



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE ECOSISTEMAS AGROFORESTALES

Calibración, validación y uso del modelo AquaCrop para el cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) en Valencia.

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Máster Universitario en Sanidad y Producción Vegetal

Alumna: Dña. **Cristina Pamela Ochoa Cobeña**

Tutora: Prof. Dra. **Núria Pascual Seva**

Cotutor: Prof. Dr. **Juan Manzano Juárez**

Curso académico 2019-2020

Valencia, noviembre 2019

TÍTULO:

Calibración, validación y uso del modelo AquaCrop para el cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) en Valencia.

RESUMEN:

El sector agrícola presenta el desafío de producir alimentos para abastecer la demanda creciente con menos agua, aumentando la productividad y la eficiencia del agua de riego. La chufa es un cultivo tradicional en la *Comunitat Valenciana* (España), que en los últimos años presenta una mayor demanda, tanto en mercados locales como internacionales, y que requiere considerables volúmenes de agua para su producción. AquaCrop es un programa que simula el rendimiento del cultivo en respuesta al agua aportada. En el presente Trabajo Fin de Máster AquaCrop fue calibrado para el cultivo de la chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.), mediante el uso de datos de los años 2006, 2007, 2017 y 2018, los dos primeros años corresponden a sistema de riego por surcos y los dos restantes a riego de alta frecuencia. El modelo proporcionó una buena simulación del contenido de agua en el suelo (CAS), rendimiento y desarrollo del cultivo. Tomando como criterio los indicadores estadísticos para el CAS: raíz del error cuadrático medio (root square mean error; RSME) con valores de 4.4, 4.87, 2.25, 4.4; coeficiente de eficiencia de Nash (E) con valores de 0.2, -0.46, -0.8, 0.45; índice de acuerdo (d) con valores de 0.79, 0.65, 0.68, 0.78 para cada año, respectivamente, y que se compararon el 100% de los datos. El rendimiento muestra una desviación de $\pm 0.5 T$ comparando los valores simulados y medidos, por lo cual el modelo es capaz de reproducir de forma confiable, las variables analizadas. Del mismo modo, se buscó con ayuda del programa una recomendación de manejo del riego para ambos sistemas. El programa determina que el umbral de riego, determinado con respecto a la capacidad de campo (CC), debería variar en cada etapa del cultivo, y consecuentemente también variaría la dosis de riego. El programa establece que en las primeras etapas, emergencia y desarrollo el cultivo requiere una menor dosis de riego que cuando el cultivo ha completado su desarrollo máximo, en el cual las aportaciones de riego deben ser mayores y más fragmentadas, mientras que en la etapa final o senescencia el requerimiento es bajo.

Palabras clave:

Manejo del riego; riego por surcos; riego localizado de alta frecuencia; productividad del agua de riego.

Alumna: Dña. **Cristina Pamela Ochoa Cobeña**

Tutora: Prof. Dra. **Núria Pascual Seva**

Cotutor: Prof. Dr. **Juan Manzano Juárez**

Valencia, noviembre 2019

TITLE:

Calibration, validation and use of the AquaCrop model for the cultivation of chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) in Valencia.

ABSTRACT:

The agriculture sector presents the challenge of producing food to supply the growing demand with less water available, thus increasing the productivity and the irrigation water efficiency. Chufa is a traditional crop at *Comunitat Valenciana* (Spain), which recently presents a greater demand, both in local and international markets, and requires considerable volumes of water for its production. AquaCrop is a software that simulate crop yield in response to the water provided. In this Master's Final Project, AquaCrop was calibrated for the cultivation of chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.), by using data from 2006, 2007, 2017, 2018, the first two years corresponding to furrow irrigation and the two last years to drip irrigation. The model provided a good simulation of soil water content (SWC), crop yield and development. Taking statistic indicators for SWC as analysis criteria: root square mean error (RSME) with values 4.4, 4.87, 2.25, 4.4; Nash efficient coefficient (E) with values of 0.2, -0.46, -0.8, 0.45; index of agreement (d) with values 0.79, 0.65, 0.68, 0.78 for each year, respectively, and 100% of the data was compared. The yield crop shows a deviation of ± 0.5 T comparing the simulate and measured valued, so the model can reliably, reproduce the variables that have been analyzed. Likewise, an irrigation management recommendation was determined for both systems using the program as a help tool. The program determinates that irrigation threshold, based on field capacity (FC), should vary at each stage of the crop, and consequently the irrigation dose may vary. The program establishes that in the first stage, emergency and development, the crop requires a lower dose of irrigation than when the crop has complete this maximum development, in which the irrigation water will be greater and more fragmented, while in the final stage or maturity, the requirement will be lower.

Keywords:

Irrigation management; furrow irrigation; drip irrigation; irrigation water productivity.

Student: Mrs. **Cristina Pamela Ochoa Cobeña**

Tutor: Dr. **Núria Pascual Seva**

Cotutor: Dr. **Juan Manzano Juárez**

Valencia, November 2019

TÍTOL:

Calibratge, validació i utilització del model AquaCrop per al cultiu de la xufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) a València.

RESUM:

El sector agrícola presenta el desafiament de produir aliments per proveir la demanda creixent amb menys aigua, augmentant la productivitat i l'eficiència de l'aigua de reg. La xufa és un cultiu tradicional a la Comunitat Valenciana (Espanya), que en els últims anys presenta una major demanda, tant en mercats locals com internacionals, i que requereix de considerables volums d'aigua per a la seva producció. AquaCrop és un programa que simula el rendiment del cultiu en resposta a l'aigua aportada. En el present Treball Fi de Màster AquaCrop va ser calibrat per al cultiu de la xufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.), mitjançant l'ús de dades dels anys 2006, 2007, 2017 i 2018, els dos primers anys corresponen al sistema de reg per solcs i els dos restants a reg localitzat d'alta freqüència. El model va proporcionar una bona simulació del contingut d'aigua al sòl (CAS), rendiment i desenvolupament del cultiu. Prenent com a criteri els indicadors estadístics per al CAS: arrel de l'error quadràtic mitjà (root square mean error; RSME) amb valors de 4.4, 4.87, 2.25, 4.4; coeficient d'eficiència de Nash (I) amb valors de 0.2, -0.46, -0.8, 0.45; índex d'acord (d) amb valors de 0.79, 0.65, 0.68, 0.78 per a cada any, respectivament, i que es van comparar el 100% de les dades. El rendiment mostra una desviació de $\pm 0.5 T$ comparant els valors simulats i mesurats, per la qual cosa el model és capaç de reproduir, de forma fiable, les variables analitzades. De la mateixa manera, es va buscar amb ajuda del programa una recomanació de maneig del reg per als dos sistemes. El programa determina que el lliandar de reg, determinat respecte a la capacitat de camp (CC), hauria de variar en cada etapa del cultiu, i conseqüentment també variaria la dosi de reg. El programa estableix que en les primeres etapes, d'emergència i desenvolupament el cultiu requereix una menor dosi de reg que quan el cultiu ha completat el seu desenvolupament màxim, en el qual les aportacions de reg han de ser majors i més fragmentades, mentre que en l'etapa final o senescència el requeriment torna a ser baix.

Paraules clau:

Maneig del reg; reg per solcs; reg localitzat d'alta freqüència; productivitat de l'aigua de reg.

Alumna: Dña. **Cristina Pamela Ochoa Cobeña**

Tutora: Prof. Dra. **Núria Pascual Seva**

Cotutor: Prof. Dr. **Juan Manzano Juárez**

València, novembre 2019

AGRADECIMIENTOS

Primero le agradezco a Dios, porque sin él esta meta no hubiera sido posible. Desde el principio cuando tome la decisión de enrumbarme en ella, hizo que, de cada obstáculo, floreciera una solución y que a poco el primer paso se lograra. Ahora al estar en la etapa final de esta meta, se la dedico a él en su gran medida por la fuerza que me ha dado, para poder lograrla.

A mi madre, que desde que le conté mis planes y vio cómo se complicaban, estuvo ahí dándome su apoyo en cada decisión que tomé y las fuerzas para que confié, en que lo lograría. Enseñando me a mantener mi fe y que las cosas se logran con esfuerzo. Gracias mami porque tú has sido parte fundamental en todo este proceso y por lo que me has enseñado a lo largo de mi vida. Te dedico todo este trabajo.

A mi papá que siempre está ahí, con una voz de aliento y apoyo incondicional, desde que empecé mis estudios universitarios.

A mis amigos, que han estado ahí acompañándome en todo este trabajo y escuchando mis dudas y dándome su apoyo a la distancia. A los que están cerca por ser mi familia aquí en Valencia. A Mario, que en todo el verano y hasta ahora, cual alarma me recordaba que trabaje en la tesis y verificaba mis avances.

A mis tutores Juan Manzano y Núria Pascual Seva, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo, guiándome de la mejor manera, con interés y dedicación.

Todos fueron de gran importancia para la realización y culminación del trabajo de final de maestría, por esta razón muchas gracias.

Cristina Pamela

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	GENERALIDADES	1
1.2.	<i>Cyperus esculentus</i>	2
1.2.1.	Generalidades	2
1.2.2.	Origen y distribución	3
1.2.3.	Usos y cultivo	4
1.3.	INSEGURIDAD ALIMENTARIA Y ESCASEZ DEL AGUA	6
1.4.	MODELOS DE CULTIVO COMO HERRAMIENTA PARA TOMA DE DECISIONES	7
1.4.1.	Modelo AquaCrop	8
1.5.	CASO DE ESTUDIO: PRODUCCION DE CHUFA EN CLIMA MEDITERRANEO DE LA COMUNITAT VALENCIANA	12
II.	OBJETIVOS	13
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1.	COLECCIÓN DE DATOS	14
3.2.	INFORMACION USADA EN AQUACROP	14
3.2.1.	Información Climática	14
3.2.2.	Cultivo	15
3.2.3.	Manejo	16
3.2.4.	Suelo	17
3.3.	CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE AQUACROP	18
3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	19
3.5.	ESCENARIOS DE RIEGO	20
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1.	MODELACIÓN DE APLICACIONES DE MANEJO DE RIEGO	27
4.1.1.	Riego por surcos	27
4.1.2.	Riego localizado de alta frecuencia	30
V.	CONCLUSIONES	33
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 1. Información agronómica para el cultivo de la Chufa (*C. esculentus*) en Valencia, usada en AquaCrop para calibración y validación.

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo y contenido de agua en el suelo (CAS) inicial.

Tabla 3. Valores parametrizados en AquaCrop para el cultivo de la Chufa (*Cyperus esculentus*).

Tabla 4. Resultados de simulación de los cuatro años con respecto al rendimiento.

Tabla 5. Indicadores de bondad de ajuste para chufa del contenido de agua en el suelo.

Tabla 6. Resumen de formulación de calendarios de riego por surco.

Tabla 7. Calendario de riego RSVV propuesto para el cultivo de la chufa, en riego por surcos.

Tabla 8. Resumen de formulación de calendario de riego de alta frecuencia.

Tabla 9. Calendario de riego de alta frecuencia (RafVV) propuesto para el cultivo de chufa.

Figura 1. Zona radicular representada como un reservorio (Steduto et al., 2012).

Figura 2. Esquema del cálculo de AquaCrop con indicación de los cuatro, procesos representados por las flechas punteadas, afectados por estrés hídrico (a – e) y estrés por temperatura (f – g) (Raes, 2016).

Figura 3. Vista aérea de las parcelas correspondiente a los experimentos. a: parcelas manejadas mediante riego por surcos; b: parcela manejada mediante riego localizado de alta frecuencia (E1) (Pascual-Seva, 2011).

Figura 4. Cultivo de la chufa manejado mediante riego localizado de alta frecuencia (A-B); cultivo manejado mediante riego por surcos (C-D) (Pascual-Seva, 2011).

Figura 5. Resultado de la calibración y validación del contenido del agua en el suelo (vol %) para los años 2006 (A1: 12.5 cm) y 2007 (A2: 12.5 cm). Comparando la simulación (—), riego por surco (—), riego por surco.

Figura 6. Resultado de la calibración y validación del contenido del agua en el suelo (vol %) para los años 2017 (A3: 10 cm; B3: 20 cm; C3: 30 cm) y 2018 (A4: 10 cm; B4: 20 cm; C4: 30 cm). Comparando la simulación (—) y lo observado (—) en sistema de riego localizado de alta frecuencia.

Figura 7. Eventos de riego del calendario RSVV, generado con el programa AquaCrop para el cultivo de la chufa y desarrollo de la cubierta del dosel (CD) simulada.

Figura 8. Eventos de riego del calendario RafVV, generado con el programa AquaCrop para el cultivo de la chufa y desarrollo de la cubierta del dosel (CD) simulada.

LISTA DE ABREVIACIONES

B	Biomasa
CAS	Contenido de agua en el suelo
CC	Capacidad de Campo
CCD	Coefficiente del crecimiento del dosel
CD	Cubierta del dosel
CDD	Coefficiente de declinación del dosel
CEA	Conductividad eléctrica del agua
CO ₂	Dióxido de Carbono
d	Índice de acuerdo
DDP	Días después de la siembra
Dr	Tasa de agotamiento
E	Evaporación
ET _o	Evapotranspiración
EUAR	Eficiencia del uso del agua de riego
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
HR _{max}	Humedad relativa máxima
HR _{min}	Humedad relativa mínima
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de Cosecha
K _{c,Tr}	Coefficiente máximo del cultivo
LR	Lamina de riego
PMP	Punto de Marchitez permanente
RMSE	Error cuadrático medio
SAT	Saturación
T _{max}	Temperatura máxima
T _{min}	Temperatura mínima
Tr	Transpiración
TAW	Agua total disponible del suelo
U ₂	Velocidad del viento
WP	Productividad del agua
Wr	Contenido de agua en el suelo en la zona radicular
Y	Rendimiento
Z	Profundidad radicular efectiva

I. INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES

El agua es un recurso no renovable, de mayor uso a nivel mundial en diversos sectores, por ello buscar medidas eficaces y eficientes del uso por parte del sector agrícola es crucial, al ser principal demandante, con alrededor del 69% del agua a nivel mundial (FAO, 2019). La cuenca mediterránea es una de las regiones del planeta donde este recurso es limitado, pero a su vez, es una zona donde la agricultura es una importante actividad económica. En España el consumo de agua en general es elevado y supera las necesidades reales en muchos cultivos (Pascual-Seva, 2011), debido a aportes de agua excesivos, sin tener en cuenta las necesidades reales de los cultivos. En Valencia donde el clima es mediterráneo, se da una amplia gama de cultivos entre ellos la chufa, que es un cultivo tradicional y del cual cada día hay más demanda y aceptación en el mercado tanto interno como internacional. Los requerimientos de agua durante su producción pueden ser elevados, además tradicionalmente el sistema de riego manejado es mediante surcos, aunque en los últimos años se ha iniciado el estudio de la respuesta productiva del cultivo al riego localizado de alta frecuencia (Cajamar, 2017; Pascual-Seva et al., 2018).

Muchas investigaciones se han abierto con el fin de mejorar el uso del agua de riego, entre ellos el perfeccionamiento de programas informáticos capaces de simular el desarrollo y comportamiento del cultivo en diversos escenarios climáticos, de manejo y producción (Tsakmakis et al., 2019). Estos programas son herramientas de apoyo para prever el comportamiento del cultivo cuando se regulan las aportaciones del riego y permiten conocer los rendimientos que se pueden obtener.

