

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA
AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL



ESTUDIOS PRELIMINARES PARA LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CULTIVO DE LA CHUFA

Trabajo Fin de Máster

Presentada por:

Miguel Matute Díez

Dirigida por:

Dra. Nuria Pascual Seva

Dr. Bernardo Pascual España

València, septiembre 2017

Resumen

El equipo de investigación en el que se engloba el presente Trabajo Fin de Master ha desarrollado durante los últimos años diversos estudios conducentes a mejorar la eficiencia en el uso del agua de riego en el cultivo de la chufa. Aunque estas mejoras son considerables, no son definitivas al desconocerse las necesidades de agua del cultivo. Para conocer dichas necesidades es necesario determinar la evapotranspiración del cultivo (ETc).

Los ensayos se realizaron en una parcela experimental del Departamento de Producción Vegetal, situada en el Camino de Vera, incluida en la zona tradicional de cultivo de la chufa de Valencia. Esta parcela posee de una estación de lisimetría de pesada (*Smart Field Lysimeter*) la cual permite conocer la ETc diaria. Además, la parcela, está dotada de una estación meteorológica la cual proporciona los parámetros necesarios para la determinación de la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) diaria a través del método FAO-Penman-Monteith (método recomendado actualmente por la FAO para la determinación de la ETo). Dado que el factor que relaciona la ETc y la ETo es el coeficiente del cultivo (Kc; $ETc = ETo * Kc$), relacionando los valores de ambas evapotranspiraciones, se estimó, a partir de los datos obtenidos durante el ciclo del cultivo, los valores de Kc correspondientes a las distintas fases de cultivo.

La estación de lisimetría, fue regada mediante un sistema de riego localizado de alta frecuencia, automatizado en función del contenido volumétrico de agua del suelo, medido con sensores de capacitancia. Para el correcto funcionamiento del mismo, se llevó a cabo la calibración de dichos sensores y se establecieron las pautas del automatismo.

Del análisis de los valores de Kc obtenidos se establecieron los valores medios para el Kc inicial (0.25), medio (1.43) y final (0.75). Considerando la evolución de las plantas, se establecieron las cuatro etapas de crecimiento del cultivo; etapa inicial (21 días, desde la plantación hasta el 15 de mayo); etapa de desarrollo (76 días, desde el 16 de mayo hasta el 31 de julio); etapa de mediados de temporada (43 días, desde el 1 de agosto hasta el 12 de septiembre); etapa final (29 días desde el 13 de septiembre hasta el inicio del proceso de recolección).

Palabras clave: evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo, riego localizado de alta frecuencia, lisimetría

Resum

L'equip d'investigació en què es desenvolupa el present Treball Final de Màster ha realitzat durant els últims anys diversos estudis conduents a millorar l'eficiència en l'ús de l'aigua de reg en el cultiu de la xufa. Encara que aquestes millores són considerables, no són definitives al desconèixer les necessitats d'aigua del cultiu. Per conèixer aquestes necessitats és necessari determinar l'evapotranspiració del cultiu (ETc).

Els assaigs es van realitzar en una parcel·la experimental del Departament de Producció Vegetal, situada al Camí de Vera, inclosa a la zona tradicional de cultiu de la xufa de València. Aquesta parcel·la es compon d'una estació de lisimetria de pesada (Smart Field Lysimeter) que permet conèixer l'ETc diària. A més, la parcel·la està dotada d'una estació meteorològica que proporciona els paràmetres necessaris per a la determinació de l'evapotranspiració del cultiu de referència (ETo) a través del mètode FAO-Penman-Monteith (el mètode recomanat actualment per la FAO per a la determinació de l'ETo). Donat que el factor que relaciona l'ETc i l'ETo és el coeficient del cultiu (Kc; $ETc = ETo * Kc$), relacionant els valors d'ambdues evapotranspiracions, es va estimar, a partir de les dades obtingudes durant el cicle del cultiu, els valors de Kc corresponents a les diferents fases de cultiu.

L'estació de lisimetria, va ser regada mitjançant un sistema de reg localitzat d'alta freqüència, automatitzat en funció del contingut volumètric d'aigua del sòl, mesurat amb sensors de capacitància. Per al correcte funcionament del mateix, es va dur a terme la calibració d'aquests sensors i es van establir les pautes de l'automatisme.

A partir de l'anàlisi dels valors de Kc obtinguts es van establir els valors mitjans per al Kc inicial (0.25), mitjà (1.43) i final (0.75). Considerant l'evolució de les plantes, es van establir les quatre etapes de creixement del cultiu; etapa inicial (21 dies, des de la plantació fins al 15 de maig); etapa de desenvolupament (76 dies, del 16 de maig fins al 31 de juliol); etapa de mitjans de temporada (43 dies, del 1 d'agost al 12 de setembre); etapa final (29 dies des del 13 de setembre fins a l'inici del procés de recollida).

Paraules clau: evapotranspiració de referència, evapotranspiració de cultiu, reg localitzat d'alta freqüència, lisimetria.

Abstract

During the last years, the research team in which this Master's Final Thesis has been developed, has carried out several studies leading to improve the irrigation water use efficiency in chufa. Although these improvements are considerable, they are not definitive, as the water needs of the crop are still unknown. To know these needs, it is necessary to determine the evapotranspiration of the culture (ETc).

The experiments were carried out on an experimental plot of the Department of Plant Production, located on the Camino de Vera, which is included in the traditional zone of cultivation of the chufa of Valencia. This plot includes a lysimetric station (Smart Field Lysimeter) which allows to know the daily ETc. In addition, the plot is equipped with a meteorological station which provides the necessary parameters for the determination of the daily evapotranspiration of the reference culture (ETo) through the FAO-Penman-Monteith method (currently, recommended by the FAO method for determination of the ETo). Since the factor that relates ETc and ETo is the crop coefficient (Kc; $ETc = ETo * Kc$), relating the values of both evapotranspiration, the Kc values corresponding to the different phases of the season, were estimated from the data obtained during the crop cycle corresponding to the different phases of culture.

The lysimetric station was irrigated by a high-frequency drip irrigation system, automated according to the volumetric soil water content, measured with capacitance sensors. For the correct operation of the irrigation system, the calibration of the sensors was carried out and the automatism guidelines were established.

The mean Kc values for the initial Kc (0.25), mean (1.43) and final (0.75) were established. Considering the evolution of the plants, the four stages of crop growth were established as; initial stage (21 days, from the plantation until May 15); development stage (76 days, from May 16 to July 31); mid-season stage (43 days, from August 1 to September 12); final stage (29 days from September 13 until the start of the collection process).

Key words: reference evapotranspiration, crop evapotranspiration, high-frequency drip irrigation, lysimetric.

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	El cultivo de la chufa	2
1.1.1.	Generalidades.....	2
1.1.2.	Cultivo	2
1.1.3.	Riego	4
1.2.	Antecedentes.....	4
1.3.	Necesidades hídricas. Coeficiente de cultivo (Kc).....	4
1.3.1.	Cálculo evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo).....	5
1.3.2.	Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ETc)	5
1.4.	Lisimetría	7
1.4.1.	Lisímetro volumétrico o drenaje	9
1.4.2.	Lisímetro de pesada.	9
2.	Objetivos	10
3.	Material y métodos	11
3.1.	Puesta en funcionamiento de un lisímetro de pesada y de una estación de riego localizado de alta frecuencia.	11
3.2.	Determinación de la evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo y coeficiente de cultivo	15
4.	Resultados y discusión	17
4.1.	Calibración de sondas capacitivas multi-sensor	17
4.2.	Análisis de textura	18
4.3.	Evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo)	19
4.4.	Evapotranspiración del cultivo de la chufa (ETc)	20
4.5.	Coeficiente del cultivo de la chufa (Kc)	21
5.	Conclusiones.....	25
6.	Bibliografía	26

Índice de figuras

Figura 1. Vista aérea de la parcela objetivo	11
Figura 2. Lugar de instalación del lisímetro	12
Figura 3. Asentamiento del lisímetro (aporte de grava, aporte arena fina, nivelación)	13
Figura 4. Vista del ensayo de riego.....	14
Figura 5. Anillo de muestra	15
Figura 6. Ajustes lineales correspondiente a la calibración de los sensores situados a distintas profundidades en las tres estrategias de riego.	17
Figura 7. Evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo de la campaña de 2016	24
Figura 8. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) de la chufa a lo largo de la campaña de 2016	20
Figura 9. Evolución del coeficiente de cultivo (k_c) de la chufa a lo largo de la campaña de 2016	21
Figura 10. Vista de la parcela de chufa durante la etapa inicial del cultivo	21
Figura 11. Vista de la parcela de chufa durante la etapa de desarrollo del cultivo	22
Figura 12. Vista de la parcela de chufa al comienzo y al final de la etapa de mediados de temporada del cultivo	22
Figura 13. Vista de la parcela de chufa durante la etapa final del cultivo	23
Figura 14. Gráfico y ecuación general de la evolución de la constante de cultivo de la chufa DDP: días después de la plantación	24

Índice de tablas

Tabla 1. Texturas del suelo en la campaña de 2017. Valores de las distintas profundidades en las tres estrategias de riego ensayadas 18

Tabla 2. Texturas del suelo en la campaña de 2015. Valores de las distintas profundidades en las tres estrategias de riego ensayadas 19

1. Introducción

La parcela objeto, situada en el Camino de Vera, zona dedicada tradicionalmente al cultivo de la chufa, se engloba dentro de la comarca denominada *L'Horta de València*, la cual se localiza en el sector central de la llanura valenciana, una franja aluvial que se extiende con dirección NE-SW adosada a los relieves del interior y modelada por los partes de los sistemas fluviales afluentes al litoral, el río Turia y los barrancos de Carraixet y Poyo-Torrent (Carmona y Ruiz, 2007).

