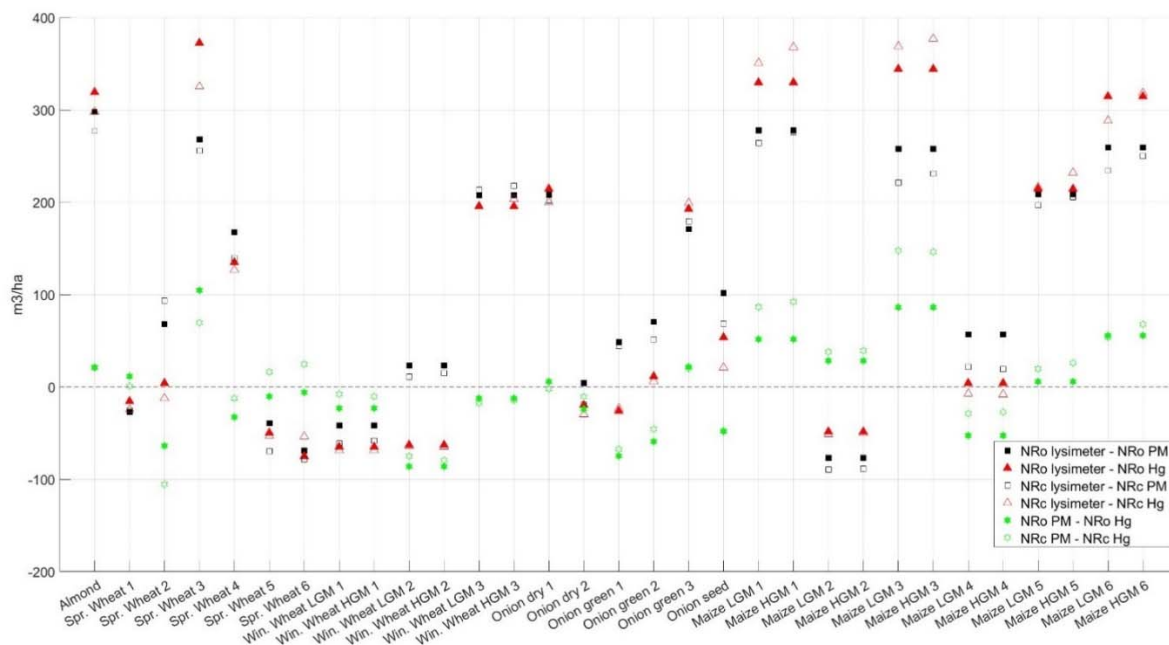


Figura 1. MBE de las estimaciones de NRo (m³ ha⁻¹) y NRc (m³ ha⁻¹) anuales promedios de las ecuaciones FAO-PM y HS frente a valores de lisímetro.

Así pues, la pauta de infra-/sobrestimación anual parece estar condicionada en gran medida por la duración del ciclo de cultivo y su fecha de siembra (y, por tanto, por la estacionalidad de los rangos de E_{To} involucrados), así como por sus valores correspondientes de K_c. Finalmente, el uso de valores de FAO-PM como referencia en lugar de valores de lisímetro (estrella verde vs triangulo rojo) conduciría a conclusiones diferentes, y eventualmente erróneas, al valorar el efecto de las estimaciones de HS, de acuerdo con las conclusiones de Martí et al. [4].

Para evaluar el efecto del modelo escogido para estimar E_{To} sobre las necesidades anuales NRo y NRc, la Figura 2 presenta el RRMSE de la estimación de los valores diarios de E_{Tc} y E_{To} para los modelos de HS y FAO-PM usando valores lisimétricos como referencia, así como para HS usando valores FAO-PM como referencia.

Se aprecia un menor RRMSE en la estimación de ET_o que en la estimación de ET_c para todos los modelos. El efecto de la curva de K_c sobre el RRMSE de ET_c es variable, dependiendo de la precisión de las estimaciones de la ET_o durante cada etapa de dicho ciclo (y del K_c que se aplique en aquel momento). La diferencia de RRMSE entre cultivos y ciclos se ve afectada por la estacionalidad del ciclo asignado. En los cultivos que se siembran en los meses más fríos el valor del RRMSE se incrementa en mayor medida respecto a aquellos que inician su ciclo entre marzo y agosto, pues en verano los modelos de ET_o tienden a presentar menor error relativo. Por ejemplo, Maize LGM 1 (abril) presenta un RRMSE de 0.112 y 0.130 para ET_o y ET_c , respectivamente, calculados con FAO-PM, en contraposición a Maize LGM 2 (diciembre) con errores de 0.254 y 0.296; o Maize LGM 4 (octubre) con valores de 0.241 y 0.302.