Con este fin se ha desarrollado el presente trabajo, el cual busca calibrar el programa informático AquaCrop (Hsiao et al., 2009) para el cultivo de la chufa, dado que no existe en la actualidad una simulación del cultivo de manera que se pueda conocer la respuesta en rendimiento al agua que se aporta. Con esta calibración se pretende conocer la cantidad de agua de riego óptima, para la obtención de máximos rendimientos, tanto en riego tradicional por surcos, como en riego localizado de alta frecuencia, lo cual será una ayuda para futuras investigaciones en este cultivo, además de complementar las investigaciones que se están llevando a cabo en el uso eficiente del agua de riego para el cultivo de la chufa.

1.2. *Cyperus esculentus*

1.2.1. Generalidades

Cyperus esculentus, es una planta angiosperma, monocotiledónea que pertenece al género *Cyperus*, familia Ciperáceas, Este género, con alrededor de 700 especies, es el segundo más grande dentro de esta familia (The plant list, 2019) y es la más importante en el trópico. Es más conocida como mala hierba de cultivos en alrededor de 30 países, afectando plantaciones de arroz, algodón, soja, tomate, melón zanahoria, cultivos forestales, ornamentales, césped, vid, entre otros; en los cuales puede causar pérdidas de producción de hasta un 50% (Follak et al., 2016; Ramos Herrero, 2012). Como cultivo se produce por sus tubérculos que tienen gran contenido de azúcares y lípidos, la variedad botánica *sativus* de *Cyperus esculentus* L. (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck) (Mohdaly, 2019); que se conoce comúnmente como chufa. En inglés se puede encontrar con distintas denominaciones como “yellow nutsedge”, “nutgrass”, “tiger nut” o “ground almond”.

C. esculentus es una planta herbácea, perenne. Tiene vía fotosintética C4, por ello en condiciones de alta temperatura e irradiación, la fotosíntesis neta es más alta. Se propaga a través de estolones o tubérculos. La planta tiene altos valores de cobertura por lo cual coexisten con pocas especies. Su desarrollo se inicia a finales de primavera cuando la temperatura del suelo es mayor a 12°C. El tallo es erecto de 0.6-3.4mm de diámetro, glabro y liso, ligeramente hinchado en la base con una altura entre 15-60 cm (aunque puede alcanzar hasta 1 m de altura), las hojas son de color verde pálido, basales en su mayoría, paralelinervias, con nervio central pronunciado. La longitud de la hoja varía entre 20 a 100 cm y su anchura de 4 a 9 mm (Pascual-Seva, 2011; Follak et al., 2016). Emite abundantes raíces fibrosas del cual se desarrollan los tubérculos terminales (Ramos Herrero, 2012).

Los tubérculos producidos por planta domesticada pueden alcanzar los 25 mm de longitud y se forman en verano, con forma ovoides, elípticas o sub-globosas. Los tubérculos jóvenes son blanquecinos y rojizos, se vuelven de color pardo-grisáceo con la edad y estriados transversalmente (Follak et al., 2016). La parte interna del tubérculo es blanca o de color crema, independientemente de la edad, teniendo un sabor dulce y agradable al consumidor. La inflorescencia, puede ser simple o compuesta, formando una antena laxa, dispuesta en espiral en la base del tallo. Las flores son bisexuales que nacen en espiguilla en forma de espiral a lo largo de la raquilla, siendo la primera espiga casi sésil y la otras pedunculadas (Follak et al., 2016).

Los frutos son aquenios de 3 lados, de superficie granular, lustrosa, marrón oscura o rojiza brillante, grisáceo o negruzco al madurar (Follak et al., 2016). Las semillas no se consideran importantes en la propagación, aunque su producción puede ser muy alta en caso de darse, ya que la reproducción es principalmente vegetativa, con una tasa de multiplicación muy alta (Follak et al., 2016).

1.2.2. Origen y distribución

Estudios genéticos de datación molecular y análisis biogeográficos indican que el origen de *C. esculentus* fue en regiones subtropicales o tropicales de África (Follak et al., 2016). Historiadores como Teofrasto y Plinio el Viejo han documentado la presencia del tubérculo, que se cultivaban en las fronteras del río Nilo en el antiguo Egipto, además se han encontrado tubérculos desde tiempo predinásticos en tumbas de hace 6000 años (Ramos Herrero, 2012; Sánchez-Zapata et al., 2012). Fue el tercer alimento domesticado por los egipcios después del trigo y la cebada, usándolo con fines culinarios y medicinales. Se cree que los comerciantes árabes en el siglo XIII, introdujeron el cultivo en el mediterráneo europeo (Mohdaly, 2019), expandiéndose ampliamente en áreas mediterráneas de la Comunidad Valenciana, donde se ha cultivado desde entonces. Su cultivo se basa en la obtención de sus tubérculos y posterior elaboración de horchata, debida a base de tubérculos de chufa (Pascual et al., 2000).

La especie se encuentra ampliamente distribuida en el mundo, desde regiones tropicales, subtropicales hasta templadas (Follak et al., 2016). En África crece a lo largo de todo el continente, en Australia principalmente en el perfil costero del país y en Nueva Zelanda. En Asia va desde la parte oriental a occidental. En América se distribuye desde el norte al sur del continente, en Suramérica con más repercusión en países como Brasil, Perú, Argentina, Uruguay y Paraguay (Eyherabide et al., 2001; Saha et al., n.d.). Por Europa está extendida en la parte occidental, central y meridional, muy adaptada a la zona central debido a la humedad periódica de esta área, y está ausente en climas donde hay fuertes heladas debido a que los tubérculos son susceptibles a estas condiciones (Follak et al., 2016), como el norte y este de Europa. Dada a esta alta distribución a nivel mundial es considerada una mala hierba agresiva porque crece de manera óptima en hábitats perturbados, mientras que en los campos cultivados crece en condiciones bien drenadas y más secas, aunque su mejor desarrollo se da en condiciones de alta humedad del suelo, en climas húmedos tropicales a templados (Follak et al., 2016).

1.2.3. Usos y cultivo

La chufa se cultiva principalmente por sus tubérculos, en regiones de África como Costa de Marfil, Egipto, Ghana, Malí, Nigeria, Senegal y Togo se consumen en fresco ya sean crudos, asados, rallados, horneados y secos a modo postres dulces o como ingrediente en una bebida (conocida como Kunnun aya)(Codina-Torrella et al., 2015). En América, se usa en alimentación animal en países como Brasil, Chile y Estados Unidos (Coşkuner et al., 2002; Follak et al., 2016). En Europa, se la cultiva principalmente en la Comunitat Valenciana, concretamente en la comarca de *L’Horta Nord de València*. En esta zona se plantaron alrededor de 516 ha de cultivo en el año 2017 con una producción de 8359 T (MAPA, 2019a). Los tubérculos se emplean ampliamente en la gastronomía, aunque el principal uso es la elaboración de una bebida llamada “horchata de chufa”, que es el extracto acuoso lechoso del tubérculo de la chufa (Follak et al., 2016), dedicándose el 80% - 85% de la producción de tubérculos a su elaboración (Cajamar, 2017). Tradicionalmente se han obtenido distintos tipos de helados a base de chufa. En los últimos años se ha desarrollado otros productos, como aceite de chufa que posee características similares al de oliva, chocolates, cerveza, harinas y productos cosméticos, entre otros. Por los usos existentes y los potenciales como en el Reino Unido que el aceite conocido Tiger nut oil (TNO), que se usa en la industria pesquera, hay un mayor interés en este cultivo (Coşkuner et al., 2002; Follak et al., 2016; Mohdaly, 2019).

El cultivo de la chufa en Valencia se incluye dentro de una rotación con otros cultivos como patata, cebolla, sandía, alcachofa, entre otros (Pascual et al., 2000). De entre el material utilizado en España, resaltan las variedades registradas por la Universitat Politècnica de València los cultivares Bonrepos, que tiene forma esférica, y Alborai, de forma más alargada (Pascual-Seva et al., 2013). La plantación se realiza al inicio de primavera entre, abril y mayo, después de la cosecha del cultivo anterior. Se realiza en caballones espaciados 60 cm, plantando los tubérculos a 7-8 cm de profundidad, a un espacio entre 8-10 cm entre plantas (Cajamar, 2017).

Su desarrollo depende de la temperatura, para la geminación del tubérculo la temperatura mínima es 12°C y la brotación aumenta con la temperatura (Stoller & Wax, 1973), se ha reportado que la planta soporta temperaturas máximas de hasta 42.7°C de acuerdo a ensayos realizados en California (Follak et al., 2016). Es un cultivo demandante de luz solar dado a que requiere altos niveles de radiación para un crecimiento óptimo y producción de tubérculos, siendo sensible a la sombra que causa reducción de la altura de la planta, del peso seco de los brotes y de los tubérculos (Santos et al., 1997; Follak et al., 2016). Los fotoperiodos largos (mayor

a 12 horas), promueven el desarrollo vegetativo (brotes y raíces) y el fotoperiodo corto (8 -12 horas) la formación de tubérculos (Follak et al., 2016). Al inicio de otoño debido al descenso de la temperatura, la planta empieza a morir, a excepción de los tubérculos, que permanecen inactivos durante invierno, en zonas donde las heladas no son muy fuertes (Follak et al., 2016). La resistencia a heladas por parte del tubérculo depende mucho del tamaño del tubérculo y a que profundidad del suelo se encuentran. A mayor profundidad mayor resistencia y a menor tamaño menor resistencia a heladas (Follak et al., 2016), siendo las variedades cultivables más susceptibles al frío que las silvestres (Pascual-Seva, 2011). La latencia del tubérculo se rompe al aumentar la temperatura del suelo en primavera.

La chufa se desarrolla en una gran variedad de suelos desde arenosos hasta suelos arcillosos, pero según el tipo de suelo donde se desarrolle la producción de tubérculos se ve influenciada, siendo mejor en suelos limosos, ricos en nutrientes, bien drenados y con pH entre 5.0 a 7.5 (Mohdaly, 2019). La planta al estar en presencia de mayor cantidad de CO₂ en el ambiente, tiende a aumentar su peso seco sin diferir en la tasa fotosintética o transpiración; la conductividad estomática disminuye y el uso eficiente del agua aumenta. (Rogers et al., 2008; Marble et al., 2015)

El cultivo de chufa es exigente en agua, en Valencia el riego se aplica por surcos. El primer riego, con un volumen importante, se aplica al alcanzar la planta una altura de 15 – 20 cm (25-30 días después de la plantación; DDP), a partir de ese momento el riego se aplica quincenalmente hasta el mes de junio, cuando se aplica con frecuencia aproximada de cada 10 días desde julio a septiembre, realizándose alrededor de 10 a 15 eventos de riego, según las condiciones climáticas (Cajamar, 2017). El riego localizado de alta frecuencia es una alternativa que actualmente se aplica a pequeña escalas en el cultivo, habiéndose realizado estudios por Pascual-Seva desde el 2006 hasta la actualidad (Pascual-Seva et al., 2011; 2013; 2016; 2018).

La planta para lograr una producción óptima requiere una aportación de nutrientes de 583:109:355 Kg de N-P-K/ha (Pascual-Seva et al., 2009) que se deben aportar de forma mineral y orgánica, siendo considerado un cultivo demandante de nutrientes.

La cosecha de los tubérculos se realiza entre noviembre a diciembre, mediante cosechadoras de fabricación artesanal, para de ahí transportarlos a lavaderos industriales, donde se limpia al tubérculo para luego proceder a su venta, o bien se puede proceder al secado y venderse ya seca (Follak et al., 2016). El peso del tubérculo fresco es de 70 a 900 mg aproximadamente y del

tubérculo seco entre 30 – 350 mg. La variación del peso y el número de tubérculos puede deberse a la cantidad de agua aportada durante la producción (LI et al., 2001).

1.3. INSEGURIDAD ALIMENTARIA Y ESCASEZ DEL AGUA

El uso de agua en el mundo desde 1980 aumenta un 1% cada año, por diversos factores como el crecimiento poblacional, patrones de consumo y por el desarrollo socio-económico, entre otros (UNESCO, 2019). Solo el 0.003% del agua, es agua dulce y disponible para consumo humano, higiene, industria y agricultura, la cual utiliza cerca del 69% (FAO, 2017). Para el 2050, según proyecciones de la FAO, la demanda de agua aumentará entre un 20 a 30%, pero el suministro disminuirá, debido a problemas de escasez hídrica que se puede presentar en cuencas fluviales, sumado a la amenaza del cambio climático donde se prevé que la variabilidad de las precipitaciones conllevará periodos de sequías e inundaciones más prolongadas, por lo cual es necesario una gestión adecuada de este recurso. La agricultura, al ser el sector más demandante, sería el sector más afectado y el que debe buscar medidas para su manejo adecuado (FAO, 2019; UNESCO, 2019).

A nivel mundial, el 80% de las tierras de cultivo son gestionadas por pequeños agricultores con menos de dos hectáreas (UNESCO, 2019). Y el 80% también, se produce en secano que cubre el 60% de la demanda de alimento. Para el 2050 se espera que el riego tecnificado aumente un 50%, ya que estudios demuestran que el regadío aumenta la productividad, al ser el doble de productivas que las tierras que son manejadas en secano (FAO, 2017). Pero no solo depende de implementar riego tecnificado, esto debe ir de la mano de la implementación de prácticas adecuadas para que las aplicaciones de riego sean más eficientes y se puedan obtener máximos rendimientos. La combinación de ambos sistemas puede representar un aumento en rendimientos y evitar pérdidas de producción (FAO, 2019), siendo el riego una práctica complementaria en periodos secos, dado a que el estrés hídrico es causante del declive en la producción agrícola (UNESCO, 2019). Por ello Semedo en un informe de la FAO señala la necesidad de encontrar fuentes innovadoras de agua y de aumentar la eficiencia hídrica, en particular en los sectores agrícolas (FAO, 2019).

En España, el 14% de la superficie agraria útil se encuentra en regadío, contribuyendo con más del 50% de la producción (MAPA, 2019b). Las superficies regadas han ido en aumento cada año desde el 2007; en el 2017, según la Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE) hubieron 3.733.695 ha en regadío (MAPA, 2018), siendo un 2.14% mayor con respecto

al 2016, siendo el riego localizado el que más ha evolucionado (MAPA, 2018). A nivel nacional el consumo de agua en riego representa entre un 60-80% del consumo de agua total, variando según la abundancia o escases de la misma, ya que el agua destinada a la agricultura en época de sequía ronda el 60-63% (Durango, 2019). Al ser un país que sufre un déficit estructural de agua, debido a la escasez de recursos hídricos, sumado a una distribución irregular de las precipitaciones, ya que en las zonas montañosa y centrales del país se puede registrar 2000 mm de lluvia al año, mientras que en el sureste las precipitaciones pueden ser de menos de 200 mm, siendo la costa mediterránea una de las más afectadas por la sequía (Navarro, 2018).

La Comunitat Valenciana es una zona agrícola donde la agricultura de regadío desempeña un papel importante en el consumo de agua, pero en la región la sequía es un problema por las condiciones climáticas del mediterráneo europeo. El plan de adaptación al cambio climático para la ciudad de Valencia 2050 detalla tres impactos del cambio climático en la ciudad, como periodos de sequías e inundaciones (condiciones climáticas extremas), disminución de precipitaciones y aumento de temperatura (Timmermans et al., 2018), siendo el agua el recurso más vulnerable y que puede tener un mayor impacto en la agricultura. Por ello, adaptarse y encontrar medidas para manejar de forma óptima el agua de riego es importante y al ser la agricultura uno de los mayores consumidores de este recurso es primordial buscar soluciones con las diferentes herramientas disponibles.