Las precipitaciones anuales dentro de la comarca fluctúan entre menos de 400 mm en la zona septentrional y algo más de 500 mm en el extremo junto a la albufera, reflejando el importante gradiente pluviométrico existente, teniendo en cuenta el escaso relieve de la zona.

Respecto al régimen estacional de las precipitaciones, se observa un máximo otoñal muy marcado, centrado en octubre (que supera los 90 mm en muchos puntos) y una sequía estival acusada entre junio y agosto (poco más de 10 mm en julio). La influencia mediterránea se manifiesta en una marcada torrencialidad.

Las temperaturas medias anuales rondan los 16,5 – 17,5 °C, con reducida oscilación térmica diaria y anual provocada por la proximidad del mar. Las temperaturas máximas medias de julio – agosto rozan los 30 °C. El efecto de isla de calor urbana se refleja en mayor medida en las temperaturas mínimas medias de enero, el más frío. Las heladas son posibles desde diciembre hasta avanzado el mes de febrero.

Los balances hídricos señalan un período de sequía de casi 5 meses, centrados en junio, julio y agosto. Los máximos aportes hídricos coinciden con la reducción de la evapotranspiración en los meses de otoño (mayores potenciales excedentarios) y, secundariamente, en primavera (Carmona y Ruiz, 2007).

El crecimiento económico y la preocupación por cuestiones ambientales han convertido al agua en un recurso cuya administración está sujeta a numerosas controversias. En el estado español es previsible que el suministro de agua resulte insuficiente para satisfacer la demanda hídrica en algunos cultivos estivales (Hisdal et al., 2004), siendo imprescindible ajustar la demanda a las posibilidades reales de suministro.

De modo que, un conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos no sólo permite un mejor desarrollo para lograr una mayor producción y mejor calidad de las cosechas, sino que contribuye también a ahorrar considerables volúmenes de agua (IMTA, 1995).

1.1. El cultivo de la chufa

1.1.1. Generalidades

La chufa es la variedad botánica *sativus* de *Cyperus esculentus* L. perteneciente a la familia de las ciperáceas. Originaria de Oriente Próximo, herbácea, perenne, vivaz, de hojas paralelinervias de hasta 1 m de longitud, ásperas al tacto; de falsos tallos triangulares, inflorescencias en espiguillas de color rojizo y fructificación en aquenios. Posee un sistema subterráneo rizomático, en cuyos extremos se forman tubérculos, más o menos redondeados, compuestos por diversos anillos transversales. Al tratarse de una planta C4, es decir que para la fijación del carbono utiliza la vía de Hatch-Slack (o vía C4), presenta una elevada eficiencia fotosintética (Pascual-Seva, 2011).

Desde finales de los años 70 hasta la actualidad, la superficie destinada a este cultivo en *L'Horta* de València, varía entre 300 y 500 ha (puntualmente se han registrado hasta 1200 ha), actualmente más cercano a las 300 has (MAPAMA, 2016), con una producción aproximada de 5 millones t [Consejo Regulador de Denominación de Origen chufa de Valencia (CRDO), 2016]. Además del consumo de los tubérculos en fresco, tradicionalmente y de forma mayoritaria, estos se han utilizado para la fabricación artesanal de horchata, que puede presentarse en forma líquida, granizada o congelada. El consumo de horchata de fabricación industrial se ha incrementado exponencialmente en los últimos años, de manera que en la actualidad supone del orden del 80 al 85 % del total de la horchata elaborada.

1.1.2. Cultivo

Dado que la repetición del cultivo provoca un descenso del rendimiento (Pascual, 1981), en *L'Horta Nord* de València no es frecuente repetir el cultivo de la chufa en la misma parcela en años consecutivos, sino que alterna con otros cultivos hortícolas como patata, cebolla temprana, zanahoria, coles, sandía, alcachofa, etc.

Exige suelos sueltos, de textura arenosa, arenosa-franca o franco-arenosa, en los que la planta crece y se desarrolla adecuadamente. Es sensible, en su parte aérea, a las bajas temperaturas, puesto que la brotación de las yemas de los tubérculos necesita una temperatura mínima en el suelo próxima a 12 °C (Pascual y Maroto, 1982a, 1984), que suele alcanzarse a mediados de abril, por lo que su ciclo de cultivo es primaveral – estival.

Actualmente se está tratando de reducir las labores preparatorias, así como el tiempo empleado para llevarlas a cabo, realizándose éstas inmediatamente después de la retirada del cultivo precedente, con la finalidad de conseguir un suelo suelto, aireado, nivelado, con cantidad adecuada de materia orgánica y de macronutrientes principales, y libre de malas hierbas.

En cuanto al material vegetal autóctono, tal y como refleja el reglamento del CRDO (CAPA, 2010), existen varias formas de tubérculos, entre las que predominan las alargadas y las redondeadas, conocidas tradicionalmente como *llargueta* y *ametlla*,

respectivamente. El equipo de investigación de Horticultura de la UPV realizó unos estudios de selección y tipificación agronómica del material vegetal (Castell Zeising, 1996; Pascual *et al.*, 2003) fruto de los cuales han registrado en el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA, 2012) dos cultivares, con las denominaciones de 'Alboraia' (tubérculos de forma alargada y de tamaño grande) y 'Bonrepos' (tubérculos de forma esférica y de pequeño tamaño).

La fecha de plantación depende fundamentalmente de la recolección del cultivo precedente, actualmente se lleva a cabo durante la primera quincena de abril, lo cual se traduce en un aumento del rendimiento, en una menor afección por parte de la *Bactra* (al estar la planta más crecida, y por tanto ser más resistente) y en muchas, ocasiones una menor floración. La plantación suele realizarse con el suelo en tempero, utilizándose una «sembradora de platos» que realiza los caballones, distanciados a 60 cm, y deposita los tubérculos (aproximadamente $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; del orden de $300.000 \text{ tubérculos}\cdot\text{ha}^{-1}$) a una profundidad de 7-8 cm y distanciados a unos 8-10 cm. La sembradora va acoplada a un motocultor, generalmente de 15 a 18 CV, o a un tractor de 25 a 70 CV.

Los estudios sobre nutrición y fertilización (publicados en una serie de artículos, que van desde Pascual y Maroto, 1982b hasta Pascual-Seva *et al.*, 2009) han constatado que es un cultivo exigente (las extracciones han sido evaluadas en 240-35-300 kg de N-P-K por hectárea). En la actualidad, suele realizarse un aporte de materia orgánica inmediatamente antes de la plantación (del orden de $24 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de gallinaza fermentada), y en ocasiones (dependiendo del nivel de fertilidad del suelo) también se aporta en ese momento un abono mineral, generalmente un abono complejo (mayoritariamente 15-15-15), en cantidades que oscilan de 500 a $1.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Dependiendo de la evolución del cultivo es frecuente realizar en verano un aporte de N y K en forma de NO_3K (en cantidades variables, de 120 a $300 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), incorporando el abono al agua de riego, en la cabecera de los surcos (Pascual y Pascual-Seva, 2017).

Pese a estar considerada como una mala hierba, resulta poco competitiva en sus fases iniciales, por lo que o bien se escarda manual o mecánicamente ("*entauladora*") una vez establecidas las plantas de chufa, o bien se utilizan distintos herbicidas para facilitar el desarrollo del cultivo en sus primeros estadios.

La recolección suele realizarse entre mediados de noviembre y mediados de diciembre, aunque la incidencia de lluvias puede prolongarla hasta enero. El sistema aéreo de las plantas se elimina, una vez seco, mediante incineración controlada (con un pase de "*entauladora*" si la incineración es rápida). La máquina utilizada en la recolección de los tubérculos es una recogedora cribadora, arrastrada por un tractor y acoplada a la toma de fuerza del mismo.

Tras la recolección, se procede al lavado de los tubérculos en lavaderos industriales y su deposición en secaderos, a granel. Si el proceso de secado es adecuado (lentamente y al menos durante 3 meses) se obtiene un producto de alta calidad, que posteriormente es sometido a una última limpieza y eliminación de tubérculos defectuosos.

1.1.3. Riego

En el ciclo vegetativo de la chufa existen unas épocas en las que el aporte hídrico debe ser perfectamente regulado por el riego y dada su adaptación a zonas húmedas, sus necesidades hídricas son elevadas (Pascual y Pascual-Seva, 2017). El riego tradicional es de gravedad por surcos. El primer riego suele realizarse cuando la planta alcanza una altura de 15-20 cm, lo que suele producirse transcurridos unos 25-30 días desde la plantación. Un calendario de riegos típico consiste en regar con una frecuencia quincenal hasta principios-mediados de junio y a partir de septiembre, reduciéndose hasta unos 7-8 días, desde mediados de junio hasta finales de agosto; en general, el número total de riegos necesarios al año oscila entre 10 y 15, dependiendo de la climatología del año.