Asimismo, las estimaciones de ET_o de FAO-PM presentan menores errores que las de HS y la diferencia de RRMSE es relativamente constante para todos los cultivos, como podía esperarse. Esto se debe a que los datos climáticos son los mismos para todos los cultivos y ET_o excluye el efecto de K_c . Las diferencias de RRMSE entre cultivos se deben a que, en cada caso, se considera una fracción específica del año para calcular ET_o , dada por cada ciclo de cultivo, así como por su duración. Sin embargo, al comparar el RRMSE con su respectivo MBE puede comprobarse que una diferencia similar de RRMSE en ET_o entre FAO-PM y HS puede traducirse en diferencias de MBE (infra-/sobrestimaciones) significativas o no (por ejemplo, Maize 3 vs. Maize 4 vs. Maize 5). Ello podría deberse a que el sesgo en las estimaciones diarias de ET_o podría ser fluctuante a lo largo del ciclo y compensarse al calcular las necesidades anuales. Así, las diferencias en necesidades anuales podrían reducirse, aunque el RRMSE diario fuera relevante.

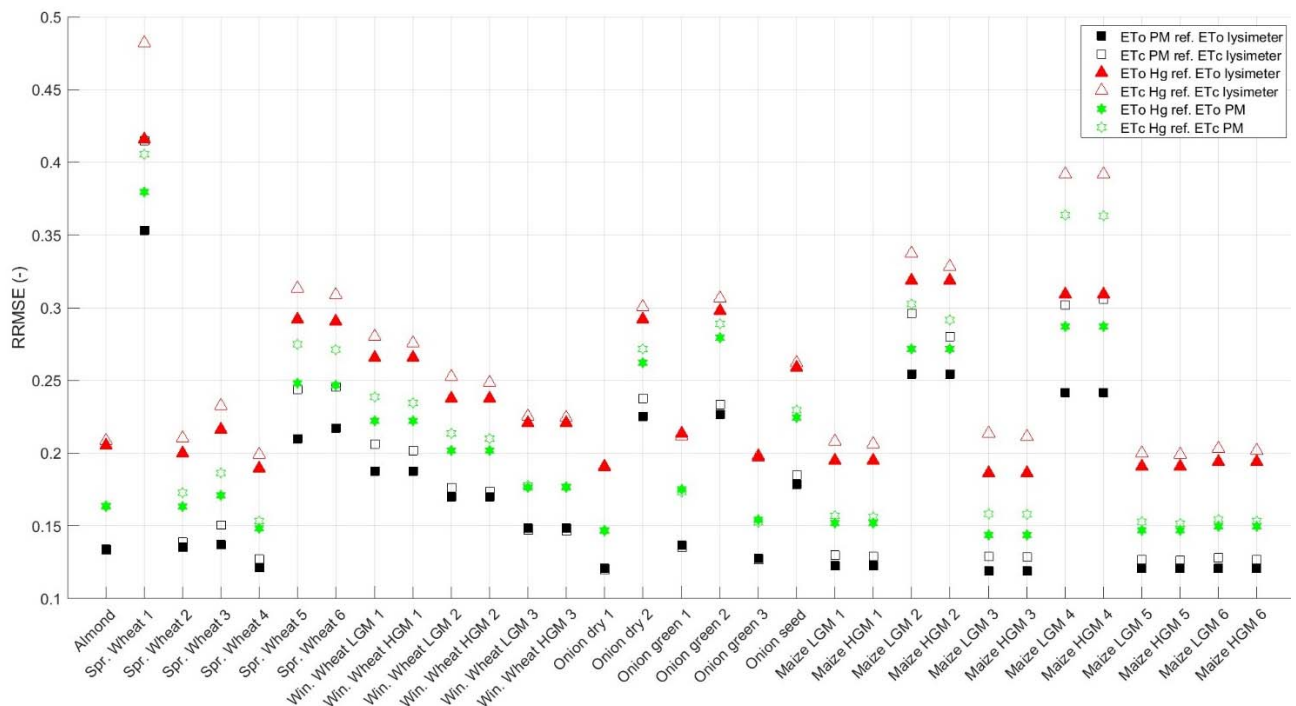


Figura 2. RRMSE de las estimaciones de NR_o y NR_c anuales promedios de las ecuaciones FAO-PM y HS en comparación con las medidas de lisímetro.