Entre las ideas que manejan para mejorar el uso de agua en la agricultura de EIP-AGRI “Focus group water and agriculture” de la Unión Europea, está la optimización del riego en los cultivos y el manejo adecuado de las herramienta tecnológicas disponibles para llevarlas a cabo, como sensores de humedad del suelo para medir el agua disponible, riegos de precisión con sensores remotos, implementación de riego suplementario, riego deficitario comparando rendimientos y calidad, implementación de tasas de riego variable según la localización del cultivo. (Agricultural European Innovation Partnership (EIP-AGRI), 2016). Esto debe ir complementado con el manejo adecuado del cultivo, como determinar las fechas óptimas de siembra o plantación, la optimización de la fertilización, la creación de programa de riego adecuado, junto con la evaluación del impacto del cambio climático en el rendimiento del cultivo (FAO, 2017).

1.4. MODELOS DE CULTIVO COMO HERRAMIENTA PARA TOMA DE DECISIONES

En la actualidad, con el auge de las nuevas tecnologías y desarrollo de programas informáticos, varios investigadores trabajan en la creación de modelos que simulan el desarrollo del cultivo

en diversos escenarios como: AquaCrop, DSSAT, Cal-SIMETAW, EPIC&APEX, APSIM, CropSyst, etc. (Pawar et al., 2017). El uso de estas herramientas son un apoyo en el análisis del sistema de manejo de la producción agrícola, con que se puede llegar a tomar decisiones para la optimización de recursos e implementación de alternativas (Olivera et al., 2016), dirigido principalmente al manejo sostenible de la producción. Dependiendo de las características de los programas se puede simular la respuesta de los cultivos a cambios climáticos, conocer en qué etapas del desarrollo se puede reducir las aportaciones de agua manteniendo los rendimientos estables, por tanto, alcanzando máximas eficiencias, tiempos óptimos de riego y la evaluación de gestión del suelo, entre otros. La finalidad es que el modelo que se representa sea lo más parecido a la realidad en la interacción suelo-planta-atmosfera (Greaves & Wang, 2016; Tran, 2018; Tsakmakis et al., 2019).

Para ser usadas como herramientas de predicción estos modelos deben calibrarse y parametrizarse con las condiciones locales del cultivo, mediante datos del cultivo como manejo del riego y parámetros del cultivo, sumado a variables climáticas como radiación solar, CO₂, precipitación, estimando la producción de biomasa (Pirmoradian & Davatgar, 2019). Estos modelos se pueden clasificar según el parámetro de mayor importancia en el mismo, con lo que se puede hablar de los modelos impulsados por radiación, carbono o agua (Xu et al., 2019). AquaCrop es un modelo desarrollado por la FAO que se centra en el agua disponible en la zona radical, por lo que se lo clasificaría como un modelo impulsado por el agua (Xu et al., 2019). Una ventaja importante de este modelo impulsado por agua, sobre los modelos impulsados por radiación es la normalización de la productividad del agua (WP*) para el clima, lo que permite que el modelo parametrizado para un cultivo se use en diferentes condiciones climáticas. (Steduto et al., 2009; Pirmoradian & Davatgar, 2019)

1.4.1. Modelo AquaCrop

AquaCrop es un programa informático creado por la FAO con el fin de desarrollar pautas para aumentar la productividad del agua en los cultivos en diversos sistemas de producción. El programa simula de forma simple el desarrollo del cultivo, presentando la interacción entre el suelo, la planta y la atmosfera (Raes et al., 2009; Steduto et al., 2009). Es un modelo que, al compararse con otros, requiere poca las variables o parámetros de entrada, que en su mayoría son intuitivas y fáciles de obtener en campo, además presenta una buena relación entre la robustez y la precisión de los resultados. Permite simular el crecimiento del cultivo, producción de biomasa y rendimientos en diferentes escenarios (Steduto et al., 2009; Xu et al., 2019). Esta

herramienta se ha usado en varios cultivos como patata, maíz, algodón, frijol, trigo, arroz, entre otros (Xu et al., 2019). El objetivo de AquaCrop es predecir el rendimiento, estrategias de riego y productividad del agua en condiciones ambientales variables, incluido los déficits hídricos, tanto en agricultura de regadío como de secano.

AquaCrop es un modelo de crecimiento impulsado por el agua, que simula la biomasa del cultivo y rendimiento cosechable en respuesta al agua aportada, para ello separa la evapotranspiración (ET) en transpiración del cultivo (Tr) y la evaporación del suelo (E) con lo que desarrolla un modelo simple que representa el crecimiento y senescencia del dosel (Steduto et al., 2009; Vanuytrecht et al., 2014). La separación de la ET evita la confusión del uso no productivo del agua, importante cuando la cobertura del suelo no es completa y de ahí nace la ecuación base que representa el crecimiento del cultivo en AquaCrop (Steduto et al., 2009; Raes, 2016):

$$B=WP \times \sum Tr \quad (1)$$

Donde WP es la productividad del agua, siendo constante en una determinada condición climática. Para que el valor de WP no dependa solo de las condiciones climáticas y sea específico del cultivo, y pueda ser utilizado en diversos escenarios, se emplea la productividad del agua normalizada (WP*), obtenida en AquaCrop con la ecuación 2, que se basa en la concentración de CO₂ y demanda de evaporación atmosférica (ET_o)(Steduto et al., 2009).

$$WP^* = \left[\frac{B}{\sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right)} \right]_{[CO_2]} \quad (2)$$

El valor de CO₂ como subíndice en la ecuación 2 indica la normalización, en una concentración media anual específica del año dado. WP* aumenta al aumentar la concentración de CO₂ en el aire. La ecuación es aplicable y confiable para datos diarios de Tr y ET_o, que junto al WP*, son utilizados por AquaCrop para calcular la biomasa aérea producida diariamente.

La transpiración del cultivo (Tr) es determinada por el programa mediante el dosel, ya que básicamente es proporcional a la cubierta del dosel (CD) (Ec. 3), siendo una característica relevante por expresar el follaje a través de CD y no por el índice de área foliar (IAF). El crecimiento del dosel depende del tamaño de la cubierta fotosintética existente simulándose mediante tres ecuaciones que representan cada etapa: la primera etapa del desarrollo del dosel donde el crecimiento es exponencial (Ec. 4), la segunda mitad el crecimiento en la que el CD

sigue una disminución exponencial (Ec. 5) y la última etapa (madurez) representa la senescencia del cultivo (Ec. 6).

$$Tr = CD \times Kcb_x \times ET_o \quad (3)$$

$$CD = CD_o e^{CCD \times t} \quad (4)$$

$$CD = CD_x - (CD_x - CD_o) \times e^{-CCD \times t} \quad (5)$$

$$CD = CD_x \left[1 - 0.05 \left(\exp^{\frac{3.33 \text{ CDD}}{CD_x + 2.29t}} - 1 \right) \right] \quad (6)$$

Donde Kcb_x es el coeficiente del cultivo cuando la cubierta de dosel se ha desarrollado completamente ($CD = 1$), ET_o es la evapotranspiración del cultivo calculada con la ecuación de FAO Penman-Monteith. CD es la cubierta de dosel en un momento t , CD_o el tamaño inicial del dosel que es proporcional a la densidad de la plantación y al tamaño inicial medio del dosel por plántula; CCD el coeficiente de crecimiento de dosel por grados días temperatura o por día. CD_x es la cubierta de dosel máxima en condiciones óptimas, CDD es el coeficiente de disminución del dosel y t el tiempo del inicio de la senescencia del dosel (Raes, 2016).

El rendimiento (Y) es la biomasa que tiene beneficio económico, se puede estimar por el producto de un índice de cosecha (IC), que se deriva de un índice de cosecha de referencia (ICo) por la biomasa (Ec. 7), que es específico del cultivo en condiciones óptimas (Steduto et al., 2009). Puede ser ajustado en caso de existir un estrés ambiental, pudiendo diferir del valor de referencia. Para tubérculos o raíces, el IC se representa por la relación entre la biomasa del órgano de almacenamiento y la biomasa total, en el caso de las especies cultivadas por sus tubérculos, la relación inicia con la formación del tubérculo o agrandamiento de la raíz con un crecimiento logístico y luego disminuye gradualmente hasta la madurez.

$$Y = B \times IC \quad (7)$$

El contenido de agua en el suelo es calculado diariamente en AquaCrop mediante un balance hídrico, lo que facilita la comprensión de las estrategias de gestión del riego, enfocando la zona radical como un reservorio donde hay flujos de entrada y salida de agua (Tran, 2018). Como flujos de entrada se consideran lluvia, riego, ascenso capilar; y de salida, escorrentía, percolación profunda y evapotranspiración (fig. 1). La cantidad de agua almacenada en la zona radical, que se formula como contenido de agua en el suelo en la zona radicular (W_r) (Ec.8) o tasa de

agotamiento (D_r) (Ec. 9) indica la cantidad de agua que se requiere para que el suelo vuelva a capacidad de campo (CC) (figura 1) (Steduto et al., 2012; Tran, 2018).

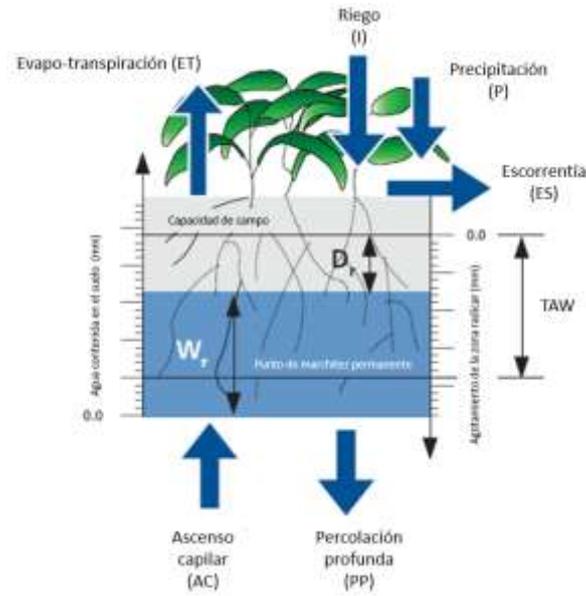


Figura 1. Zona radicular representada como un reservorio (Steduto et al., 2012).

La cantidad de agua que puede extraer la planta de la zona radicular es conocida como agua total disponible del suelo (TAW Ec. 10) que es el agua retenida en la zona entre capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). En condiciones de CC, D_r es cero y en PMP, D_r es igual a TAW.

$$W_r = 1000 \times \theta \times z \quad (8)$$

$$D_r = W_{r_{CC}} - W_r = 1000(\theta_{CC} - \theta) \times z \quad (9)$$

$$TAW = W_{r_{CC}} - W_{r_{PMP}} = 1000(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (10)$$

Donde θ es el contenido de agua en la zona radicular (m^3/m^3), el contenido de agua en el suelo en la zona radicular expresada en mm tanto a CC y PMP ($W_{r_{CC}}$ y $W_{r_{PMP}}$) y el contenido de agua en el suelo en la zona radicular en m^3/m^3 a CC y PMP (θ_{CC} y θ_{PMP}).

La profundidad efectiva de enraizamiento (z), es la profundidad a la que las raíces pueden extraer agua del suelo. La profundidad mínima de enraizamiento para el cálculo del balance es de 0.2 – 0.3 metros. La expansión de la zona efectiva se da cuando la profundidad de enraizamiento excede la profundidad mínima, hasta llegar a la profundidad efectiva máxima. Si hay una capa restrictiva, la profundidad se detiene en esta profundidad restrictiva. Todo lo detallado forma

los apartados más importantes y sus respuestas asociadas al sistema de cultivo que son fenología, follaje o dosel, profundidad de enraizamiento, producción de biomasa y rendimiento, se representa en la figura 2, el esquema de cálculo de AquaCrop.

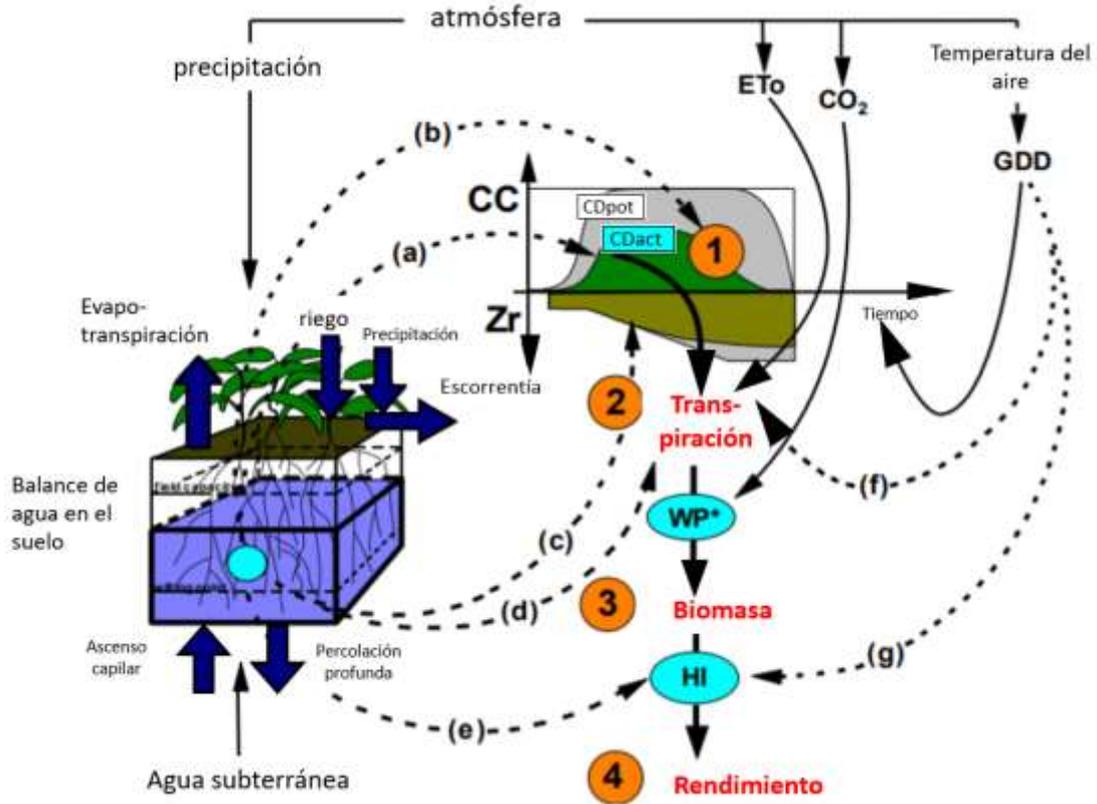


Figura 2. Esquema del cálculo de AquaCrop con indicación de los cuatro procesos representados por las flechas punteadas, afectados por estrés hídrico (a – e) y estrés por temperatura (f – g) (Raes, 2016).

1.5. CASO DE ESTUDIO: PRODUCCION DE CHUFA EN CLIMA MEDITERRANEO DE LA COMUNITAT VALENCIANA

La chufa en Valencia además de ser un cultivo es una tradición de la Comunitat Valenciana, por su importancia en el desarrollo económico a través de la historia, se la distingue de las producidas en otras regiones del planeta por su destacado sabor (Yusta, 2019). Se cultiva de forma regulada bajo el sello de Denominación de Origen Chufa de Valencia. Se produce en 19 términos municipales entre ellos se encuentran: Albalat, del Sorells, Alborai, Albuicech, Alfara de Patriarca, Almàssera, Bonrepòs i Mirambell, València, Paterna, Burjassot, entre otros (Pascual-Seva et al., 2013; Yusta, 2019). La mayoría de estos municipios, conforman la comarca *L'Horta Nord*, que se encuentra cercana a la ciudad de Valencia con una superficie de 140 Km² y

más de 200 mil habitantes, siendo los municipios de mayor importancia los de Valencia y Alboraiá (Yusta, 2019).