La chufa requiere una humedad continuada en el terreno desde junio hasta septiembre, o sea, a lo largo de todo su período de vegetación activa, con un período punta durante los meses de julio y agosto.

1.2. Antecedentes

Como se ha comentado anteriormente, el equipo de investigación en el que se engloba el presente Trabajo Final de Máster ha realizado diversos estudios sobre este cultivo. Entre otros aspectos, se ha abordado el análisis de la bondad del riego tradicional, determinando los valores medios de los caudales, dosis de riego y eficiencias de riego habitualmente obtenidas por los agricultores, siendo el valor medio de esta eficiencia muy bajo, del orden del 35 % (Pascual-Seva *et al.*, 2013). Además, optimizó el riego a través del desarrollo y validación de una expresión que relacionaba el tiempo de riego en función del caudal unitario, aumentando la eficiencia de riego hasta valores de 78-80 %. Paralelamente se han ensayado distintas estrategias de riego localizado, obteniendo mayores rendimientos y mayores valores de la eficiencia del uso del agua de riego (Pascual-Seva *et al.*, 2015; 2016). Estos estudios han abordado la respuesta productiva de la chufa a las distintas estrategias ensayadas, mejorando en todos los casos la eficiencia en el uso del agua de riego, aunque las necesidades hídricas del cultivo son todavía desconocidas hasta la fecha, por lo que se aborda el presente estudio.

1.3. Necesidades hídricas. Coeficiente de cultivo (Kc)

Según la FAO (Allen *et al.*, 2006), las necesidades de agua de un cultivo se definen como la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración (ET). A pesar de que los valores de la ET del cultivo y de las necesidades de agua del cultivo son idénticos, sus definiciones conceptuales son diferentes. Las necesidades de agua de cultivo se refieren a la cantidad de agua que necesita ser proporcionada al cultivo como riego o precipitación, mientras que la evapotranspiración del cultivo se refiere a la cantidad de agua consumida a través de la ET. La necesidad de riego básicamente representa la diferencia entre la necesidad de agua del cultivo y la precipitación efectiva.

1.3.1. Cálculo evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La ET es la combinación de dos procesos separados; por una parte, el agua se pierde a través de la superficie del suelo (evaporación; E) y por otra parte se consume mediante transpiración del cultivo (T). La tasa de ET de una superficie de referencia, se conoce como ET del cultivo de referencia (ET_o), correspondiendo esta superficie de referencia, a un cultivo hipotético de pasto con características específicas (Allen et al., 2006). Los únicos parámetros que afecta a ET_o, son parámetros climáticos, por la tanto ET_o se puede considerar también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. Cabe destacar la importancia de contar con un método estándar para el cálculo de la misma en base a información meteorológica. En la actualidad, este es el método de FAO Penman-Monteith, y es recomendado como el único método para determinar la ET_o, puesto que existe una elevada probabilidad de que este método prediga correctamente los valores de ET_o en una amplia gama geográfica y climática.

Para llevar adelante cálculos diarios, semanales, de diez días o mensuales de ET_o, además de la localización del sitio, la ecuación de FAO Penman-Monteith (Allen et al, 2006), requiere datos de temperatura del aire, humedad atmosférica, radiación y velocidad del viento:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET _o	evapotranspiración de referencia (mm día ⁻¹)
R _n	radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
G	flujo del calor de suelo (MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)
U ₂	velocidad del viento a 2 m de altura (m s ⁻¹)
e _s	presión de vapor de saturación (kPa)
e _a	presión real de vapor (kPa)
e _s - e _a	déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C ⁻¹)
γ	constante psicrométrica (kPa °C ⁻¹)

1.3.2. Cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c)

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se puede calcular de manera directa, ya que puede ser medida directamente a través de los métodos de transferencia de masa o del balance de energía. También puede obtenerse a partir de estudios del balance de agua en el suelo en campos cultivados, o a través de lisímetros.

Por otra parte, la ET_c puede ser estimada a partir de datos meteorológicos y del cultivo, utilizando la ecuación de FAO Penman-Monteith. Para representar las características de

crecimiento del cultivo, se puede inferir la tasa de evapotranspiración ajustando el valor de albedo y las resistencias aerodinámicas y de la superficie del cultivo, aunque estos son difíciles de estimar con precisión, debido a su variabilidad durante la temporada de crecimiento del cultivo (no aporta información de confianza, por lo cual, no es frecuente su utilización para el cálculo de la ET_c).

Otra manera de calcular la ET_c, es a través del coeficiente de cultivo (K_c), determinándose como el producto de la ET_o y el coeficiente del cultivo (K_c):

$$ET_c = K_c * ET_o$$

Donde:

ET_c evapotranspiración del cultivo [mm d⁻¹],

K_c coeficiente del cultivo [adimensional],

ET_o evapotranspiración del cultivo de referencia [mm d⁻¹].

Mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, K_c integra los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo, del pasto de referencia, el cual posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarán al valor del coeficiente K_c.

Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que afectan la evaporación en el suelo también afectarán al valor de K_c, como son el tipo de cultivo (albedo, alturas, hojas...), el tipo de clima (viento), cobertura del suelo por parte de cultivo, y principalmente las diferentes etapas de crecimiento del cultivo (Allen et al., 2006), que se dividen en:

Etapla inicial: está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima.

Etapla de desarrollo del cultivo: está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración. Para cultivos en hileras, donde en las hileras se presenta comúnmente el solape entre las hojas, como puede ser la chufa, la cobertura efectiva completa puede ser definida como el momento en el que algunas hojas de las plantas en hileras adyacentes comienzan a solaparse, lo que produce un sombreado casi completo del suelo, o cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo, en el caso que no ocurra el solape entre las hojas.

Etapas de mediados de temporada: comprende el período de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarilleamiento, senescencia, o caída de las hojas, en que se reduce la evapotranspiración del cultivo en relación con la ETo de referencia.

Etapas de finales de temporada: comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de Kc y ETc finaliza cuando el cultivo es cosechado, se seca de manera natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas.

Una vez definidos los métodos para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo, es preciso diferenciar entre dos situaciones posibles: aquellas en las que el cultivo se desarrolla bajo condiciones estándar (ETc), o bajo condiciones no estándar (ETc_{aj}).

La evaporación del cultivo bajo condiciones estándar (ETc), se refiere a la evapotranspiración de cualquier cultivo cuando se encuentra exento de enfermedades, con buena fertilización y que se desarrolla en parcelas amplias, bajo óptimas condiciones de suelo y agua, y que alcanza la máxima producción de acuerdo con las condiciones climáticas reinantes.

La ETc será diferente a la ETo en la medida en que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la vegetación y resistencia aerodinámica difieran de las correspondientes al pasto. Dichas diferencias entre los cultivos de campo y el pasto de referencia pueden ser integradas en un coeficiente único del cultivo (Kc) o separadas en dos coeficientes: un coeficiente basal del cultivo (Kcb) y un coeficiente de evaporación del suelo (Ke), por lo que $Kc = Kcb + Ke$. La utilización del coeficiente de cultivo único o dual, dependerá del propósito de los cálculos, la exactitud requerida y la información disponible. Para la planificación y manejo normal del riego y para la mayoría de los estudios de balance hídrico, el coeficiente único del cultivo es más apropiado y conveniente que el coeficiente dual. Solamente en los casos en que el coeficiente de cultivo sea necesario para períodos diarios, para cultivos específicos y para años específicos, se requerirá de coeficientes separados de transpiración y evaporación (Kcb + Ke). Por este motivo, el presente Trabajo Final de Máster aborda, para cada una de las etapas de crecimiento del cultivo, la determinación del coeficiente de cultivo único para el cultivo de la chufa.

1.4. Lisimetría

El término “lisímetro” es un derivado de las palabras griegas “lysis” y “metron” que significan, respectivamente, disolver y medir. El término es por lo tanto aplicable a cualquier dispositivo utilizado en el estudio de la velocidad, cantidad y composición del agua que percola en un medio poroso. Así, muchas definiciones de lisímetro se refieren a “instrumentos o dispositivos que contienen suelo y reciben lluvia natural o riego y se encuentran provistos de un sistema para recibir y medir la solución de percolación” (Aboukhaled *et al.*, 1986).

Según McIlroy y Agnus (1963), un lisímetro es: "un bloque de suelo, con vegetación o sin ella, encerrado en un recipiente adecuado y expuesto a las condiciones naturales de campo, que permite la determinación de los términos de la ecuación del ciclo hidrológico cuando los otros términos son conocidos".

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1966) utilizó el término "evapotranspirómetro" o "evaporímetro del suelo" para referirse a: "recipientes de suelo y vegetación por medio de los cuales, el agua perdida es medida o por diferencias de peso o midiendo toda el agua que llega a la superficie y aquella que escapa del fondo del recipiente"

Según la FAO (Allen et al., 2006), los lisímetros son tanques aislados llenos de suelo disturbado o no disturbado, en los que el cultivo crece y se desarrolla, consiguiendo así el aislamiento de la zona radicular del cultivo, y permitiendo así determinar con apreciable exactitud el balance de agua en el suelo. Un requerimiento de los lisímetros es que la vegetación dentro e inmediatamente fuera del lisímetro sea idéntica (la misma altura e índice de área foliar).