La Tabla 3 presenta las ratios NR_c/NR_o para los valores de ET_o de lisímetro y de las estimaciones de FAO-PM y HS para cada cultivo. Se puede observar que dichas ratios se mantienen relativamente constantes para cada cultivo y ciclo del mismo para los tres tipos de valores de ET_o considerados.

Tabla 3. Ratio NR_c/NR_o de las mediciones de lisímetro y ecuaciones FAO-PM y HS.

Cultivo	Observaciones	Época plantación	NR_c Lys / NR_o Lys	NR_c PM / NR_o PM	NR_c Hg / NR_o Hg
Almendra	sin cubierta vegetal	Marzo	0,832	0,829	0,829
Trigo blando de primavera 1	-	Noviembre	0,581	0,598	0,605
Trigo blando de primavera 2	-	Marzo	0,885	0,879	0,889
Trigo blando de primavera 3	-	Julio	0,844	0,840	0,844
Trigo blando de primavera 4	-	Abril	0,799	0,798	0,797
Trigo blando de primavera 5	-	Noviembre	0,788	0,803	0,793
Trigo blando de primavera 6	-	Diciembre	0,882	0,891	0,877
Trigo blando de invierno 1 LGM	Baja humedad de grano	Diciembre	0,947	0,954	0,950
Trigo blando de invierno 1 HGM	Alta humedad de grano	Diciembre	0,978	0,984	0,980
Trigo blando de invierno 2 LGM	Baja humedad de grano	Noviembre	0,918	0,919	0,917
Trigo blando de invierno 2 HGM	Alta humedad de grano	Noviembre	0,947	0,948	0,947
Trigo blando de invierno 3 LGM	Baja humedad de grano	Octubre	0,976	0,975	0,975
Trigo blando de invierno 3 HGM	Alta humedad de grano	Octubre	0,987	0,986	0,985
Cebolla 1	Seca	Abril	0,964	0,963	0,964
Cebolla 2	Seca	Octubre	0,855	0,863	0,859
Cebolla 1	Verde	Abril	0,842	0,841	0,845
Cebolla 2	Verde	Octubre	0,761	0,762	0,763
Cebolla 3	Verde	Marzo	0,952	0,950	0,951
Cebolla	Semilla	Septiembre	0,900	0,904	0,905
Maíz 1 LGM	Baja humedad de grano	Abril	0,918	0,918	0,914
Maíz 1 HGM	Alta humedad de grano	Abril	0,944	0,943	0,938
Maíz 2 LGM	Baja humedad de grano	Diciembre	0,825	0,843	0,834
Maíz 2 HGM	Alta humedad de grano	Diciembre	0,916	0,928	0,920
Maíz 3 LGM	Baja humedad de grano	Junio	0,853	0,853	0,842
Maíz 3 HGM	Alta humedad de grano	Junio	0,874	0,874	0,863
Maíz 4 LGM	Baja humedad de grano	Octubre	0,531	0,535	0,537
Maíz 4 HGM	Alta humedad de grano	Octubre	0,538	0,545	0,545
Maíz 5 LGM	Baja humedad de grano	Abril	0,902	0,901	0,899
Maíz 5 HGM	Alta humedad de grano	Abril	0,930	0,928	0,926
Maíz 6 LGM	Baja humedad de grano	Abril	0,894	0,894	0,894
Maíz 6 HGM	Alta humedad de grano	Abril	0,931	0,930	0,928

En el caso de un cultivo con diferentes ciclos, la ratio varía en función de la época de inicio del ciclo y de la longitud del mismo. Por ejemplo, el cultivo de Cebolla verde 2, con inicio de ciclo en octubre y duración de 95 días, presenta una ratio para valores de lisímetro de 0.761 frente a 0.952 de cebolla verde 3 (marzo y duración del ciclo de 180 días). Ambos cultivos presentan los mismos valores de K_c , no obstante, su curva difiere a causa de la duración de su ciclo y de su fecha de inicio. Otro ejemplo es la ratio de 0.918 para valores de lisímetro en Maize LGM 1 (abril y duración 180 días) frente a 0.894 de Maize LGM 6 (abril y duración 170 días).