El paisaje dominante en la comarca es de orografía llana, con suelo franco arenosos y clima idóneo para la producción del cultivo con máxima calidad. El clima es mediterráneo subtropical con humedad relativa alta, veranos secos y caluros, donde la precipitación media anual es de 450 mm aproximadamente, cayendo en los meses de octubre y noviembre (otoño) el 40% de la lluvia aproximadamente, el resto de los años se riega mediante una red de acequias. La temperatura media mensual entre 15°C a 25 °C siendo los meses más cálidos julio y agosto con temperaturas máximas de hasta 40°C y la época más seca (8-22mm), en el futuro se prevé que las condiciones climáticas sean más extremas, con prolongadas sequías e inundaciones, con gran impacto en la agricultura (Timmermans et al., 2018).

Un nuevo sistema de manejo de riego permite comparar con los tradicionales y conocer la respuesta de la planta con respecto a la producción y posibles ajustes que se pueden realizar con respecto a tiempos oportunos de aplicaciones del agua. AquaCrop se ha aplicado ampliamente para simular cultivos herbáceos como maíz, soya, trigo, arroz, y tubérculos como la papa y maní, que se encuentran calibrados y validados para regiones específicas, con lo cual posteriormente se analizan los requerimientos hídricos y evaluación sobre el rendimiento del cultivo. Se busca calibrar y validar el cultivo de la chufa en AquaCrop, para simular en el programa el requerimiento el hídrico del cultivo para obtener rendimientos máximos.

II. OBJETIVOS

El objetivo principal es comparar la respuesta productiva y eficiencia en el uso del agua de riego del cultivo de la chufa mediante simulaciones realizadas con el programa informático AquaCrop. Para alcanzar este objetivo se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a. Calibrar y validar el modelo AquaCrop para el cultivo de la chufa en las condiciones ambientales de Valencia.
- b. Estudiar la capacidad del modelo para gestionar el agua del cultivo bajo condiciones de riego por surcos y riego localizado de alta frecuencia.
- c. Obtener una recomendación de manejo del riego en cada uno de los sistemas para una aplicación oportuna del suministro del agua de riego.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. COLECCIÓN DE DATOS

El presente trabajo se realizó con datos del cultivo de la chufa de los años 2006 – 2007, manejado con riego por surcos en la parcela 110 del polígono 9 del término de Alborai (39°29'33" N, 0°20'35" O) (figura 3a), y del cultivo con riego localizado de alta frecuencia los años 2017 – 2018 en el campo de investigación próximo al campus de la Universitat Politècnica de València (39°38' N, 0°22' O)(figura 3b), incluido en la zona productora de Chufa. Todos los datos utilizados proceden de trabajos previamente realizados por Pascual-Seva, con información del suelo, manejo, riego, cultivo y climatología de los años respectivos.



Figura 3. Vista aérea de las parcelas correspondiente a los experimentos. a: parcelas manejadas mediante riego por surcos; b: parcela manejada mediante riego localizado de alta frecuencia (E1) (Pascual-Seva, 2011).

3.2. INFORMACION USADA EN AQUACROP

3.2.1. Información Climática

La información meteorológica usada incluye datos diarios de: temperatura del aire máxima y mínima (T_{max} , T_{min}), velocidad del viento a la altura de 2.0 metros (u_2), humedad relativa máxima y mínima (RH_{max} , RH_{min}), precipitación (P) y radiación solar (R_s) durante el desarrollo del cultivo en los respectivos años. Para el año 2006 y 2007 los datos fueron tomados de la base de datos del IVIA (2019), correspondiendo a la estación meteorológica de Moncada (39°35'15.82" N, 0°23'56.26" O) desde el 1 de marzo del 2006 al 9 de noviembre del 2008. La información meteorológica de los años 2017 y 2018 se obtuvo de la estación meteorológica automatizada instalada en la parcela de investigación, se consideraron datos desde el 11 de mayo del 2016 al 5 de mayo del 2019.

La ETo fue calculada por AquaCrop con los datos previamente ingresados. El software calcula la ETo mediante la aplicación de la ecuación de FAO Penman – Monteith (Ec. 11)

$$ET_o = \frac{0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \times u_2)} \quad (11)$$

Donde Rn es la radiación neta de la superficie del cultivo expresada en MJ*m⁻²*día⁻¹, al igual que densidad del flujo de calor del suelo (G). La temperatura media del aire (T) y la velocidad del viento (u₂) deben medirse a 2 m de altura, con unidades de medida °C y m*s⁻¹ respectivamente. La presión de vapor de saturación (e_s) y la presión de vapor (e_a) en kPa. La pendiente de la curva de la presión de vapor (Δ) y la constante psicométrica (γ) se expresan en kPa*°C⁻¹.

Los datos de concentración de CO₂, para los diferentes años de análisis, fueron considerados los que presenta de manera predeterminada el programa (Observatorio de Mauna Loa en Hawaii)(Steduto et al., 2009). Con ello se crearon tres archivos, uno para cada grupo de años y uno para un año medio en el cual se analizaron 15 años (2004 – 2018), obteniendo los valores promedio, en este caso los datos meteorológicos fueron tomados de la base de datos del IVIA, concretamente de la estación de Moncada (IVIA, 2019).

3.2.2. Cultivo

Los valores de entrada relacionados con el cultivo para AquaCrop se clasifican en parámetros conservativos y no conservativos (Raes, 2016). Los valores conservativos, son valores que no cambian con el tiempo, manejo del cultivo, clima o ubicación geográfica (Steduto et al., 2012) como serían el porcentaje de cubierta de dosel, WP*, coeficiente del cultivo, entre otros; mientras que los no conservativos pueden requerir ajustes y se ingresan de acuerdo a datos precisos y de conocimiento del cultivo, como sería el caso del ciclo de crecimiento, densidad de las plantas, estrés presente en el cultivo, profundidad de enraizamiento, entre otros.

Se crearon cuatro archivos, uno para cada año (2006-2007; 2017-2018), con los datos aportados por Pascual-Seva. Estos ficheros incluyen fecha y densidad de plantación; fechas en que se observa la emergencia, máximo dosel, profundidad radical, entre otros parámetros no conservativos (tabla 1). Debido a que los datos de cultivo provienen de ensayos en desarrollo óptimo, los valores de estrés por salinidad o fertilización no fueron considerados. Para el desarrollo de cobertura se usaron días calendario. Entre los parámetros conservativos que se modificaron directamente de acuerdo con la información previa son: la temperatura base 12°C

que es la mínima requerida para la brotación del tubérculo y temperatura máxima 42°C (según lo detallado en el capítulo 1.2.3.) y el índice de cosecha fue considerado como 60% (Pascual-Seva et al., 2013).

Tabla 1. Información agronómica para el cultivo de la Chufa (*C. esculentus*) en Valencia, usada en AquaCrop para calibración y validación.

Parámetros no conservativos	2006	2007	2017	2018
	Riego por surco		Riego localizado	
Densidad de plantación (planta/m ²)	20.8	20.8	20.8	20.8
Fecha de siembra	12 abr.	8 may.	11 may.	19 abr.
Emergencia (DDP)	17	14	11	15
Dosel máximo (DDP)	99	96	93	97
Senescencia (DDP)	166	140	128	158
Madurez (DDP)	204	178	175	197
Fecha de madurez	1 nov.	1 nov.	1 nov.	1 nov.
Max. profundidad radicular (m)	0.25	0.25	0.25	0.25
Zr min. (m)	0.1	0.1	0.1	0.1

DDP, días después de la plantación; WP*, productividad del agua del cultivo normalizada para evaporización y CO₂ atmosférico.

Se consideró como fecha de madurez el 1 de noviembre para todos los años, por ser la fecha a partir de la cual el Consejo Regulados Denominación Origen Chufa de Valencia (CRDO) permite la incineración de los campos para proceder con la recolección de cultivos (Cajamar, 2017). Estudios realizados por Pascual-Seva (2011) demostraron que a partir de mediados de agosto se inicia la senescencia de las hojas, por procesos de traslocación de nutrientes hacia los tubérculos, alcanzando estos la mayor parte de biomasa.

3.2.3. Manejo

El programa divide el manejo en dos prácticas (anejo 1), una correspondiente a gestión de riego en el cual se puede generar un calendario de riego, calcular necesidades netas de agua o crear una carpeta con el riego que se ha aportado en cada campaña (Raes, 2016), siendo ésta la utilizada en esta primera parte del trabajo. La segunda práctica es sobre manejo del cultivo. En este caso, en los cuatro años se aplicaron prácticas estándar del cultivo, tal y como son descritas por Pascual et al. (1997), el programa de fertilización fue acorde a prácticas locales y se detallan por Pascual-Seva et al. (2016), con lo cual no se considera limitante. El cultivo no presenta sistema de cobertura, no hay presencia de escorrentía debido a las características del terreno y se realiza una buena gestión de la maleza.

Se creó un archivo para cada año en el cual se ingresó el calendario de riego correspondiente. La conductividad eléctrica media del agua (CEa) para todos los años es 1.6 dS/m, que no representa un riesgo de problemas de salinidad para el cultivo (Pascual-Seva et al., 2018). La frecuencia del riego por surcos fue entre 10 a 14 días, aportándose cuando el umbral de riego llegaba a 60% de la CC, con 14 eventos para el año 2006 y 15 eventos el año 2007. El porcentaje de superficie de área regada se aumentó desde el de 80% que daba el programa por defecto, hasta el 100%, debido a que al terminar cada evento de riego la parcela quedaba totalmente humedecida (figura 4, C-D). En riego localizado se procedía a regar hasta capacidad de campo cuando la CC llegaba a 80%, siendo 57 eventos en el 2017 y 42 para el 2018, los emisores aplicaban un caudal de 2.2 L/h por gotero y estaban espaciados a 0.25m dentro de cada línea de goteros, que a su vez estaban separadas 0.60 m (figura 4, A-B).

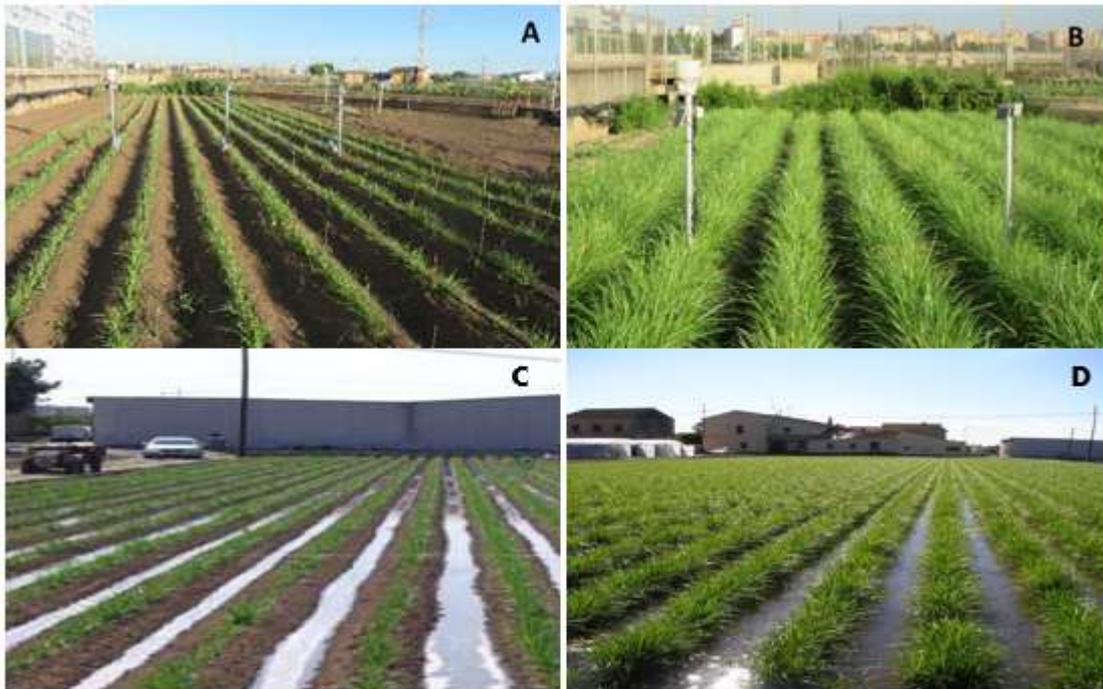


Figura 4. Cultivo de la chufa manejado mediante riego localizado de alta frecuencia (A-B); cultivo manejado mediante riego por surcos (C-D) (Pascual-Seva, 2011).

3.2.4. Suelo

El suelo antes de empezar la campaña se prepara con la ayuda de una fresadora que realizó varios pases cruzados en el terreno, por lo que cada año se debe determina la CC del terreno. Los sensores de capacitancia instalados en las parcelas fueron calibrados, mediante el método gravimétrico (Pascual-Seva et al., 2018). La textura del suelo e información de éste se detallan

en la tabla 2. Los demás valores como punto de marchitez permanente y saturación del suelo se usaron los que el programa proporcionaba por defecto.

Tabla 2. Propiedades físicas del suelo y contenido de agua en el suelo (CAS) inicial.

Año	Profundidad (cm)	Textura del suelo	PMP	CC	SAT	Ksat	CAS inicial
				% vol		mm/día	% vol
2006	0-30	Arena francosa	8	28	38	2200	11.66
2007	0-30	Arena	6	27.0	36	3000	12.30
2017	0-10	Arena francosa	8	15.0	38	2200	7.72
	10-20	Franco arenoso	10	19.5	41	1200	11.74
	20-30	Franco arenoso	10	24.0	41	784	21.58
2018	0-10	Arena francosa	8	13.1	38	2200	19.64
	10-20	Franco arenoso	10	17.4	41	1200	21.25
	20-30	Franco arenoso	10	23.1	41	784	31.94

Para 2006 y 2007 se consideró despreciable el aporte de agua subterránea, aunque en el 2017 y 2018 se incluyó en el modelo el agua subterránea (como se detallará en el punto 4), al presentarse en el terreno-

El contenido de agua en el suelo para 2006 y 2007 se midió con sensores de capacitancia (ECH₂O EC-5; Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA) a una profundidad de 12.5 cm (Pascual-Seva, 2011) los datos de 2017 – 2018 se obtuvieron mediante sondas multi-profundidad (Cprobe; Agrilink Inc. Ltd., Adelaide, Australia) a tres profundidades (10 -20-30 cm) (Pascual-Seva et al., 2018). El contenido inicial del agua para las simulaciones se consideró los días 1 -19 y 23 de mayo para 2006, 2017 y 2007 respectivamente, en 2018 la fecha elegida fue el 30 de abril (tabla 2), de acuerdo con el inicio de toma de datos por los sensores una vez validados.

3.3. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE AQUACROP

Para calibrar el modelo, se probaron diferentes valores de los parámetros conservativos en la simulación de los diferentes años, tomando como referencia lo realizado por Hsiao et al., (2009), ajustando repetidamente los parámetros después de realizada la simulación con los datos medidos para cada año de estudio. Mediante prueba y error se consigue llegar a un conjunto de parámetros conservativos útiles para todos los años simulados, y verificando que en cada año se logre una simulación cercana a los valores medidos (anexo 2), logrando conjuntamente

calibrar y validar el modelo de AquaCrop para el cultivo de la chufa en condiciones del Mediterráneo europeo. Los parámetros conservativos se derivaron todos de esta manera y se usó la versión de programa AquaCrop v. 6.0.

Las variables de salida que se evaluaron fueron el contenido de agua del suelo (CAS) y el rendimiento de cosecha. Se utilizaron parámetros no conservativos según lo recomendado por AquaCrop (Steduto et al., 2012).