La lisimetría incluye la medida volumétrica de todas las aguas que entran y salen de un recipiente que contiene una masa aislada de suelo, cuya superficie puede estar desnuda o con diferentes tipos de cubierta vegetal (Aboukhaled *et al.*, 1986).

La ecuación de balance hídrico del suelo representa las entradas y salidas de agua de un lisímetro para cada periodo de medida:

$$ET = P + R - D \pm \Delta w$$

Donde:

P: Precipitación, mm/día

R: Riego, mm

ET: Evapotranspiración, mm

D: Percolación profunda, mm

Δw : Variación del contenido de agua en la masa de suelo

Existen dos criterios para clasificar los lisímetros (Martín de Santa Olalla, et al., 2005). El primero de ellos se basa en la forma de determinar el contenido de agua en el suelo, y con arreglo a él, los lisímetros se agrupan en dos grandes categorías: lisímetros volumétricos o de drenaje y lisímetros de pesada. El segundo criterio se basa en el método utilizado para aislar la masa del suelo, y de acuerdo con él, los lisímetros se agrupan en tres grandes tipos: monolíticos (con suelo sin perturbar), de relleno o perturbados, y lisímetros Ebermayer (caso intermedio). A continuación, se desarrolla la primera clasificación, por considerarse de mayor relevancia.

1.4.1. Lisímetro volumétrico o drenaje

En este tipo de lisímetros, el agua en exceso es recogida en el fondo del mismo y medida volumétricamente. Por otro lado, la lluvia y los riegos son medidos mediante pluviómetros. El suelo contenido en el recipiente se mantiene de manera continua a capacidad de campo, debido a la aportación de riegos diarios o incluso de mayor frecuencia. La evapotranspiración durante un periodo determinado se considera igual a la diferencia entre la cantidad de agua aplicada y drenada.

Se trata de recipientes o cubos de material muy diverso (plástico, acero, poliéster, etc.) que encierran un volumen de suelo conocido, perturbado o no, de una superficie conocida (Martín de Santa Olalla, et al., 2005).

1.4.2. Lisímetro de pesada.

Los lisímetros de pesada consisten en tanques (también de diferentes materiales, como plásticos, acero inoxidable, ...) ocasionalmente reforzados externamente con una estructura metálica en forma de jaula que los envuelve, instalados en el campo, rellenos de suelo y cultivados, con manejo normal del cultivo.

Las diferencias de peso del tanque pueden medirse mediante simples balanzas, indicadores de esfuerzo o células electrónicas de resistencia mecánica; manómetros (el peso del lisímetro se distribuye sobre células hidráulicas, como bolsas o colchones de agua, ofreciendo una presión resultante); cambios de nivel del líquido (zinc) sobre el que se flota el tanque.

Con el objeto de conocer mejor los movimientos del agua en el suelo, pueden colocarse distintos sensores (de humedad, potencial, temperatura, etc.). Generalmente, en la actualidad los lisímetros están dotados de un sistema de red inalámbrica que permite transmitir y registrar de manera continua los datos tanto de las celdas de carga como de los medidores de los distintos sensores instalados, de tal manera que el técnico encargado del mismo pueda verificar de manera, más o menos, continua la información.

Los lisímetros presentan dificultades de manejo y poseen un alto precio para su construcción, además su operación y mantenimiento requieren de especial cuidado, debido a estas circunstancias, su uso se restringe normalmente a trabajos de investigación.

2. Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es determinar el coeficiente de cultivo para poder determinar las necesidades hídricas del cultivo de la chufa en *L'Horta Nord* de València, para ello se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Establecer las fechas y duración de las diferentes etapas de crecimiento de cultivo de la chufa (etapa inicial, etapa de desarrollo, etapa de mediados de temporada, etapa de final de temporada).
- Calcular la evapotranspiración de referencia en *L'Horta Nord* de València durante el periodo del cultivo de la chufa, a partir de los datos meteorológicos obtenidos en una estación meteorológica instalada en la parcela de estudio.
- Determinar la evapotranspiración de cultivo de la chufa, a través del balance hídrico con los datos medidos por un lisímetro instalado en la misma parcela de estudio.
- Calcular, para cada una de las etapas de crecimiento del cultivo, el correspondiente valor de coeficiente de cultivo.
- Realizar, de manera paralela, aquellas determinaciones necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de riego localizado de la parcela de estudio.

3. Material y métodos

El presente Trabajo Fin de Máster, comprende dos partes, una primera consistente en la preparación y puesta a punto de los elementos necesarios para la realización del experimento en el año 2017, y una segunda parte, en la que se determinan las necesidades hídricas del cultivo, para la que se utilizaron los datos correspondientes a la campaña anterior (2016), debido a la imposibilidad de completar el ciclo del cultivo durante la campaña de 2017 y cumplir con los plazos de entrega (septiembre 2017).

En ambos casos, el experimento se realizó en una parcela junto al Campus de Vera de la Universitat Politècnica de València (parcela 232, polígono 27; 9°29'34"N, 0°20'38"O; figura 1).

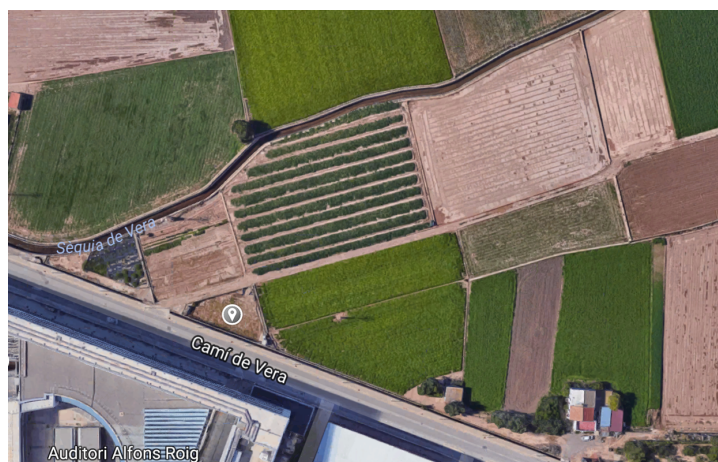


Figura 1. Vista aérea de la parcela objetivo.

3.1. Puesta en funcionamiento de un lisímetro de pesada y de una estación de riego localizado de alta frecuencia.

La instalación del lisímetro se llevó a cabo el día 10 de mayo de 2017. Para ello, se realizó una excavación cuadrangular de aproximadamente 1 m³ (figura 2). Para evitar problemas de infiltración (como sucedió en la campaña anterior al tratarse de un suelo arcilloso en profundidad) y favorecer el asentamiento del lisímetro, se realizaron cuatro perforaciones más profundas, en cada una de las esquinas, las cuales posteriormente fueron rellenadas con grava.



Figura 2. Lugar de instalación del lisímetro.

Seguidamente, se aportó una capa de grava (de entre 2 y 3 cm de diámetro) de aproximadamente 30 cm de espesor debidamente nivelada y comprimida, sobre la que se asentó el cilindro metálico, de 60 cm de altura. Una vez cubierta la superficie exterior al cilindro metálico con el suelo previamente extraído, se procedió al llenado del cilindro cuidadosamente, con suelo de textura arenosa procedente de la superficie de la parcela, y se comprimió debidamente. Tras la colocación del depósito de drenaje y de las conexiones necesarias para la transmisión de datos, se rellenó toda la excavación y se niveló la zona, tratando de conseguir las mismas condiciones que el campo de cultivo (figura 3).



Figura 3. Asentamiento del lisímetro (aporte de grava, aporte arena fina, nivelación)

El dispositivo instalado es un *Smart Field Lysimeter* (UMS, actualmente METER GROUP; Munich, Alemania). Se trata de un lisímetro de pesada de tamaño pequeño, con un cilindro de acero inoxidable de 60 cm de altura y un diámetro interior de 30 cm. Consta de 6 puertos dispuestos a pares a 10, 20 y 55 cm de profundidad, a los cuales van conectados tres sensores de capacitancia *5TE* (Decagon Devices Inc., Washington, USA) para medir la humedad, la conductividad y la temperatura del suelo, y 3 *MPS* (Decagon Devices Inc., Washington, USA) para medir el potencial mátrico, además de contener un tensiómetro de referencia para mantener las mismas condiciones (potencial) dentro y fuera del lisímetro. Posee dos plataformas de pesaje, una para mediciones del monolito (*PL-100*), y otra plataforma (*PL-10*) para las mediciones del tanque de drenaje. Los datos se recogen en un *data logger* (*DT80-M*) con conexión GPRS/3G para la transferencia de datos (UMS, 2017).