Esta ratio podría interpretarse como un K_c ponderado para el cálculo de las necesidades hídricas anuales (NR_c) a partir de las necesidades anuales de ET_o (NR_o). Por tanto, permitiría

estimar las necesidades hídricas anuales sin necesidad de aplicar la metodología del coeficiente de cultivo para cada día del ciclo.

4. Conclusiones

Este estudio ha evaluado el efecto del método escogido para estimar la ET_o sobre las necesidades hídricas anuales de 4 cultivos de interés en la provincia de Albacete (trigo, maíz, cebolla y almendro) adoptando la duración y las curvas de los ciclos de K_c sugeridos en FAO56.

Se ha observado como las necesidades hídricas de un cultivo concreto difieren en función del modelo de ET_o aplicado, de la curva del K_c del propio cultivo y de la época de inicio y longitud temporal de su ciclo. Las diferencias entre NR_o o NR_c , y la relación entre ellas, de FAO-PM o HS frente a medidas de lisímetro es variable en función del cultivo y del ciclo concreto escogido.

Las estimaciones de las necesidades anuales de ET_o (NR_o) presentan un menor RRMSE que las estimaciones de las necesidades anuales de ET_c (NR_c), en comparación a medidas de lisímetro. El impacto de la curva de K_c en las estimaciones de ET_c es variable y depende de la precisión de las estimaciones de ET_o en cada etapa del ciclo, así como de la fase del año a que corresponde el ciclo de cultivo. Sería recomendable incorporar el efecto de la curva de K_c sobre las estimaciones de ET_o y evaluar su efecto sobre el cálculo de las necesidades hídricas anuales. Las diferencias de RRMSE entre dos modelos de ET_o podrían verse incrementadas o difuminadas al traducirse en términos de necesidades anuales.

La ratio NR_c/NR_o varía ligeramente para cada modelo de estimación de la ET_o en función de la época de inicio del ciclo del cultivo y de la longitud del mismo. Esta ratio permitiría calcular fácilmente las necesidades hídricas anuales a partir de los valores acumulados de ET_o sin necesidad de calcular el producto diario de K_c y ET_o .

Referencias

1. Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D.; Fao, M.S.-; Rome, undefined; 1998, undefined Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
2. Quej, V.H.; Almorox, J.; Arnaldo, J.A.; Moratiel, R. Evaluation of Temperature-Based Methods for the Estimation of Reference Evapotranspiration in the Yucatán Peninsula, Mexico. *J Hydrol Eng* 2019, 24, doi:10.1061/(asce)he.1943-5584.0001747.
3. Santos, C.; Lorite, I.; Allen, R.; Tasumi, M.; Gavilán, P.; Fereres, E. Mejora de La Gestión de Los Recursos Hídricos Por Medio de La Integración de Técnicas de Teledetección y Modelos de Simulación. *Analistas económicos de Andalucía*. 2007.
4. Martí, P.; González-Altozano, P.; López-Urrea, R.; Mancha, L.A.; Shiri, J. Modeling Reference Evapotranspiration with Calculated Targets. Assessment and Implications. *Agric Water Manag* 2015, 149, 81–90, doi:10.1016/J.AGWAT.2014.10.028.
5. Hargreaves, G.H.; Samani, Z.A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Appl Eng Agric* 1985, 1, 96–99, doi:10.13031/2013.26773.
6. López-Urrea, R.; Martín de Santa Olalla, F.; Fabeiro, C.; Moratalla, A. Testing Evapotranspiration Equations Using Lysimeter Observations in a Semiarid Climate. *Agric Water Manag* 2006, 85, 15–26, doi:10.1016/J.AGWAT.2006.03.014.