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se emplearon las medidas estadísticas para el análisis del modelo, en el cual se comparan los datos de simulación y los resultados medidos. El primero es la raíz cuadrada de los errores cuadrados medios (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2} \quad (12)$$

Donde S_i son los valores simulados y M_i los medidos, n el número de observaciones. La unidad de RMSE es la misma que S_i y M_i . el ajuste del modelo mejora a medida que RMSE se acerca a cero. El otro parámetro es el índice de acuerdo (d) de Willmott (1982)

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{M}| + |M_i - \bar{M}|)^2} \quad (13)$$

Donde \bar{M} es la media de los valores n medidos. El valor de d varía entre $-\infty$ a 1.0; mejorando el ajuste del modelo cuando se acerca a uno. El coeficiente de eficiencia de Nash tiene un rango de valores entre $-\infty$ a 1, donde al estar el valor cercano a 1, el modelo será muy preciso, un valor cercano a 0 indica que son precisos como la media de los datos observados y si es menor que cero, la media observada es mejor predictor que el modelo

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|M_i - \bar{M}|)^2} \quad (14)$$

La desviación relativa (D), se usó para analizar los resultados del rendimiento, para evaluar la desviación de los valores simulados con los observados, teniendo mayor concordancia cuando los resultados se acercan más al cero (Araya et al., 2016).

$$D = \frac{(S_i - M_i) * 100}{M_i} \quad (15)$$

3.5. ESCENARIOS DE RIEGO

Una vez ajustado el modelo para el CAS, se puede utilizar el modelo para analizar distintas estrategias de riego, con lo que se analizaron escenarios, evaluando las necesidades de riego para obtener máximo rendimiento del cultivo. Tanto en riego por surcos como localizado, se buscaron los tiempos óptimos de aporte de agua, que no comprometa el rendimiento, enfocando en ajustar el aporte de agua en las etapas menos sensibles del cultivo (inicio del desarrollo vegetativo y senescencia). Para el escenario se usaron valores promedio de los últimos 15 años de datos climáticos y los valores parametrizados para el cultivo de la chufa; respecto a las condiciones del suelo se tomaron como referencia el año 2018 al ser el último año del cual se disponen datos para el riego localizado de alta frecuencia y el suelo del año 2006 para riego por surcos por representativo de los suelos en que se realiza este tipo de riego. Se consideró que el aporte de agua subterránea no es importante.

Para generar el calendario de riego, primero se generó el requerimiento neto de agua de riego para el cultivo de la chufa y posteriormente se probaron diferentes criterios de tiempo y profundidad que el programa contempla para generar un programa de riego.

Se calculó la eficiencia del uso del agua de riego (EUAR) como un indicador de la bondad de cada calendario generado, junto con el rendimiento que se puede obtener. EUAR se define como el cociente entre el rendimiento y el volumen total de agua de riego aportado (Pascual-Seva, 2011; Pawar et al., 2017).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la información detallada en las secciones anteriores (3.2 y 3.3), se logró calibrar el modelo con lo cual se obtuvo un grupo de parámetros conservativos estándar para el cultivo de la chufa que se muestran en la tabla 3. Los datos no conservativos del cultivo, como la fecha de madurez, la profundidad máxima de la raíz y la densidad de plantación, pueden considerarse uniformes en todos los años, ya que después de muchas investigaciones corresponden a los habituales del cultivo (Pascual et al., 1997; Pascual-Seva, 2011). Los demás parámetros no conservativos detallados en la tabla 1, dependen de la fecha de siembra (entre abril y mayo) y del fotoperiodo, al influir en la tasa de crecimiento (Follak et al., 2016). Para esto se consideró un promedio de

los valores medidos entre los cuatro años, estableciéndose la emergencia promedio en 14 DDP, el dosel máximo se alcanza a los 96 DDP, la senescencia empieza 148 DDP y la madurez 189 DDP, teniendo como fecha de referencia para la madurez la fecha en la cual se permite incinerar el cultivo que es el 1 de noviembre según lo indicado en la sección 3.2.2.

Tabla 3. Valores parametrizados en AquaCrop para el cultivo de la Chufa (*Cyperus esculentus*).

Parámetros conservativos	Valor	Unidad o significado
Temperatura base	12	°C
Temperatura máxima	42	°C
Cobertura de dosel inicial (CDo)	5	cm ² /planta
coeficiente de crecimiento de dosel (CCD)	8.6	%/día
Máxima cubierta de dosel	100	%
Coeficiente de disminución del dosel (CDD)	8	%/día
Coeficiente de transpiración del cultivo	1	Transpiración completa del dosel en relación con ETo
Productividad del agua normalizada (WP*)	30	g/m ²
Umbral de crecimiento de la hoja (p. sup)	0.23	Como fracción de TAW, por encima de este valor se detiene el crecimiento foliar
Umbral de crecimiento de la hoja (p. inf)	0.55	El crecimiento de la hoja se detiene en este valor
Curva del coeficiente de estrés foliar	4	Curva moderadamente convexa
Umbral de conductancia estomática (p. sup)	0.49	Por encima de este valor el estoma se cierra
Forma de la curva del estrés de conductancia estomática	2	Curva altamente convexa
Coeficiente de estrés de senescencia (p. sup)	0.85	Por encima de este valor comienza la senescencia temprana
Forma de la curva del coeficiente de estrés de senescencia	3	Curva moderadamente convexa
Tiempo de acumulación del IC	85	Días
^z Índice de cosecha (ICo)	60	%

^z Se considera conservativo, pero puede ser específico del cultivar.

El valor de WP* para el cultivo se estableció en 30 g/m², a lo largo de las simulaciones el valor tendía a ser inferior a 30 g/m², pero después de realizar los ajustes correspondientes entre todos los parámetros interrelacionados, este era el valor que más se ajustaba al modelo. Otros tubérculos como la patata presentan valores superiores al rango de cultivo C3 (13-20 gr/m²)(Casa et al., 2013), pero en este caso se ajusta al rango para cultivos C4, tal y como corresponde (30-35 gr/m²).

El rendimiento se muestra en la tabla 4, donde se puede comparar los valores simulados con los valores medidos para los cuatro años de estudio; para los años 2006, 2017 y 2018 la desviación entre ambos datos es menor al 2%, siendo la de mayor ajuste la correspondiente al año 2017 (0.39%). En el año 2007, para el IC parametrizado, la desviación fue del 10.75% (2007^a), un valor muy alto en comparación con los obtenido en los otros años. De acuerdo con los datos medidos ese año, el IC de cosecha fue significativamente mayor en comparación a los ensayos del 2006 (Pascual-Seva, 2011), por ello se volvió a simular cambiando para ese año el valor de 60% a 65%, con lo cual la desviación bajo a 3.35% (2007^b), ajustándose más a lo medido en campo, conforme se aumenta el IC disminuye la desviación, pero se consideró tomar el valor de 65% inferior al obtenido en campo (80%), por ser próximo al valor parametrizado para el cultivo y desviación próxima a los otros años. Se debe tener en consideración que, en los años de estudio, 2007 y 2017 son los años, que según el programa representa, con mayor y menor, respectivamente, afectación por temperatura sobre la transpiración. Analizando los datos, 2007 es el año con mayores aportaciones de agua y 2017 con las menores.

Tabla 4. Resultados de simulación de los cuatro años con respecto al rendimiento.

Año	Medición Tn/ha	Simulación Tn/ha	Desviación	IC %	Temperatura (transpiración)	Expansion de dosel	Cierre de estoma
2006	18.2	17.9	-1.41	60	8%	30%	9%
2007 ^a	19.5	17.4	-10.75	60	11%	12%	6%
2007 ^b	19.5	18.8	-3.35	65	11%	12%	6%
2017	17.9	17.9	+0.39	60	3%	1%	1%
2018	18.2	17.9	-1.824	60	9%	22%	11%

El contenido de agua en el suelo simulado y medido en la zona radical, para el 2006 y 2007 se presentan en la figura 5, donde se puede observar que la simulación para el 2006 interpreta bien el comportamiento de agua, ajustándose a las medidas en el campo. Respecto al año 2007, la simulación tiende a sobreestimar los valores, con pico más altos a los medidos en el momento de aplicación del riego, teniendo en cuenta que la textura del suelo es más arenosa, pero coincide bien en general.

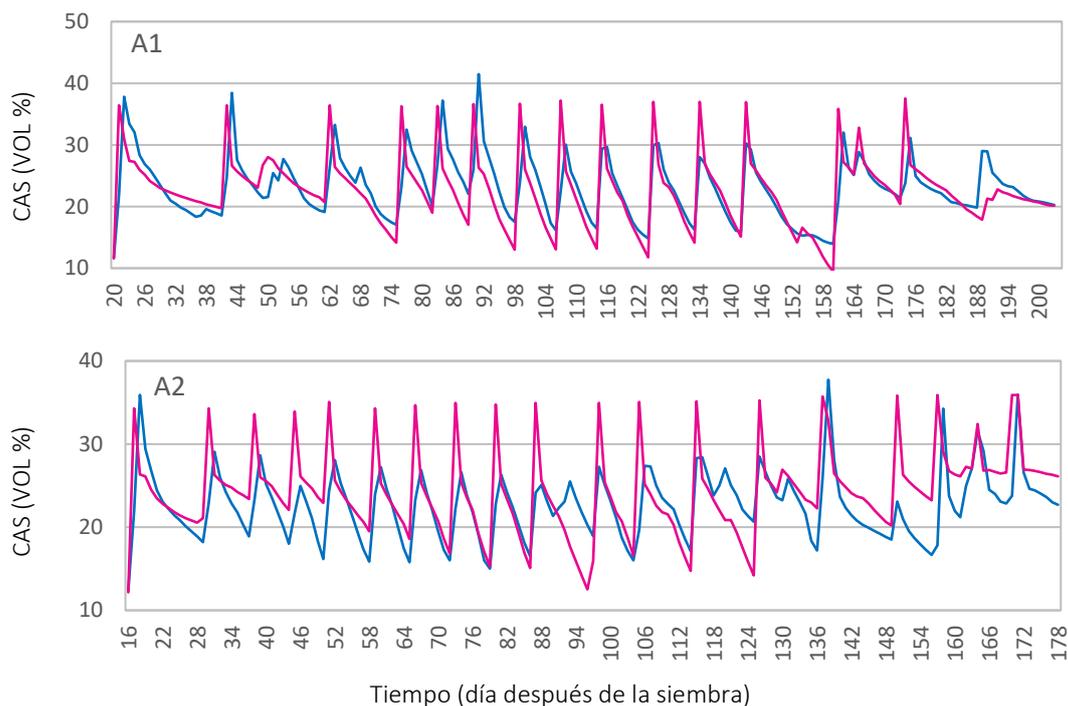


Figura 5. Resultado de la calibración y validación del contenido del agua en el suelo (vol %) para los años 2006 (A1: 12.5 cm) y 2007 (A2: 12.5 cm). Comparando la simulación (—) y lo observado (—), riego por surco.

En los años 2017 y 2018, ser riego localizado la humedad del suelo fue monitorizada a tres profundidades (10,20,30 cm), por lo que el análisis se pudo realizar a estas tres profundidades. Al simular el modelo y al realizar comparaciones visuales del contenido de agua en el suelo (CAS) simulado con el medido para los meses de agosto y septiembre, el modelo inicial tendía a subestimar el contenido de agua a los 30 cm, por ello investigando sobre el perfil del suelo donde se encontraba establecido el cultivo y la posible incidencia en el flujo del agua en el suelo, se encontró que el suelo a partir de los 30 cm es más arcilloso. Para determinar las características del horizonte se usaron datos de Lidón et al., (2009) en Alboraiá donde detalla que el suelo a profundidad de 40 – 60 cm es franco arcillo arenoso; los valores predeterminados de CC y SAT fueron ajustados de 47% a 60 % y 32% a 34.5%, 36% en 2017 (Tombul et al., 2004) respectivamente. La simulación mejoró, pero no lo suficiente en los meses de interés, tanto para el CAS como para el rendimiento. En el programa, el CAS a esa profundidad y por la profundidad de las raíces, es un parámetro más relacionado con datos del suelo que con los del cultivo. Previamente se ajustó en el programa, datos referentes al cultivo en respuesta a estrés por agua y temperatura, porque, en el Mediterráneo durante los meses más calurosos puede darse una parada estival en las plantas, afectando la transpiración. Que no es el caso en el presente estudio, al no se presentaron variaciones en el CAS a esa profundidad en las nuevas

simulaciones. Este hecho concuerda con estudios realizados en maíz que es una planta C4, donde al aumentar la temperatura aumentó gradualmente la transpiración y no hubo cierre estomático (Chaves-Barrantes & Gutiérrez-Soto, 2016), por ello se procedió a ajustar el agua subterránea, ajustándose a la realidad del terreno.

El ajuste se realizó para cada año (2017 – 2018), en los meses de agosto a septiembre, se estableció que el agua subterránea se encontraba entre los 1.25 m a 1.9 m, hasta lograr el mejor ajuste para el CAS a los 30 cm de profundidad. En 2006 y 2007 no se consideró la influencia del agua subterránea, al encontrarse el sensor de humedad a 12.5 cm de profundidad, no viéndose afectada por los horizontes inferiores. Se logró obtener una simulación cercana al comportamiento del agua en el suelo para las tres profundidades medidas, tendiendo a sobreestimar ciertos meses y subestimar otros (figura 6). El CAS se podría haber ajustado más, de poseer más información del suelo como el PMP o SAT, dado a que, a pesar de que los sensores se encontraran separados solo 10 cm se nota la diferencia en la CC entre cada sensor y no son similares a los que el programa da de referencia. Al ajustar cualquier parámetro del suelo como el PMP, CC, SAT, hará que cambie el CAS y el rendimiento simulado. Estudios realizados por Vanuytrecht et al., (2014) y Pogson et al., (2012) concuerdan sobre la influencia de parámetros de la raíz, el suelo y el agua del suelo en las simulaciones de AquaCrop en la variabilidad del rendimiento, la calibración y validación del programa.