Utiliza una bomba bidireccional para mantener las mismas condiciones hídricas en el interior del lisímetro que en el exterior, aportando agua dentro del lisímetro, si las condiciones de este son más secas que las de la superficie que lo rodea, y viceversa si son más húmedas, lo cual asegura condiciones idénticas dentro y fuera del cilindro. Consta de un depósito de drenaje de 10 L (UMS, 2017). El balance hídrico se establece mediante el pesaje de cilindro metálico (aumento del agua almacenada debido a la lluvia o al riego, y las pérdidas de agua debidas a la evapotranspiración) y el pesaje de las pérdidas por drenaje profundo.

La plantación de tubérculos (tipo *Llangueta*), se realizó el día 12 de mayo de 2017 con el suelo en tempero, utilizando la maquinaria y dosis habituales en el cultivo ($120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). Los surcos, distanciados 60 cm, tenían, en todos los casos, una pendiente longitudinal aproximada de $0.002 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ y transversal nula. De manera simultánea se plantaron 3 tubérculos en el lisímetro tratando de conseguir las mismas condiciones que en la parcela.

Este experimento se realizó en paralelo con un ensayo de riego (figura 4) consistente en tres estrategias diferentes de riego localizado, en función del contenido volumétrico de agua medido por las sondas capacitivas multi-sensor (C-Probe; Agrilink Inc. Ltd., Adelaide, Australia). Estas sondas contienen tres sensores, instalados respectivamente a las profundidades de 10, 20 y 30 cm. Los sensores fueron instalados el 19 de mayo de 2017. Las tres estrategias iniciaban el riego cuando el contenido volumétrico de agua a 10 cm alcanzaba el 85% de la capacidad de campo, diferenciándose en la detención del riego.

Una primera estrategia (T1), detenía el riego cuando la suma del contenido volumétrico de agua de las tres profundidades alcanzaba el valor correspondiente a la capacidad de campo. La segunda estrategia (T2), regaba hasta que el contenido volumétrico de agua a 20 cm se igualaba a la de la capacidad campo. Mientras que la estrategia T3, tenía una duración de 45 minutos, independientemente de los valores del contenido volumétrico de agua. Esta última estrategia fue la utilizada para regar el lisímetro, ya que proporciona un valor fijo que permite obtener datos exactos, manejables, similares y comparables.



Figura 4. Vista del ensayo de riego

Una vez que el cultivo estaba establecido, los sensores se calibraron in-situ en el campo por el método gravimétrico, tomando simultáneamente lecturas de cada sensor y muestras de suelo (100 cm^3 ; $\varnothing 53 \text{ mm}$; altura 51 mm) con un kit de anillos (figura 5) de muestra de suelo (Eijkelkamp, Giesbeek, Países Bajos) a cada una de las diferentes profundidades (10 , 20 y 30 cm) y para cada una de las estrategias de riego. Las muestras de suelo se secaron a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ en una estufa de aire forzado (Modelo 297, JP Selecta, Barcelona, España) para obtener el contenido de agua de cada muestra ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), que se comparó con el correspondiente valor de los sensores (Pascual-Seva, 2014). Los valores de los sensores (*units*) y el valor del contenido volumétrico de agua de las muestras se relacionó mediante un ajuste lineal.

Las muestras de suelo obtenidas en la calibración de los sensores fueron analizadas para determinar la textura de la parcela a las diferentes profundidades como información adicional para la interpretación de los datos. Para ello, se empleó el método de Boyoucos (Soil Survey Staff, 2010), obteniendo así los diferentes diámetros de partícula y porcentajes de peso, que posteriormente determinarían la cantidad de arena, limo y arcilla tras su representación gráfica en un sistema de coordenadas con escala semilogarítmica, en la que se disponen los valores de los diámetros de las partículas, en función de los valores del % de partículas obtenidos, usando la escala logarítmica de abscisas para la representación del diámetro de las partículas.



Figura 5. Anillo de muestra

La parcela disponía de una estación meteorológica, la cual contenía: un sensor de humedad VP-4 que ofrecía lecturas de presión barométrica, temperatura del aire, presión de vapor y humedad relativa; un pluviómetro ECRN-100; un anemómetro Davis Cup y un sensor de radiación solar PYR (Decagon Devices, 2017), además de una data *logger* el cual transmitía los datos vía GPRS, y estos eran descargados a través del programa DataTrac 3 versión 3.13 (Decagon Devices Inc., Washington, USA).

3.2. Determinación de la evapotranspiración de referencia, evapotranspiración de cultivo y coeficiente de cultivo

Una vez implementadas las tareas necesarias para el desarrollo del experimento, se prosiguió con la determinación de ET_0 , ET_c y K_c del cultivo de la chufa, a través del tratamiento de datos procedentes de la campaña anterior (2016).

Como se ha citado anteriormente, para la determinación de la ET_0 , se utilizó el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

Se dispone de datos proporcionados por la estación meteorológica en la campaña anterior desde el día 10 de mayo de 2016, día de la instalación de la misma. El punto final se fija en el día 1 de noviembre de 2016, ya que esta es la fecha en la que está permitida la incineración controlada, y se inicia el periodo de la recolección.

De igual manera que con los datos de la estación meteorológica, los datos proporcionados por el lisímetro en la campaña anterior (2016), fueron los utilizados para la determinación de la ET_c durante el periodo fijado anteriormente (10 de mayo – 1 de noviembre).

El lisímetro ofrece lecturas cada minuto del peso del monolito y del agua que se pierde por percolación. Con el fin de evitar el efecto de pequeños cambios de peso debidos a diversos factores, como viento, insectos, etc., se procedió a realizar el balance horario,

obteniéndose como resultado valores de precipitación (incluyendo en este tanto la precipitación como el riego), drenaje y ETc. El incremento de biomasa de las plantas incluidas en el lisímetro correspondiente a cada hora es despreciable respecto a las diferencias de peso debidas a los procesos considerados en el balance hídrico. Para obtener la ETc diaria se sumaron los valores horarios correspondientes a cada día. Los datos de la ETc se obtuvieron a través del balance hídrico:

$$ETc = P - L - DS$$

Donde:

P: precipitación y/o riego (mm)

L: lixiviación (mm)

DS: por variación del peso (mm)

Para el cálculo de la lixiviación, se determina la diferencia de peso del tanque de drenaje de la hora a resolver con la de la hora anterior, dividida por la superficie del monolito (0,07 m²), considerando sólo los valores positivos.

$$L(\text{mm}) = (\text{Peso tanque drenaje} - \text{Peso tanque drenaje}_{.1}) / 0,07$$

La precipitación y/o riego, se calcula como la diferencia entre el peso del monolito de la hora a resolver, menos el peso del monolito de la hora anterior, dividida por la superficie del monolito, más la lixiviación. Si el resultado de dicho cálculo es superior a un valor mínimo asignado para poder ser considerado como precipitación (0,21 mm), se considera dicho valor, de lo contrario, se considera 0.

$$P(\text{mm}) = [(\text{Peso del monolito} - \text{Peso del monolito}_{.1}) / 0,07] + L$$

Para determinar la variación del peso, simplemente se obtiene multiplicando la diferencia de peso del monolito de la hora a resolver con la de la hora anterior, dividida por la superficie del monolito, determinando así el agua que queda en el interior del monolito, considerando 0 en caso de obtener un valor negativo.

$$DS = (\text{Peso del monolito} - \text{Peso del monolito}_{.1}) / 0,07$$

Conocidos estos parámetros de manera horaria, se integraron los valores para cada uno de los días.

Una vez determinadas ETo y ETc, se determinó el coeficiente del cultivo, como ratio entre ambas.

$$Kc = \frac{ETc}{ETo}$$

Posteriormente se graficaron los resultados de estos parámetros, observando así su evolución durante la campaña.

Siguiendo el criterio de la FAO (Allen et al., 2006) y en base al registro fotográfico realizado en 2016, se establecieron las diferentes etapas de crecimiento

4. Resultados y discusión

4.1. Calibración de sondas capacitivas multi-sensor

En la figura 6, se muestran los resultados obtenidos de la calibración de cada uno de los 9 sensores de capacitancia (C-Probe; Agrilink Inc. Ltd., Adelaide, Australia):