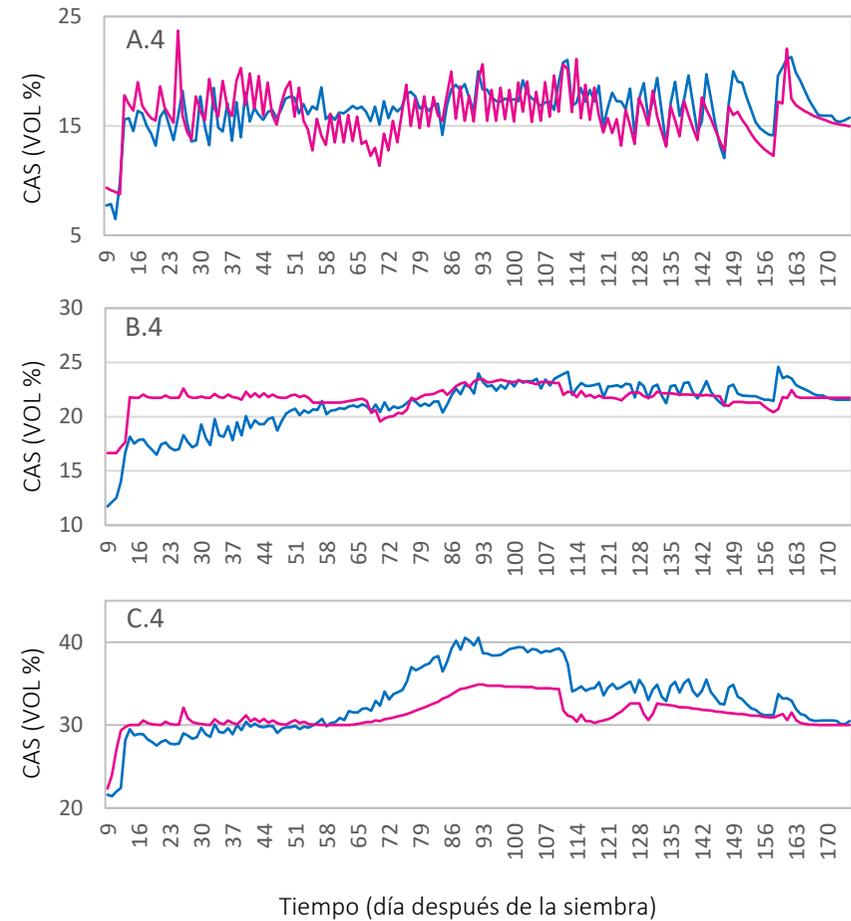
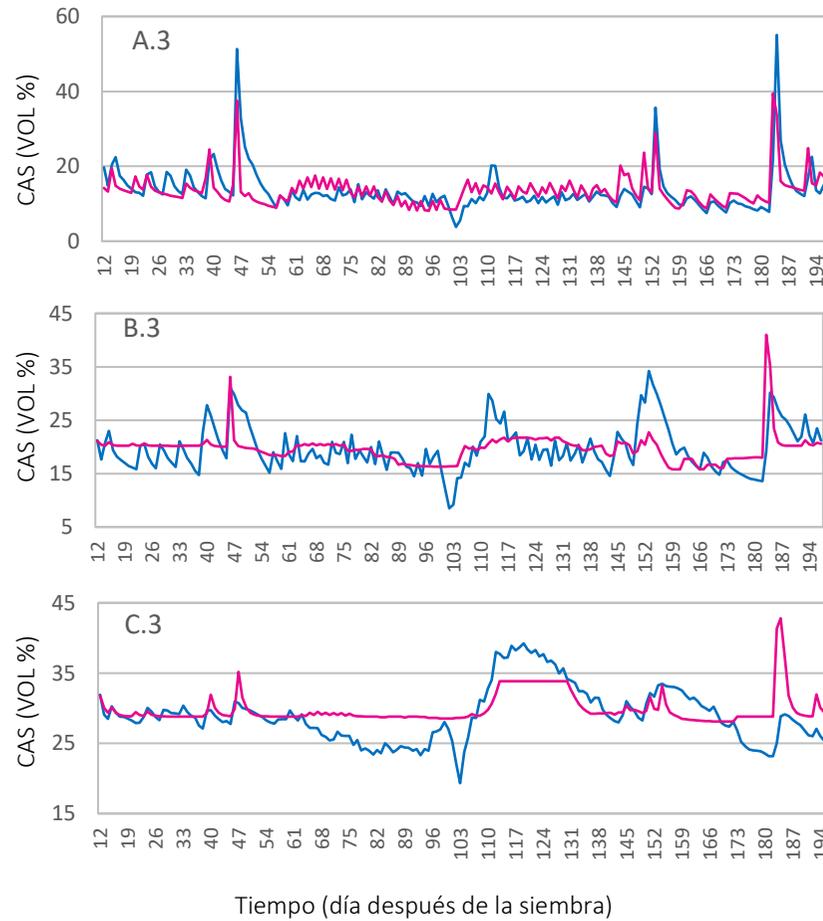


Figura 6. Resultado de la calibración y validación del contenido del agua en el suelo (vol %) para los años 2017 (A3: 10 cm; B3: 20 cm; C3: 30 cm) y 2018 (A4: 10 cm; B4: 20 cm; C4: 30 cm). Comparando la simulación (—) y lo observado (—) en sistema de riego localizado de alta frecuencia.

Analizando estadísticamente los resultados obtenidos (tabla 5) para todos los años, el RSME está entre 1.99 vol% y 4.87 vol%, tanto en riego localizado como por surcos, el índice de ajuste varía entre 0.57 y 0.79, siendo un valor cercano a 1, por lo que el ajuste puede ser considerado aceptable. Con respecto al índice de Nash, para todos los niveles de profundidad y todos los años estuvo entre 0.15 - 0.45, excepto para 2007 y a la profundidad de 10 cm en 2017 que dieron valores de -0.46 y -0.08 respectivamente, los valores mayores a cero muestra que los valores simulados son precisos, como la media de los datos observados, y los valores negativos que la media observada es mejor predictor que el modelo, como ocurrió para el 2007 y para la profundidad de 10 cm del 2017. Interpretamos como un ajuste generalmente bueno por parte del modelo y de su parametrización, al no contar con todos las propiedades hidráulicas de los perfiles (por no estar disponibles). Esta variación en CAS puede ser también debido a que el programa no permite el ingreso de numero decimales, sino que redondea los valores, cuando se ingresan los datos de la dosis de riego en cada evento. Sumado a que evaluando el 100% de los datos y no valores al azar, se demuestra que el RSME más alto está en las profundidades más superficiales, pero al observar las gráficas, representa bien la tendencia del simulado con el valor medido y no se visualizan cambios bruscos.

Tabla 5. Indicadores de bondad de ajuste para chufa del contenido de agua en el suelo.

Parámetro	Año	Riego	Profundidad (cm)	Estadística		
				RMSE (%)	D	E
	2006	Surco	12.5	4.44	0.79	0.20
	2007	Surco	12.5	4.87	0.65	-0.46
Contenido de agua en el suelo	2017	Localizado	10	2.25	0.68	-0.08
			20	1.99	0.61	0.35
			30	2.96	0.74	0.44
	2018	Localizado	10	4.40	0.78	0.45
			20	3.92	0.57	0.15
			30	3.37	0.62	0.25

RMSE: raíz cuadrada de los errores cuadrados medios; d: índice de acuerdo; E: coeficiente de eficiencia de Nash

La simulación del desarrollo de la cubierta del dosel debería ser corroborado con más profundidad con ensayos en campo. Con esta información se podría obtener una calibración más completa del programa, ya que no existen en la actualidad estudios con respecto a cubierta de dosel o índice de área foliar para comparar los resultados obtenidos.

4.1. MODELACIÓN DE APLICACIONES DE MANEJO DE RIEGO

El programa determinó que las necesidades netas de agua de riego para el cultivo son de 507.4 mm, con un rendimiento de 20999 T/ha, al agotarse el 100% del agua fácilmente útil (RAW). Estos valores se tomaron de referencia junto con los datos de los años usados en la calibración y validación del modelo, para la generación de los calendarios de riego. La precipitación promedia considerada es de 190.2 mm durante el ciclo del cultivo.

Los primeros criterios analizados fueron los ya existentes, para la programación de riego del cultivo que es considerar el umbral de riego cuando el CAS llegue a 60% de la CC en riego por surcos y cuando la CAS este a 80% de la CC en riego localizado, en todo el ciclo del cultivo. Se comprobó la respuesta a diferentes umbrales de riego, considerados a diferentes porcentajes de CC, tanto durante todo el ciclo del cultivo como variándolo por etapas del cultivo. Obteniendo mejores resultados en rendimiento y productividad del agua, cuando el umbral de riego variaba por etapa del cultivo y se ajustaba la lámina de riego con el mismo criterio, en ambos sistemas de riego (tabla 7 y 9).

4.1.1. Riego por surcos

Las simulaciones dieron como resultado que aportar agua de riego en los primeros días del cultivo, no generará mayores rendimientos y solo generan un requerimiento mayor de agua, en comparación a las simulaciones que se empieza a regar en días próximos a los 15 DDP. Esta práctica de no regar los primeros días del ciclo concuerda con lo realizado en el cultivo, aplicando el primer riego cuando el cultivo alcanza una altura 15-20 cm (25-30 DDP) (Pascual-Seva, 2011;Cajamar, 2017). En el año 2007, el primer riego en el cultivo se realizó a los 16 DDP y en el 2006 a los 20 DDP, que se relaciona con el resultado obtenido en las simulaciones.

Otro de los parámetros analizados fue el número de eventos de riego que se deben aportar. En la práctica se realizan entre 10 a 15 eventos por campaña, como los 14 y 15 eventos, realizados en 2006 y 2007 respectivamente. El programa en las múltiples simulaciones donde se probaron diversas fechas y criterios arroja que los eventos de riego deben ser alrededor de 18, para mejorar tanto la producción como la productividad del agua. La generación del calendario de riego para umbrales de riego considerando CAS de 50% o 60% de la CC, y reponer el CAS hasta la CC (RS50CC y RS60CC (tabla 6)), dio los valores de referencia de la lámina de riego (LR), que comprendió valores entre 15 a 36 mm. Los estudios realizados por Pascual-Seva (2011)

determinaron que una LR de 29 mm permitía el riego adecuado de la parcela tipo en el cultivo. Por lo tanto, el criterio de establecer la dosis de riego hasta la CC fue sustituida por una dosis de riego fija, con dosis entre 29 y 36 mm, dependiendo de la etapa del cultivo. Estos resultados de LR inferiores a los 70 mm, que es el promedio que se usa en riego por surcos en la chufa, coinciden con los obtenidos por Pascual-Seva (2011) mediante la optimización del riego por surcos (caudal de entrada y tiempo de riego) con el programa WinSRFR 3.1, y validado en 2011 donde la LR aplicada fue entre 29 – 38 mm

En la tabla 6 se resumen las formulaciones de calendario de riego generados más representativos, detallando la información explicada en los párrafos anteriores. La eficiencia del uso del agua de riego (EUAR) en 2006 y 2007 es menor a 2 kg/m³, que se encuentra entre los valores medios determinados para el cultivo de la chufa (1.78 a 1.91 kg/m³) (Pascual-Seva, 2011). Los calendarios de riego generados por las simulaciones obtenidas indican que el EUAR puede llegar a valores mayores de 3 kg/m³, aumentando la eficiencia conforme disminuye el agua aplicada. El máximo EUAR se observó para el calendario RS50CC*, pero el rendimiento es el menor y como se detalla en párrafos anteriores y la LR no es viable en campo. El calendario RSVV es el que indica un mayor rendimiento, con un EUAR cercano a RS50CC* y con un programa de riego extrapolable a campo.

Tabla 6. Resumen de formulación de calendarios de riego por surco.

Calendario	Rendimiento Kg/m ²	Riego mm	Eventos	Inicio DDP	EUAR kg/m ³	CC %	Riego mm
2006**	1.82	995	14	20	1.83	60	65
2007**	1.95	1199	15	16	1.62	60	76
RS50CC*	2.018	505	17	6	3.99	50	a CC
RS5030	2.078	570	19	6	3.65	50	30
RS5033	2.033	594	18	6	3.42	50	33
RS6030	2.024	690	23	5	2.93	60	30
RS60CC*	2.024	582	23	6	3.50	60	a CC
RSVV	2.102	562	18	14	3.74	V	V

*más de 5 eventos con LR menor a 29 mm (no viable); V = variado; **Datos de riego reales

Los rendimientos simulados con los calendarios de riego propuestos indican valores superiores a 2.00 kg/m², mayores a los obtenidos en campo en 2006 y 2007 y con menor cantidad de agua de riego. Se buscó generar un calendario que igualara o mejorara al rendimiento de 2.09 kg/m², obtenido en el programa mediante los requerimientos netos de agua de riego del cultivo. Se logró con el calendario RSVV, con un rendimiento estimado de 2.10 kg/m² y 562 mm de lámina de riego neta, que son 55 mm más que de los requerimientos netos simulados inicialmente por

el programa, y menor a los 900 mm de agua de riego que se usan en riego por surcos aproximadamente.

El calendario de riego recomendable consideraría el umbral de riego y lamina de riego variable durante las etapas del desarrollo del cultivo. Las menores dosis de agua de riego pueden realizarse al inicio del desarrollo y en la etapa de senescencia del cultivo. Al ser en los meses de verano donde se da la tuberización y el desarrollo de los tubérculos, se requieren mayores aportes de agua de riego en el cultivo (Pascual-Seva, 2011). La mayor LR requerida corresponde a los meses de mayor temperatura, con 33 mm, iniciando el riego cuando el CAS alcanza el 50% CC (tabla 7). A partir de los 160 DDP, inicio de senescencia del cultivo, suelen aparecer las primeras lluvias otoñales en *L'Horta Nord de Valencia*, que aportan el agua necesaria al suelo para terminar la producción de chufa, sin afectar el rendimiento.

Tabla 7. Calendario de riego RSVV propuesto para el cultivo de la chufa, en riego por surcos.

	Emergencia		Desarrollo			Cobertura max.	Senescencia*
	0-13	14-23	24-49	50-79	80-99		
DDP	0-13	14-23	24-49	50-79	80-99	100	160
LR (mm)	N/A	29	29	32	30	33	N/A
%CC	-	50	60	50	45	50	-

*Inicio de la temporada de lluvia

En la figura 7 se muestra cómo se distribuirían los eventos a lo largo del ciclo del cultivo, variando entre los seis a diez días entre cada intervalo, los intervalos más cortos (seis – ocho días) se dan en el llenado de tubérculos entre los 73 – 135 DDP y este período es al que mayor lamina de riego (33 mm) se aportaría a partir de los 100 DDP hasta el final del ciclo. La menor lámina de riego (29 mm) se debería aplicar durante la brotación, emergencia y desarrollo foliar, durante la tuberización el requerimiento de agua aumenta (32 mm) y al inicio del llenado se pudiera disminuir la lámina a 30 mm. Después de los 139 DDP, solo se requeriría un evento de riego más, esto puede deberse a que el cultivo ya empieza la senescencia y su demanda de agua es menor e inició las primeras lluvias otoñales, aportando las precipitaciones el agua que requiere el cultivo para terminar su desarrollo.

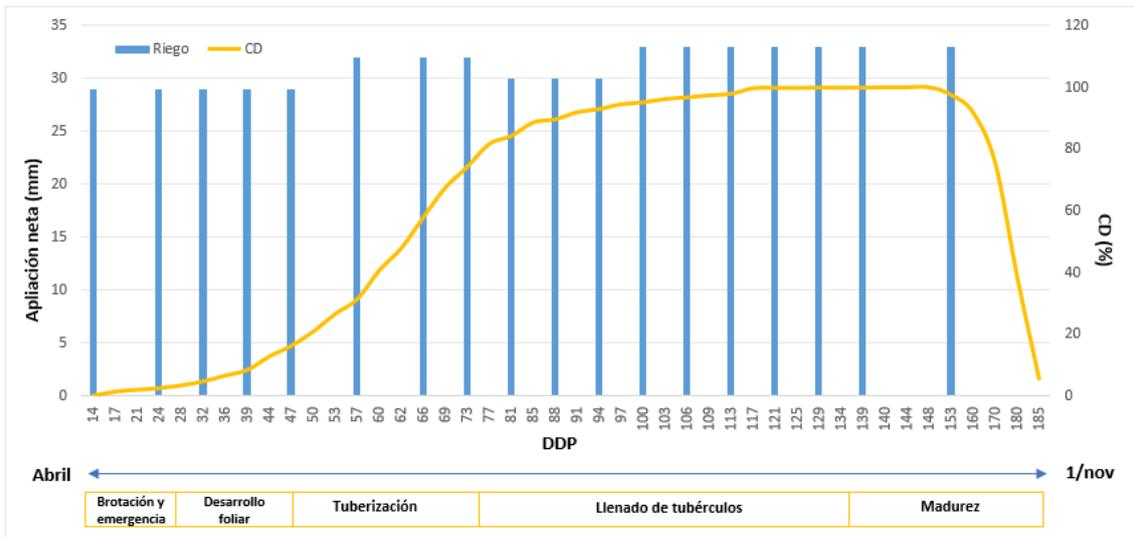


Figura 7. Eventos de riego del calendario RSVV, generado con el programa AquaCrop para el cultivo de la chufa y desarrollo de la cubierta del dosel (CD) simulada.

4.1.2. Riego localizado de alta frecuencia

En riego localizado de alta frecuencia todos los eventos empiezan en días próximos a los 15 DDP, de acuerdo con los datos de campo y a los analizados en el programa, riegos previos aumentan el requerimiento de agua de riego mas no el rendimiento, lo mismo que sucede en riego por surcos. Se tomaron como referencia también los resultados de simulación de las necesidades netas de riego del cultivo.