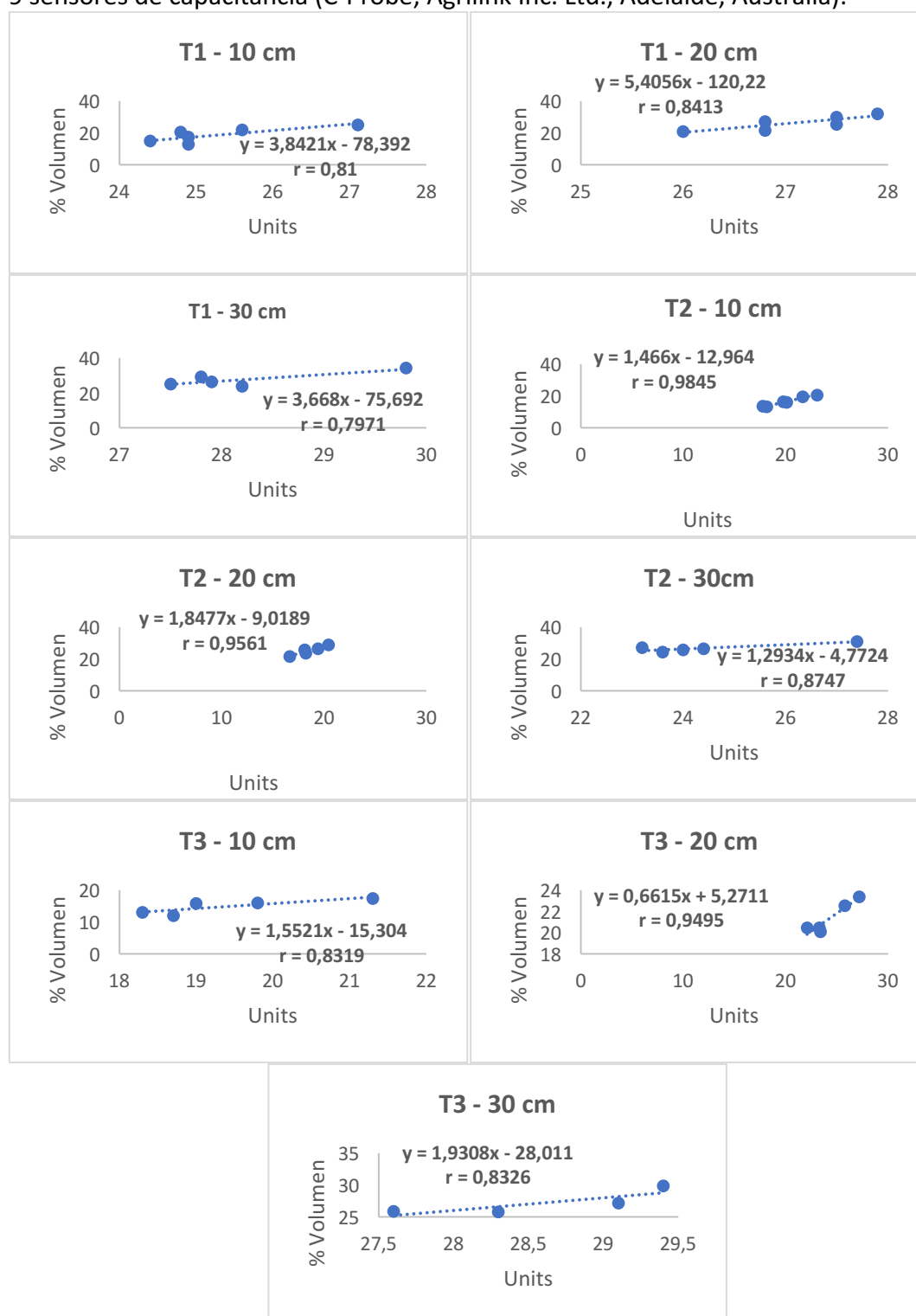


Figura 6. Ajustes lineales correspondiente a la calibración de los sensores situados a distintas profundidades en las tres estrategias de riego.

En esta figura se observa, que la calibración resulta en todos los casos en relaciones lineales, con coeficiente de correlación positivos superiores a 0.8. Aunque las sondas multiposición están separadas por menos de 2 m de distancia, y cabría esperar que las calibraciones resultaran en expresiones similares para todas ellas, se observa que no es así, diferenciándose especialmente la correspondiente a T1. Esta diferencia entre las distintas sondas se ha observado también en experimentos anteriores realizados en la misma parcela (Pascual-Seva et al., 2015). Además, se observa un comportamiento diferente en los sensores dispuestos a distintas profundidades, dentro de una misma estrategia, probablemente debido a los cambios de textura con la profundidad.

4.2. Análisis de textura

En la tabla 1 se presentan las texturas correspondientes a las distintas estrategias y profundidades de la campaña de 2017:

Tabla 1. Texturas del suelo en la campaña de 2017. Valores de las distintas profundidades en las tres estrategias de riego ensayadas.

		% Arcilla	% Limo	% Arena	Textura (USDA)
T1	10 cm	11	12	77	Franco arenoso
	20 cm	13	8	79	Franco arenoso
	30 cm	15	14	79	Franco arenoso
T2	10 cm	10	7,5	82,5	Arenoso franco
	20 cm	11	10	79	Franco arenoso
	30 cm	14	10	76	Franco arenoso
T3	10 cm	8	8	84	Arenoso franco
	20 cm	11	5	84	Arenoso franco
	30 cm	15	13	72	Franco arenoso

Se observa que en profundidad (30 cm), la parcela presenta una textura uniforme, siendo un suelo franco arenoso. A 20 cm, las estrategias T1 y T2, mantienen la textura franco-arenosa, mientras que T3 presenta mayor porcentaje de arena, llegando a clasificarse como suelo arenoso franco, textura que presentan también a 10 cm T3 y T2, mientras que T1 mantiene la textura franco arenosa, a lo largo de todo su perfil. Estos análisis presentan menores porcentajes de arena, que los obtenidos en 2015 en la misma zona de la parcela (tabla 2), debido a que antes de esa misma campaña se había realizado un aporte de arena procedente de un lavadero industrial de chufas. El menor contenido en arena está relacionado con las pérdidas de la misma durante la recolección y lavado de los tubérculos.

A continuación, en la tabla 2 se presentan los valores correspondientes a la campaña de 2015:

Tabla 2. Texturas del suelo en la campaña de 2015 Valores de las distintas profundidades en las tres estrategias de riego ensayadas.

		% Arcilla	% Limo	% Arena	Textura (USDA)
T1	10 cm	0	1,7	98,3	Arenoso
	20 cm	4,4	11,6	84	Arenoso franco
	30 cm	4,4	10,6	85	Arenoso franco
T2	10 cm	0	1,7	98,3	Arenoso
	20 cm	0,9	8,3	90,8	Arenoso
	30 cm	4,2	13,1	85,7	Arenoso franco
T3	10 cm	0	0,8	99,2	Arenoso
	20 cm	7	10,5	82,5	Franco arenoso
	30 cm	4,8	12,8	82,4	Franco arenoso

4.3. Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

Una vez trabajados los datos, eliminando valores anómalos para el período estudiado (10-05-16 al 1-11-16) se obtuvo la siguiente gráfica:

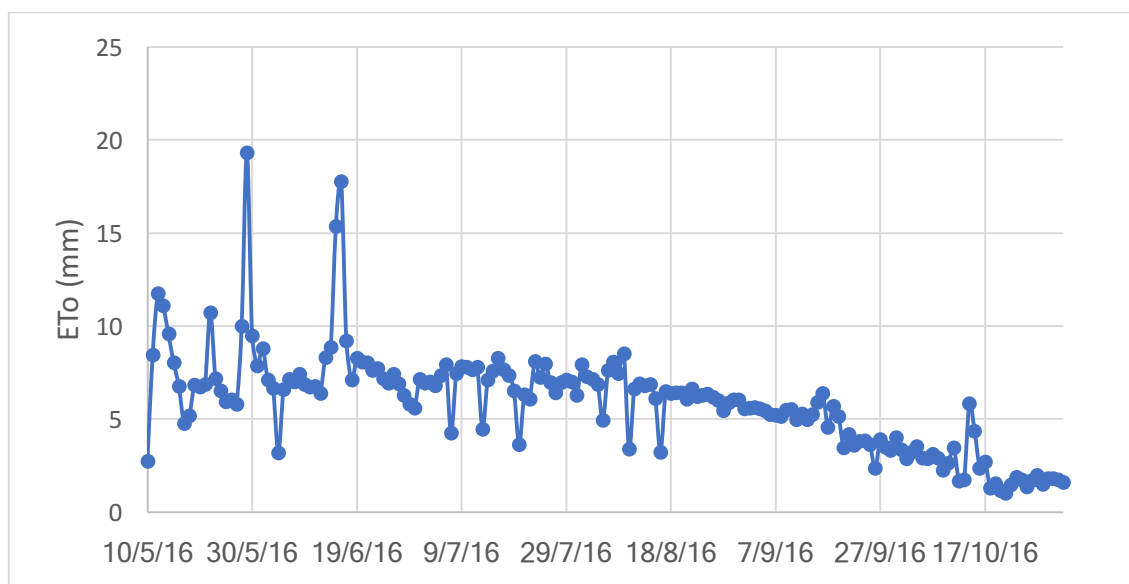


Figura 7. Evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo de la campaña de 2016

Los tres valores máximos observados en el gráfico (figura 7), corresponden a días, con elevada temperatura y velocidad del viento, y una baja humedad relativa, de ahí que los resultados obtenidos se consideren normales, especialmente el 29 mayo y 15 junio. En el tercer máximo, correspondiente al 16 de junio, la temperatura no fue tan alta, pero sí lo fue la velocidad del viento y la humedad relativa fue muy baja. Los valores más bajos corresponden a días con menor radiación, debido a que eran días nublados, además de días con bajas temperaturas.