Se probaron varios calendarios, destacando en la tabla 8 los más representativos. Todas las simulaciones de los calendarios mostraron una EUAR mayor a 3.2 kg/m^3 , que es el valor obtenido en 2017. En 2018 la EUAR en los ensayos de campo fue de 4.2 kg/m^3 , un valor alto, en comparación a 2017, esto puede deberse a que las precipitaciones en los meses de septiembre y octubre fueron de 303 mm, mucho mayores que durante los mismos meses en 2017 (35.6 mm). En la generación del calendario, las simulaciones que dieron valores cercanos a la EUAR del 2018 fueron Raf60CC, Raf6010 y RafVV. La precipitación promedio para todo el ciclo del cultivo (de abril a octubre) en la simulación es de 192 mm, con lo cual el programa simula que aun en un año promedio se puede obtener una alta EUAR. Raf60CC y Raf6010 dan un valor alto de EUAR con un rendimiento similar a los obtenidos en campo, este calendario se generó con un umbral de riego correspondiente al 60% CC, pero se puede considerar poco viable alcanzar rendimientos de 1.7 kg/m^2 . Ensayos de riego localizado de alta frecuencia en 2017 – 2018, con

umbral de riego del 70% CC han dado como resultado que el cultivo produce alrededor de 1.5 kg/m², siendo un año en el cual las precipitaciones fueron altas (Pascual-Seva, 2011).

Tabla 8. Resumen de formulación de calendario de riego de alta frecuencia.

Calendario	Rendimiento	Riego	Eventos	EUAR	CC	Riego
	kg/m ²	mm		kg/m ³	%	mm
2017**	1.790	557.0	42	3.21	80	A CC
2018**	1.820	430.0	57	4.23	80	A CC
Raf80CC	2.024	568.0	58	3.56	80	A CC
Raf8010	2.032	610.0	61	3.33	80	10
Raf60CC	1.787	424.4	30	4.21	60	a CC
Raf6010	1.864	440.0	44	4.24	60	10
RafVV	2.141	503.4	60	4.25	V	V

V = variado; **Datos de riego reales

Al igual que los resultados obtenidos en riego por surco, en riego de alta frecuencia el mayor rendimiento y EUAR obtenidos por el programa se obtienen con un umbral de riego variable con las etapas del cultivo. La dosis de agua de riego, de acuerdo con las simulaciones desarrolladas, al igual que el umbral de riego, debe variar por etapa del cultivo (tabla 9). Tanto en desarrollo como en senescencia del cultivo se pueden realizar los mayores ajustes de aporte de agua de riego. A inicio del desarrollo el cultivo, el programa simula que puede ser viable regar cuando el CAS esté al 65% de la CC, sin necesidad de que se riegue hasta capacidad de campo como se muestra en la tabla 9, y aumentando la dosis de riego conforme llega al máximo desarrollo. Cuando el cultivo está alcanzando el máximo desarrollo (80-109 DDP) debería regarse cuando el CAS llegue a 80% de la CC, con una dosis de riego correspondiente a retornar a CC, esto puede deberse a la alta demanda de agua por parte del cultivo en esta etapa. En la máxima cobertura (110 – 139 DDP), el programa indica que los mayores rendimientos se podrían obtener con un umbral de riego ligeramente menor (75% CC), y con una menor dosis, durante el mes de agosto, cuando las temperaturas son las más altas, con lo que el CAS en poco tiempo descende a este nivel. A partir de los 140 DDP, aproximadamente a mediados de septiembre, se debe regar cuando el suelo esté al 80% de la CC, pero con unas dosis menores.

Tabla 9. Calendario de riego de alta frecuencia (RafVV) propuesto para el cultivo de chufa.

	Emergencia	Desarrollo			Cobertura max.		Senescencia*
	DDP	15-59	60-79	80-109	110-139	140	163
a CC	0-14	-2mm	0 mm	0 mm	-6mm	-7mm	N/A
%CC	N/A	65	65	80	75	80	-

*Inicio de la temporada de lluvia

Este calendario aun que posee valores de umbrales de riego por debajo del 70% CC, se puede considerar muy extrapolable a campo, debido a que en etapas claves del desarrollo el umbral considerado es el 80% de la CC. En ensayos de campo este porcentaje establecido en todo el desarrollo del cultivo produjo rendimientos entre 1.8 y 2.0 kg/m², con una EUAR aproximadamente de 4.22 kgm⁻³ (Pascual-Seva et al., 2016). Con este calendario se podría obtener una eficiencia del 4.23 kgm⁻³, ligeramente mayor a las ya obtenidas en campo, pero con un rendimiento mayor 2.14 kg m⁻² (tabla 8). En ensayos realizados con riego de alta frecuencia en 2015, 2016 y 2017, se han obtenido valores de EUAR mayores a 4.5 kgm⁻³, con rendimientos cercanos a 2.3 kgm⁻² (Pascual-Seva et al., 2016; 2018). El EUAR no solo depende del rendimiento, sino también de la dosis aplicada, que está directamente ligada a la evapotranspiración y a las precipitaciones, tanto en cantidad como en su distribución, por la que puede cambiar con las condiciones climáticas de cada año (Pascual-Seva et al., 2016). El calendario mostrado da una referencia de los valores que se pueden obtener con precipitaciones medias, que sería interesante comprobar la respuesta real encampo.

En la figura 8 se muestra cómo se distribuirían los eventos a lo largo del ciclo del cultivo, hasta los 70 DDP los intervalos de riego serían de entre dos a tres días, aumentando progresivamente la dosis de riego conforme se desarrolla el cultivo. Posteriormente, entre los 70 y 135 DDP, tiempo en el cual se da el desarrollo y engrosamiento de los tubérculos, los intervalos de riego serían más cortos (entre uno y dos días) (coincidiendo con lo indicado en estudio de campo por Pascual-Seva, 2011). Hasta los 80 DDP con dosis de riego altas (mayores a 10 mm) porque el cultivo aun estaría alcanzando el máximo desarrollo y pudiera existir una mayor demanda de agua, y posteriormente la dosis de riego debería ser entre 8 y 10 mm, con lo que se reduciría la pérdida del agua por evaporación durante los meses de mayores temperaturas. Después de los 135 DDP, los intervalos entre riegos deberían ser más largos (mayores a 3 días), esto puede deberse a que el cultivo ya empieza la senescencia y su demanda de agua es menor y porque inician las primeras lluvias otoñales con lo cual, las precipitaciones que se producen aportarían el agua que requiere el cultivo para terminar su desarrollo.

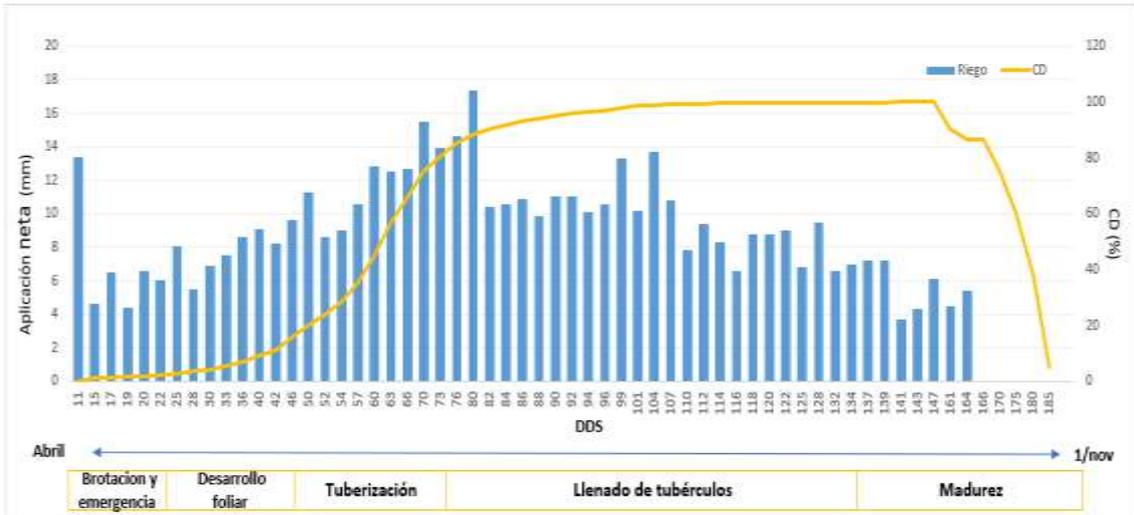


Figura 8. Eventos de riego del calendario RafVV, generado con el programa AquaCrop para el cultivo de la chufa y desarrollo de la cubierta del dosel (CD) simulada.

V. CONCLUSIONES

La calibración y validación para el cultivo de la chufa en el programa AquaCrop, se realiza mediante el uso de datos del contenido de agua en el suelo y del rendimiento. Tanto el contenido del agua de suelo como el desarrollo del cultivo representan un comportamiento aproximado al que se da en condiciones reales en campo.

Las recomendaciones del manejo de riego tanto en surcos como en alta frecuencia determinan que, para obtener mayores eficiencias del uso del agua de riego como rendimiento estos deben, establecer un manejo diferenciado por cada etapa del cultivo.

La etapa de brotación y desarrollo son las etapas donde se puede permitir una mayor reducción del riego (menor frecuencia y dosis de riego). Los meses de verano corresponden a los de mayores aportes de agua de riego requieren y con mayor frecuencia. En la etapa final del cultivo, que coincide con las lluvias otoñales, los requerimientos de agua de riego son bajos, debido a que las lluvias presentes en esta etapa aportarían el agua necesaria para que la planta para terminar su ciclo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agricultural European Innovation Partnership (EIP-AGRI). (2016). *Agua y agricultura: estrategias adaptativas a nivel de la explotación ¿Qué estrategias adaptativas existen o pueden desarrollarse a nivel de la explotación para dar respuesta a la escasez de agua?* 1–4. Retrieved from https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/eip-agri_fg_water_and_agriculture_report_summary_2016_es.pdf
- Cajamar. (2017). Chufa. *Cajamar Caja Rural*, 85–109. Retrieved from [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/114762/Pascual y Pascual-Seva'17.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/114762/Pascual_y_Pascual-Seva'17.pdf?sequence=3)
- Casa, A. de la, Ovando, G., Bressanini, L., & Martínez, J. (2013). Aquacrop Model Calibration in Potato and Its Use to Estimate Yield Variability under Field Conditions. *Atmospheric and Climate Sciences*, 03(03), 397–407. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.33041>
- Chaves-Barrantes, N. F., & Gutiérrez-Soto, M. V. (2016). Respuestas al estrés por calor en los cultivos. I. Aspectos moleculares, bioquímicos y fisiológicos. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1), 237. <https://doi.org/10.15517/am.v28i1.21903>
- Codina-Torrella, I., Guamis, B., & Trujillo, A. J. (2015). Characterization and comparison of tiger nuts (*Cyperus esculentus* L.) from different geographical origin: Physico-chemical characteristics and protein fractionation. *Industrial Crops and Products*, 65, 406–414. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2014.11.007>
- Coşkuner, Y., Ercan, R., Karababa, E., & Nazlıcan, A. N. (2002). Physical and chemical properties of chufa (*Cyperus esculentus* L) tubers grown in the Çukurova region of Turkey. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 82(6), 625–631. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1091>
- Durango, Á. G. de. (2019). Agriculture in Spain: water as a key player. *Smart Water Magazine*. Retrieved from <https://smartwatermagazine.com/news/smart-water-magazine/agriculture-spain-water-a-key-player>
- Eyherabide, J. J., Leaden, M. I., & Alonso, S. (2001). Yellow and purple nutsedges survey in the southeastern Buenos Aires Province, Argentina. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 36(1), 205–209. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000100025>
- FAO. (2017). *Water for Sustainable Food and Agriculture: A report produced for the G20 Presidency of Germany*. Retrieved from www.fao.org/publications

- FAO. (2019). El acceso al agua potable para toda la población es esencial para el desarrollo sostenible. Retrieved from <http://www.fao.org/news/story/es/item/1186505/icode/>
- Follak, S., Belz, R., Bohren, C., De Castro, O., Del Guacchio, E., Pascual-Seva, N., ... Essl, F. (2016). Biological flora of Central Europe: *Cyperus esculentus* L. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 23, 33–51. <https://doi.org/10.1016/J.PPEES.2016.09.003>
- Greaves, G. E., & Wang, Y. M. (2016). Assessment of fao aquacrop model for simulating maize growth and productivity under deficit irrigation in a tropical environment. *Water (Switzerland)*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/w8120557>
- Hsiao, T. C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448–459. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0218s>
- IVIA. (2019). Datos meteorológicos. Retrieved from <http://riegos.ivia.es/datos-meteorologicos>
- Li, B. O., Shibulla, T., Yogo, Y., Hara, T., & Yokozawa, M. (2001). Interclonal differences, plasticity and trade-offs of life history traits of *Cyperus esculentus* in relation to water availability. *Plant Species Biology*, 16(3), 193–207. <https://doi.org/10.1046/j.1442-1984.2001.00064.x>
- Lidón, A., Bautista, I., & Lado, L. (2009). *Determinación de la lixiviación de nitrato en el cultivo de chufa*. 39–44.
- MAPA. (2018). Encuesta sobre superficie y rendimiento de cultivos. informe sobre regadíos en España. Retrieved from <http://publicacionesoficiales.boe.es/>
- MAPA. (2019a). *Avance del anuario de estadística 2018*. Retrieved from <https://www.mapa.gob.es/estadistica/pags/anuario/2018-Avance/avance/AvAE18.pdf>
- MAPA. (2019b). Gestión sostenible de regadíos. Retrieved from <https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/>
- Marble, S. C., Prior, S. A., Runion, G. B., & Torbert, H. A. (2015). Control of yellow and purple nutsedge in elevated CO2 environments with glyphosate and halosulfuron. *Frontiers in Plant Science*, 6, 1. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00001>
- Mohdaly, A. A. R. A. A. (2019). Tiger Nut (*Cyperus esculentus* L.) Oil. In M. F. Ramadan (Ed.), *Fruit Oils: Chemistry and Functionality* (pp. 243–269). https://doi.org/10.1007/978-3-030-12473-1_11

- Navarro, T. (2018). Water reuse and desalination in Spain – Challenges and opportunities. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8, jwr2018043. <https://doi.org/10.2166/wrd.2018.043>
- Olivera, N., Brown, O., Gómez, Y., & Guerrero, A. (2016). Evaluation of AquaCrop model in crop dry bean growth simulation. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 25(3), 23–30. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30090.06080>
- Pascual, B., Maroto, J., Lopez-Galarza, S., Alargada, J., & Castell-Zeising, V. (1997). *El cultivo de la chufa. Estudios realizados. Generalitat Valenciana, Conslleria de Agricultura*. Valencia, Espana.
- Pascual, B., Maroto, J. V., López-Galarza, S., San Bautista, A., & Alargada, J. (2000). Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.): Unconventional crop. Studies related to applications and cultivation. *Economic Botany*, 54(4), 439–448. <https://doi.org/10.1007/BF02866543>
- Pascual-Seva, N. (2011). *Estudios agronómicos sobre el cultivo de la chufa (Cyperus esculentus L. var. sativus Boeck.): estrategias de riego, tipo de plantacion, absorcion de nutrientes, y análisis fitoquímico*. Universitat Politècnica de València.
- 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. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(4), 393–398. <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512538>
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., Lopez-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(1), 258–267. <https://doi.org/10.5424/sjar/2013111-3385>
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S. V., Maroto, J. V., & Pascual, B. (2013). “Alboraia” and “Bonrepos”: The first registered Chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) cultivars. *HortScience*, 48(3), 386–389.
- Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J. V., & Pascual, B. (2016). Response of drip-irrigated chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) to different planting configurations: Yield and irrigation water-use efficiency. *Agricultural Water Management*,