4.4. Evapotranspiración del cultivo de la chufa (ETc)

De la misma manera que en el apartado anterior, tras un tratamiento de los datos y para el mismo período, se obtuvo el siguiente gráfico:

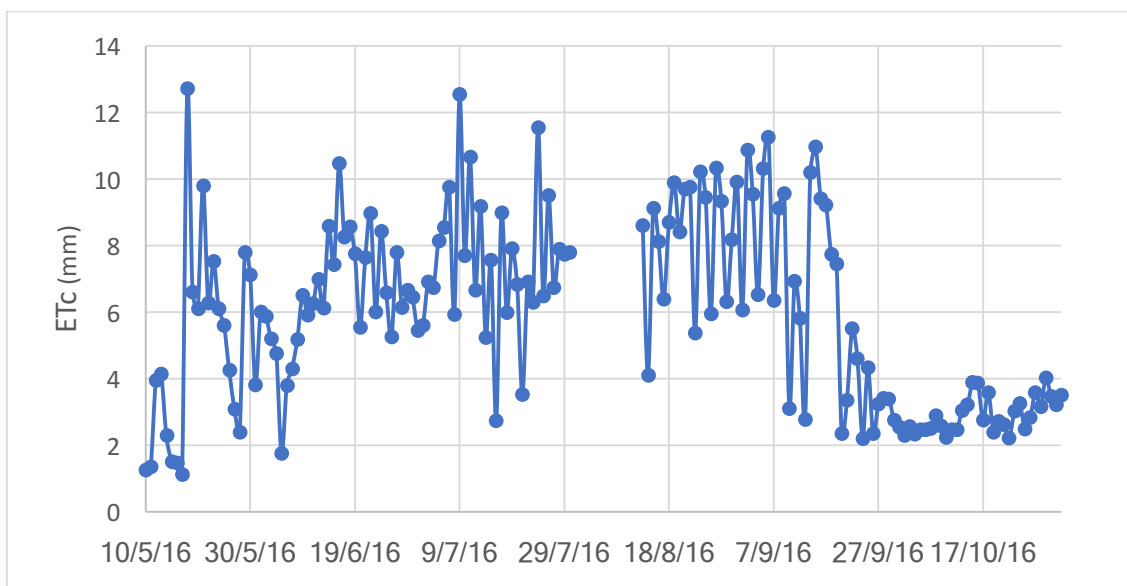


Figura 8. Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de la chufa a lo largo de la campaña de 2016

El primer máximo observado el día 18 de mayo, fue debido a la realización del primer riego (de una duración de 3 horas) para asentar el terreno, poder superar la humedad del suelo correspondiente a la capacidad de campo y poder determinar su valor, de modo que, al haber gran cantidad de agua, la ET fue muy alta. De igual manera, se observa un aumento muy elevado el día 14 de septiembre, en este caso fue debido a la lluvia torrencial que tuvo lugar la tarde del día 12 de septiembre (aproximadamente 50 mm en menos de 1 hora), de manera que no pudo infiltrarse adecuadamente, provocando el encharcamiento de la parcela. Como las condiciones del lisímetro son equivalentes a las de la parcela, también sufrió un encharcamiento.

Durante el periodo comprendido entre el 31 de julio y el 12 de agosto, el lisímetro estuvo inoperativo debido a una avería, provocada por un problema de sobrecarga de la batería, probablemente debido a que el panel solar que alimentaba el sistema estaba sobredimensionado. Una vez recibidas las piezas procedentes de Alemania, se reparó el dispositivo.

La oscilación que se observa de los valores de ETc, se corresponde con los riegos aplicados, es decir los días en que se regaba, la humedad del suelo era mayor y por tanto la ET también lo era, incrementándose la ETc en mayor medida que la ETo. De manera análoga, los días en que no se regaba, la ET era menor. Con el fin de evitar esta oscilación, y de acuerdo con la bibliografía especializada (Kang et al., 2002; López-Urrea et al., 2006) el cálculo del kc se realizó con valores medios semanales.

4.5. Coeficiente del cultivo de la chufa (Kc)

En la figura 9 se presenta el coeficiente del cultivo (K_c ; adimensional), considerando valores medios semanales:

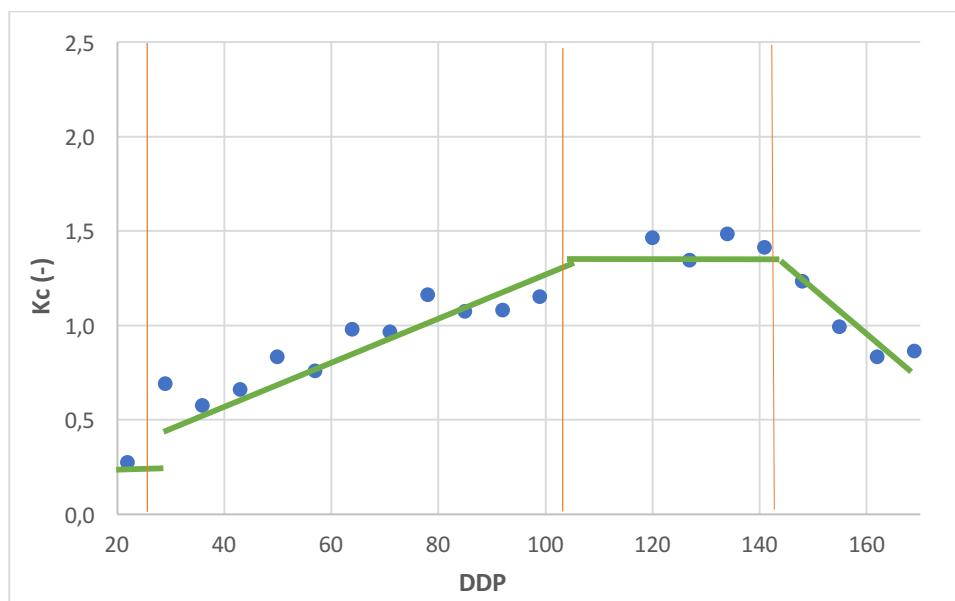


Figura 9. Evolución del coeficiente de cultivo (k_c) de la chufa a lo largo de la campaña de 2016. Valores medios semanales. Las líneas verticales representan la separación de las distintas etapas del cultivo. La línea verde representa la evolución del k_c en cada una de estas etapas. DDP: días después de la plantación

Analizando el gráfico obtenido, y de acuerdo a la visualización de las fotografías del estado de desarrollo del cultivo, se establecieron las diferentes etapas de crecimiento:

Etapla inicial (figura 10): su inicio, coincidente con la fecha de plantación, fue el 25 de abril del 2016, y finalizó una vez el cultivo alcanzó el 10% de cobertura del suelo, correspondiendo al 15 de mayo. Durante esta etapa, de 21 días de duración, la media del coeficiente de cultivo fue de 0,25.



Figura 10. Vista de la parcela de chufa durante la etapa inicial del cultivo

Etapa de desarrollo (figura 11): se inició el día 16 de mayo de 2016, y se dio por finalizada una vez el cultivo alcanzó la cobertura efectiva completo del suelo, el 31 de julio [98 días después de la plantación (DDP)], por lo que tuvo una duración de 77 días.



Figura 11. Vista de la parcela de chufa durante la etapa de desarrollo del cultivo

Etapa de mediados de temporada (figura 12): se inició el día 1 de agosto de 2016, y tras el transcurso de 43 días, finalizó el día 12 de septiembre. Durante este periodo el coeficiente de cultivo alcanzó un valor medio de 1,43.



Figura 12. Vista de la parcela de chufa al comienzo y al final de la etapa de mediados de temporada del cultivo

Etapa de final de temporada (figura 13): se inició el día 13 de septiembre, y finalizó, el 12 de octubre, coincidiendo con el final de la época de riegos en el cultivo con vistas a iniciar el proceso de recolección. Para efectos de cálculo, se considera que esta fase tuvo una duración de 29 días.

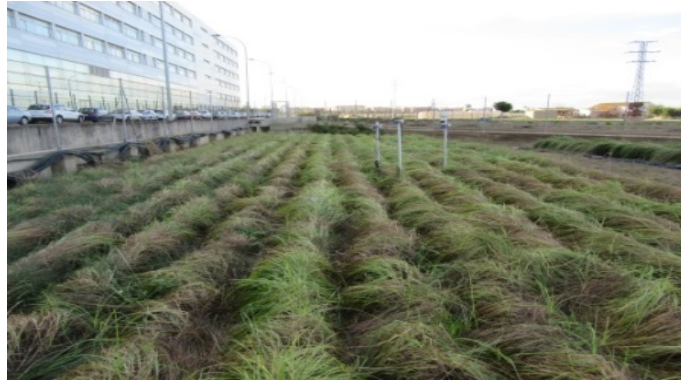


Figura 13. Vista de la parcela de chufa durante la etapa final del cultivo

De esta manera, se pudo definir el coeficiente inicial de cultivo (0,25), el de mediados de temporada (1,43) y el final (0,75). Estos valores son ligeramente superiores a los presentados por la FAO (Allen et al., 2006) para el grupo de cultivos: raíces y tubérculos, aunque hay que tener en consideración que los coeficientes aquí presentados ya están adaptados a las condiciones locales y que los valores presentados por la FAO necesitan de su corrección con las condiciones de cada zona, lo que supone un incremento en las condiciones de Valencia. De manera equivalente, este incremento es habitual, tal como aparece reflejado por Kang et al. (2002), en el que se muestra un K_c máximo para los cultivos de trigo y maíz, de 1.33 y 1.43, respectivamente, mientras que los correspondientes valores según la FAO (Allen et al., 2006) son 1.15 y 1.20.

Según Allen et al. (2006), el estudio podría terminar representado estos valores en una gráfica y obteniendo los valores de k_c para cada fecha de las etapas de desarrollo y final de temporada, gráficamente, no obstante, se ha considerado oportuno determinar las expresiones que definen los valores durante estas etapas con su ajuste correspondiente.

Etapas de desarrollo: $y = 0.0099 x + 0.2534$ (r: 0.92)

Etapas de final de temporada: $y = - 0.0182 x + 3.8624$ (r: 0.90)

Por otra parte, de acuerdo con la bibliografía, se presenta una curva que describe la evolución del k_c a lo largo de todo el ciclo, tanto en cultivos anuales (Kang et al., 2002), como perennes (López-Urrea et al., 2006). En este caso el mejor ajuste corresponde a una función polinómica de 5º orden, coincidiendo con lo presentado por Kang et al. (2002) para cultivos anuales como el trigo y el maíz.

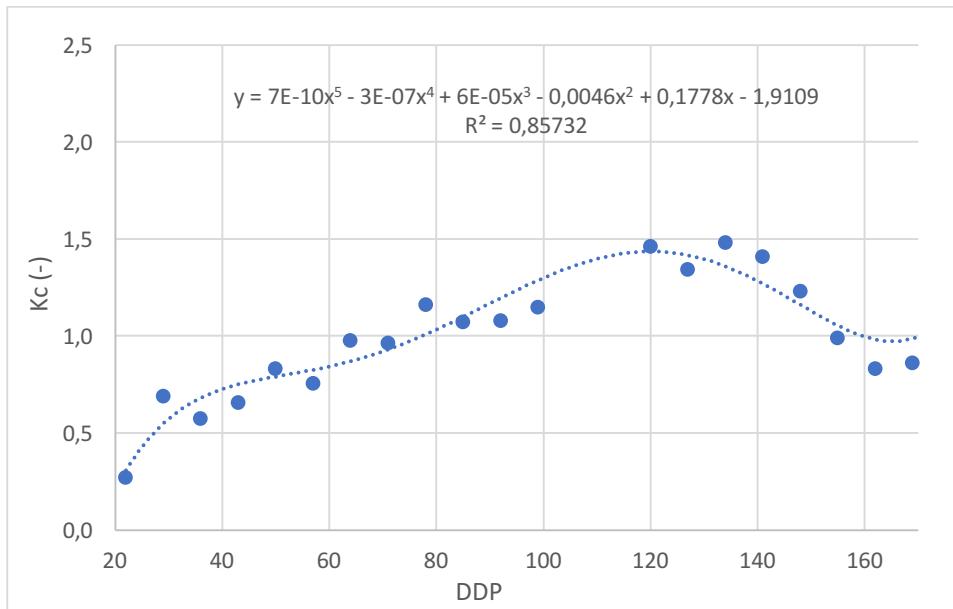


Figura 14. Gráfico y ecuación general de la evolución de la constante de cultivo de la chufa DDP: días después de la plantación

Estos resultados corresponden a la campaña de 2016, por lo que deberían considerarse de manera conjunta con los datos de la presente campaña, y en caso de confirmarse, validarse en una tercera campaña.

5. Conclusiones

Con los datos meteorológicos registrados en la parcela de estudio, y a través de la ecuación de FAO Penman-Monteith, se ha determinado la evapotranspiración de referencia.

Con los datos registrados por el lisímetro en la parcela de estudio, y a través del balance hídrico, se ha determinado la evapotranspiración de cultivo.

Con un manejo del riego localizado que ha permitido mantener unas condiciones estándar, sin estrés hídrico tal y como indica la FAO, se ha determinado el valor de los coeficientes de cultivo en las etapas inicial, de mediados de temporada y de final de temporada, resultando en valores de 0.25, 1.43 y 0.75, respectivamente.

Con la fecha de plantación, el manejo del cultivo y la climatología de la campaña, la duración de las etapas inicial, de desarrollo de cultivo, de mediados de temporada y de finales de temporada se ha estimado en 21, 77, 43 y 29 días.

Con estos valores se ha representado gráficamente la evolución del valor del coeficiente de cultivo, que permite su determinación en cada momento del ciclo de cultivo, tal y como sugiere la FAO. Además, se ha determinado el ajuste lineal del coeficiente de cultivo para las etapas de desarrollo del cultivo y de finales de temporada, así como un ajuste polinómico que relaciona el coeficiente con el número de días transcurridos desde la plantación.

6. Bibliografía

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

CAPA (Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación). 2010. Orden 17/2010, de la Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación, por la que se aprueba el texto del reglamento de la Denominación de Origen Protegida Chufa de Valencia y su consejo regulador»; Diari Oficial de la Comunitat Valenciana (6273/24.05.2010:21055-21069).

Carmona, P., Ruiz, J.M. 2007. Contexto Geográfico e Histórico de los regadíos de la Huerta de Valencia. El medio físico: el territorio como escenario de los regadíos históricos. En Hermosilla, J. (Ed.). El patrimonio hidráulico del Bajo Turia. L'Horta de València. Conselleria de Cultura y Deporte, Generalitat Valenciana y Universitat de València, València.

Castell Zeising, V. 1996: Determinación y tipificación agronómica de clones de chufa (*Cyperus esculentus* L.) cultivados en l'Horta Nord de Valencia. Tesis doctoral. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, València.

Decagon Devices, 2015. Microclimate Monitoring Stations. Washington, USA. <http://www.decagon.com/en/canopy/microclimate-monitoring-stations/>. Consultado el 24 julio 2017.

Hisdal, H., Tallaksen, L. M., Clausen, B., Peter, E., Gustard, A. 2004. Hydrological drought characteristics. *Developments in Water Science*, 48: 139–198.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) 1995. Coordinación de tecnología de riego y Drenaje, Proyecto RD–95062. Diagnóstico de la salinidad en el Distrito de Riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.

Kang, S., Gu, B., Du, T., Zhang, J. 2003. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agricultural Water Management*, 59: 239-254.

López-Urrea, R., Martín de Santa Olalla, F., Fabeiro, C., Moratalla, A. 2006. *Agricultural Water Management*, 85: 15-26.

MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente). 2012: Orden AAA/1403/2012, de 18 de junio, por la que se dispone la concesión de títulos de obtención vegetal en el Registro de Variedades Protegidas; Boletín Oficial del Estado (154/28.06.2012:46064-46065).

Martín de Santa Olalla, F., López Fuster, P., Calera, A. 2005. Agua y agronomía. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

- McIlroy, I.C., Agnus, D.E. 1963. The Aspendale Multiple Weighed Lysimeter Installation
- Pascual, B. 1981. Estudio para la mejora de las técnicas de fertilización y cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L.) en la provincia de Valencia. Tesis doctoral. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, València.
- Pascual, B., Maroto, J. V. 1982a. Basic study of the hypothetical dormancy of tubers from the Spanish cultivated populations of chufa (*Cyperus esculentus* L.); Abstracts (vol. I). XXIst International Horticultural Congress: 1519.
- Pascual, B., Maroto, J.V. 1982b. Estudio de la problemática del desyerbe químico en chufa (*Cyperus esculentus* L.). Agrícola Vergel, 2:88-91.
- Pascual, B., Maroto, J. V. 1984. Ensayo en contenedores y en pleno campo sobre la influencia de la fecha de plantación del cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L.); Anales del Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, 25:79-86.
- Pascual, B., Maroto, J.V., López-Galarza, S., Alagarda, J., Castell Zeising V. 1997. El cultivo de la chufa. Estudios realizados. Generalitat Valenciana, Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentación, Valencia.
- Pascual, B., Maroto, J.V., López-Galarza, S., San Bautista, A., Alagarda, J. 2000. Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): an unconventional crop. Studies related to applications and cultivation. Economic Botany, 54: 439-448.
- Pascual, B., Pascual-Seva, N. 2017. Chufa. En: Maroto, J.V., Baixauli, C. (Ed.). Cultivos hortícolas al aire libre. Cajamar Caja Rural, Almería.
- Pascual-Seva, N., Pascual, B., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J.V. 2009: Growth and nutrient absorption in chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) in soilless culture. Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 84: 393-398.
- Pascual-Seva, N. 2011. Estudios agronómicos sobre el cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): estrategias de riego, tipos de plantación, absorción de nutrientes, y análisis fitoquímico. Tesis doctoral. Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, València.
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J.V., Pascual, B. 2013: Furrow-irrigated chufa crops in Valencia (Spain). I: Productive response to two irrigation strategies. Spanish Journal of Agricultural Research, 11: 258-267.
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J.V., Pascual, B. 2014: Saving water in chufa cultivation by using at raised beds and drip irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE 140, 040130081-040130087.

Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J.V., Pascual, B. 2015. Response of nutsedge (*Cyperus esculentus* L. var *sativus* Boeck.) tuber production to drip irrigation based on volumetric soil water content. *Irrigation Science*, 33, 31-42.

Soil Survey Staff. 2010: Keys to soil taxonomy, 11th edn. Washington, USDA Natural Resources Conservation Service.

UMS. 2017. Smart-Field-Lysimeter. Munich, Alemania. <http://www.ums-muc.de/en/lysimeter/smart-field-lysimeter/>. Consultado el 24 julio 2017.