170, 140–147. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2016.01.021>

Pascual-Seva, N., San Bautista, A., López-Galarza, S., Maroto, J. V., & Pascual, B. (2018). Influence of different drip irrigation strategies on irrigation water use efficiency on chufa (*Cyperus esculentus* L. var. *sativus* Boeck.) crop. *Agricultural Water Management*, 208, 406–413. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.07.003>

Pawar, G. S., Kale, M. U., & Lokhande, J. N. (2017). Response of AquaCrop Model to Different Irrigation Schedules for Irrigated Cabbage. *Agricultural Research*, 6(1), 73–81. <https://doi.org/10.1007/s40003-016-0238-2>

Pirmoradian, N., & Davatgar, N. (2019). Simulating the effects of climatic fluctuations on rice irrigation water requirement using AquaCrop. *Agricultural Water Management*, 213(June 2018), 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.003>

Pogson, M., Hastings, A., & Smith, P. (2012). Sensitivity of crop model predictions to entire meteorological and soil input datasets highlights vulnerability to drought. *Environmental Modelling & Software*, 29(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2011.10.008>

Raes, D. (2016). AquaCrop Training Handbooks—Book I Understanding AquaCrop. In *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Retrieved from <http://www.fao.org/3/a-i6051e.pdf>

Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438–447. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0140s>

Ramos Herrero, J. (2012). Establecimiento del cultivo In Vitro de la chufa de Valencia (*Cyperus esculentus* L. Var. *sativus* Boeck). Desarrollo de un protocolo de micropropagación. (Universitat Politècnica de València). Retrieved from <http://www.chufadevalencia.org/bd/archivos/archivo427.pdf>

Rogers, H. H., Runion, G. B., Prior, S. A., Price, A. J., Torbert, H. A., & Gjerstad, D. H. (2008). Effects of Elevated Atmospheric CO₂ on Invasive Plants: Comparison of Purple and Yellow Nutsedge (*Cyperus rotundus* L. and *C. esculentus* L.). *Journal of Environmental Quality*, 37, 395–400. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0155>

Saha, D., Marble, C., Boyd, N., & Steed, S. (n.d.). Biology and Management of Yellow (*Cyperus esculentus*) and Purple Nutsedge (*C. rotundus*) in Ornamental Crop Production and

Landscapes 1.

- Sánchez-Zapata, E., Fernández-López, J., & Angel Pérez-Alvarez, J. (2012). Tiger Nut (*Cyperus esculentus*) Commercialization: Health Aspects, Composition, Properties, and Food Applications. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *11*(4), 366–377. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00190.x>
- Santos, B. M., Morales-Payan, J. P., Stall, W. M., Bewick, T. A., & Shilling, D. G. (1997). Effects of shading on the growth of nutsedges (*Cyperus spp.*). *Weed Science*, *45*(5), 670–673. <https://doi.org/10.1017/S0043174500093310>
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). Crop yield response to water. In *FAO Irrigation and Drainage Paper No.66*.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). Aquacrop-the FAO crop model to simulate yield response to water: I. concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, *101*(3), 426–437. <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>
- Stoller, E. W., & Wax, L. M. (1973). Yellow Nutsedge Shoot Emergence and Tuber Longevity. *Weed Science*, *21*(1), 76–81. <https://doi.org/10.1017/S004317450003174X>
- The plant list. (2019). *Cyperus*. Retrieved October 10, 2019, from <http://www.theplantlist.org/1.1/browse/A/Cyperaceae/Cyperus/>
- Timmermans, W., De Jong, F., Rubio, A., De Bruijin, D., & Harsema, H. (2018). Urban Climate Adaptation. Valencia. Retrieved from INNOVA EZINE website: <https://www.urbanclimateadaptation.net/ezine-2-2018/>
- Tombul, M., Akyürek, Z., & Ünal Sorman, A. (2004). Research Note: Determination of soil hydraulic properties using pedotransfer functions in a semi-arid basin, Turkey. *Hydrology and Earth System Sciences*, *8*(6), 1200–1209. <https://doi.org/10.5194/hess-8-1200-2004>
- Tran, T. N. (2018). *Modelling Yield Response To Deficit Irrigation By Aquacrop in the Mekong Delta , Vietnam*. 2017–2018.
- Tsakmakis, I. D., Kokkos, N. P., Gikas, G. D., Pisinaras, V., Hatzigiannakis, E., Arampatzis, G., & Sylaios, G. K. (2019). Evaluation of AquaCrop model simulations of cotton growth under deficit irrigation with an emphasis on root growth and water extraction patterns. *Agricultural Water Management*, *213*, 419–432.

<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.029>

UNESCO. (2019). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás.*

Vanuytrecht, E., Raes, D., & Willems, P. (2014). Global sensitivity analysis of yield output from the water productivity model. *Environmental Modelling & Software*, 51, 323–332. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2013.10.017>

Xu, J., Bai, W., Li, Y., Wang, H., Yang, S., & Wei, Z. (2019). Modeling rice development and field water balance using AquaCrop model under drying-wetting cycle condition in eastern China. *Agricultural Water Management*, 213(November 2018), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.028>

Yusta, C. (2019). Sello denominación de origen, la única garantía de chufa 100% valenciana. Retrieved October 8, 2019, from El español website: https://www.lespanol.com/ciencia/nutricion/20190706/sello-denominacion-origen-unica-garantia-chufa-valenciana/410459682_0.html

Anejo 1.-

Informacion requerida para la simulacion en AquaCrop.

The screenshot displays the AquaCrop software interface, titled "Main menu". It is divided into two main sections: "Environment and Crop" and "Simulation".

Environment and Crop

- Climate:** Climate (ClimaValencia2006-2) - Datos de clima en valencia para cultivo de la chufa por inundacion año 2006-2008
- Crop:** Crop (Chufa2006.CRO) - Growing cycle: Day 1 after sowing: 12 April 2006 - Maturity: 1 November 2006. Information de cultivo de 1 a chufa por riego por inundación Calendar mode
- Management:**
 - Irrigation (D6Chufa.IRR) - Riego por superficie, del cultivo de la chufa año 2006
 - Field (Chufa.MAN) - Manejo 2017 = 2018
- Soil:**
 - Soil profile (D6Ch.SOL) - para año 2006 bajo inundacion 2 perfiles
 - Groundwater (Chufa.GWT) - constant groundwater table to 2017 = 2018

Simulation

- Simulation period: Simulation period: from 1 May 2006 - to 1 November 2006
- Initial conditions: D6Chufa.SW0 - Dato inicial par el año 2006
- Off-season: Simulation period linked to cropping period
- Project: (None) - No specific project
- Field data: (None) - No field observations

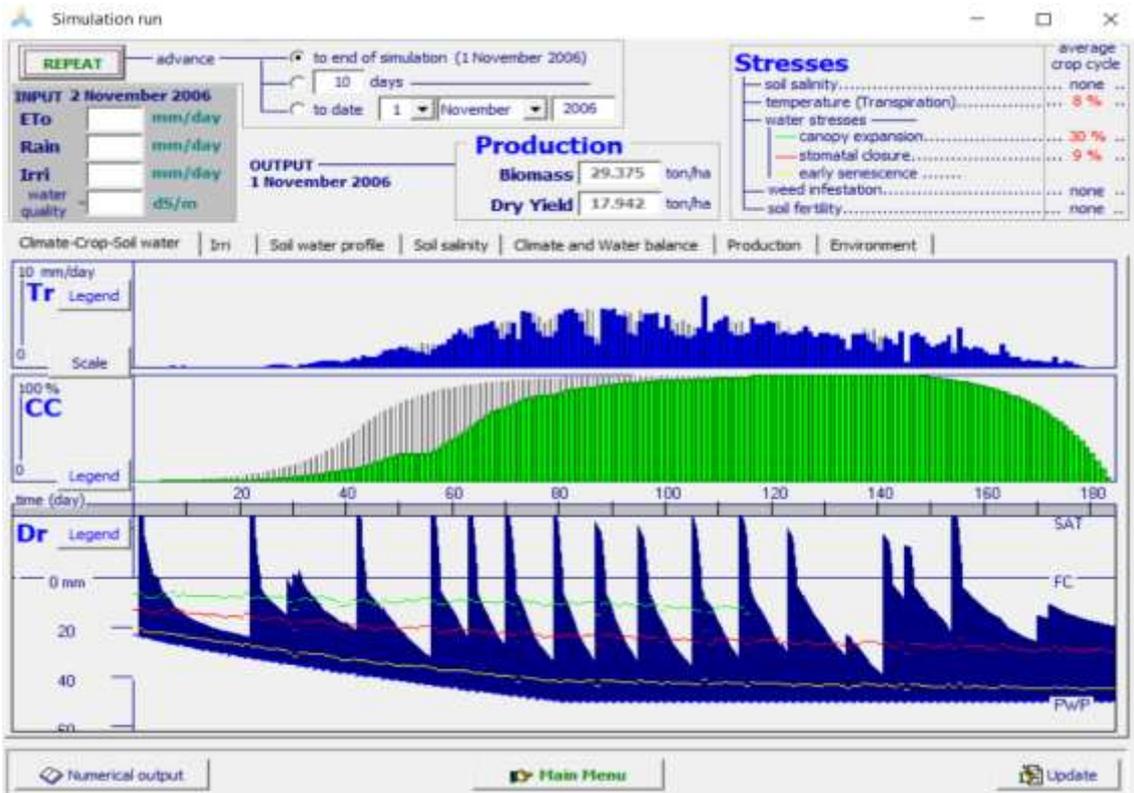
At the bottom, there is a "Run" button with a left-pointing arrow and an "Exit Program" button.

Anejo 2.-

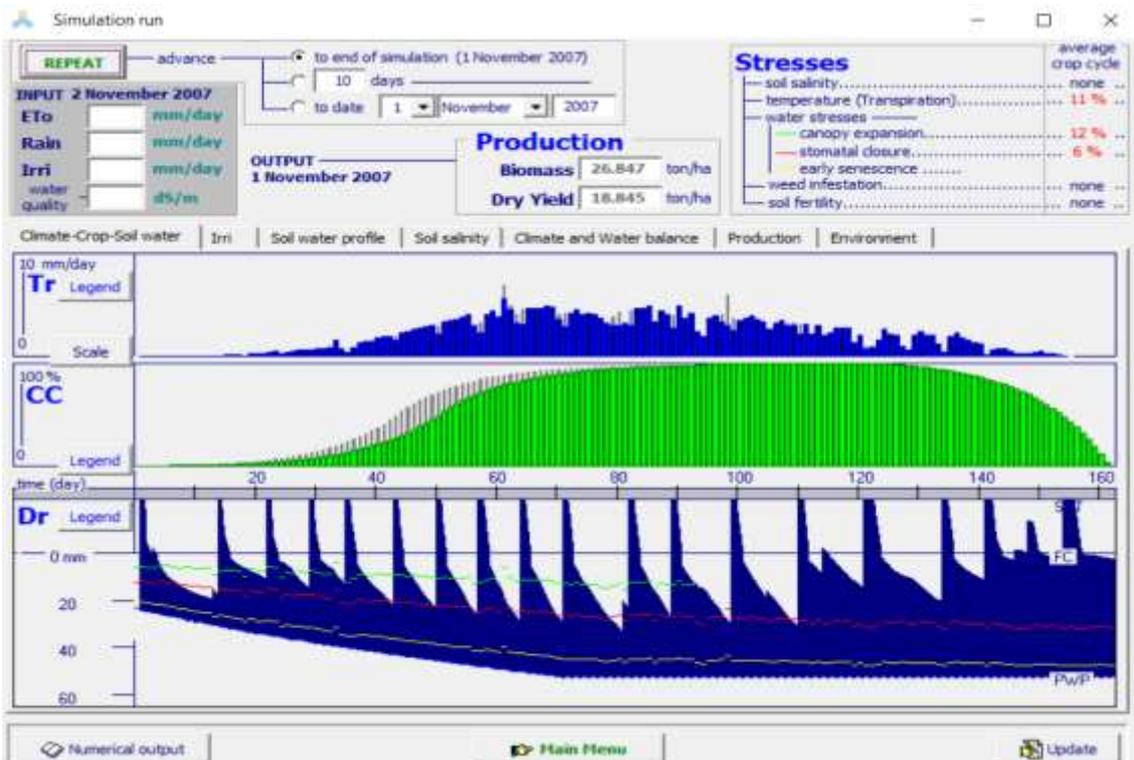
Simulaciones para la calibración y validación del cultivo de la chufa en AquaCrop.

Anejo 2.1. Simulaciones del cultivo de la chufa para riego por surco.

2.1.1. Simulación año 2006

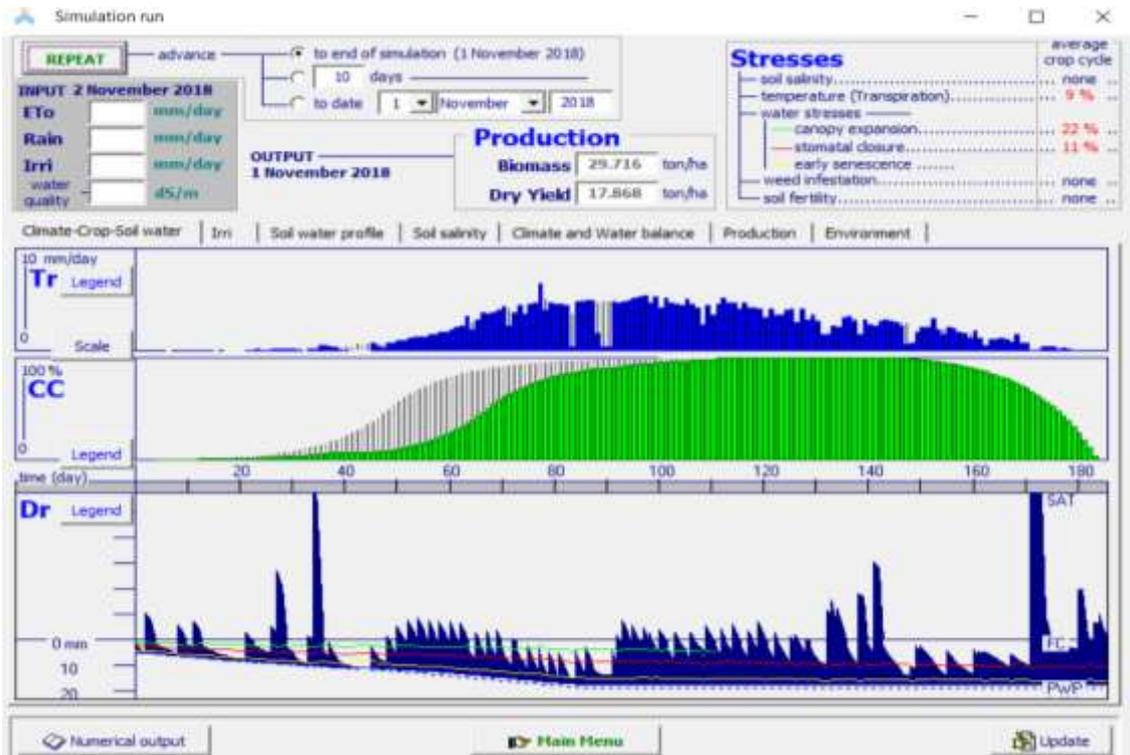


2.1.2. Simulación año 2007



Anejo 2.2. Simulaciones del cultivo de la chufa para riego localizado de alta frecuencia.

2.2.1. Simulación año 2016



2.2.2. Simulación año 2017

