

HACIA EL RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE FRESA EN EL ENTORNO DE DOÑANA



Autor: Jorge García Morillo

Marzo 2015



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

TITULO: *Hacia el riego de precisión en el cultivo de fresa en el entorno de Doñana*

AUTOR: *Jorge García Morillo*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2015
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

HACIA EL RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE FRESA EN EL ENTORNO DE DOÑANA

TESIS DOCTORAL

Presentada por

Jorge García Morillo

Directores

Juan Antonio Rodríguez Díaz

M^a Pilar Montesinos Barrios

Programa doctoral:

Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación eidA3

Biociencias y ciencias agroalimentarias

Mención de Excelencia

Mención Internacional

Marzo 2015

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRÓNOMOS Y
MONTES

DEPARTAMENTO AGRONOMÍA

ÁREA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**HACIA EL RIEGO DE PRECISIÓN EN EL CULTIVO DE
FRESA EN EL ENTORNO DE DOÑANA**

Tesis Doctoral presentada por Jorge García Morillo, en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor Ingeniero Agrónomo dirigida por los Drs. Juan Antonio Rodríguez Díaz y Pilar Montesinos Barrios de la Universidad de Córdoba

Los directores:

El doctorando:

Fdo: Dr. Juan Antonio Rodríguez Díaz

Fdo: Jorge García Morillo



Fdo: Dra. M^a Pilar Montesinos Barrios



Córdoba, Marzo de 2015

*“No quise dormir sin sueños,
y elegí la ilusión que me despierta
el horizonte que me espera,
el proyecto que me llena,
y no la vida vacía de quien no busca nada,
de quien no desea nada más que sobrevivir cada día”*

*“No quise vivir cansado
y elegí el descanso del amigo y del abrazo,
el camino sin prosas, compartido,
y no parar nunca, no dormir nunca.
Elegí avanzar despacio, durante más tiempo,
y llegar más lejos,
habiendo disfrutado del paisaje”.*

Rudyard Kipling

TÍTULO DE LA TESIS:



Hacia el riego de precisión en el cultivo de fresa en el entorno de Doñana

DOCTORANDO: Jorge García Morillo

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

El cultivo de la fresa puede considerarse como un motor económico y generador de riqueza en la provincia de Huelva. De hecho, en la zona se produce más del 95% de toda la fresa nacional la cual es principalmente destinada a los mercados europeos.

No obstante, se trata de un cultivo intensivo para cuya producción se requiere de una gran cantidad de inputs (agua, energía, fertilizantes, plástico y otros) y genera un importante impacto ambiental. Uno de los principales impactos se da en los recursos hídricos, dado que gran parte de las explotaciones toman agua del acuífero que abastece el Parque Natural de Doñana, ocasionando tanto una sobreexplotación del mismo como su contaminación por lixiviados de origen agrícola.

El riego de la fresa es especialmente complejo dado que es un cultivo que se produce bajo plástico en suelos muy arenosos (habitualmente con un contenido de arena superior al 90%), con escasa capacidad de retención de agua. A pesar de esta dificultad, la gestión habitual del riego se basa en la experiencia del agricultor, que no aplica ningún criterio científico para la programación del mismo y generalmente desconoce los volúmenes de agua aplicados. Además, el sistema de riego basado en cintas de polietileno de baja densidad no es el más adecuado para aplicar el agua de una manera uniforme durante toda la campaña agrícola.

Esta Tesis Doctoral supone un importante avance en el estado del conocimiento actual. Partiendo de la identificación de las deficiencias en la gestión, se propone la transición hacia un sistema de riego de precisión, que aplique el volumen de agua necesario en el momento oportuno, que permita reducir los consumos de agua y minimizar las pérdidas de agua por percolación profunda con una alta concentración de fertilizantes disueltos.

La Tesis se estructura en tres grandes bloques. En el primero de ellos se diseña un sistema para evaluación del uso del agua de riego basado en los conceptos de huella hídrica e indicadores de gestión. Esta metodología se aplica en 22 fincas comerciales y se detectan las mejores prácticas, el potencial de mejora y las deficiencias en la gestión.

En el segundo bloque se usa el modelo Hydrus, calibrado en laboratorio con suelo procedente de explotaciones freseras, para el diseño de estrategias de riego. Se diseña una programación del riego basada en la aplicación del agua en pulsos de corta duración, con el fin de satisfacer las necesidades del cultivo pero minimizando las pérdidas por percolación profunda.

Por último, en el tercer bloque, se propone un sistema de riego de precisión basado en el control mediante indicadores de gestión, la aplicación del agua en pulsos óptimos de riego, la elección de material de riego adecuado para las condiciones existentes en la zona y la utilización de sensores disponibles en el mercado (contadores inteligentes, sondas de humedad, etc.) para el control de las variables clave de manejo del riego.

Por todo esto, consideramos que se trata de una Tesis de gran calidad y que aborda un problema real, de actualidad y con gran aplicabilidad al sector. La Tesis ha dado lugar a dos artículos científicos publicados en algunas de las revistas más prestigiosas en este ámbito, ambas en el primer cuartil de sus áreas de conocimiento:

- García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J. A., Camacho, E., & Montesinos, P. (2015). Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. Journal of Cleaner Production. Journal of Cleaner Production 87. 594-602

- García Morillo, J., Martín, M., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J. A., & Montesinos, P. (2015). Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. Agricultural Water Management. doi:10.1016/j.agwat.2014.09.021

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral "Hacia el riego de precisión en el cultivo de fresa en el entorno de Doñana".

Córdoba, 16 de Enero de 2015

Firma de los directores



Fdo. Prof. Dr. Juan Antonio Rodríguez Díaz



Fdo: Prof. Dra. Pilar Montesinos Barrios

Agradecimientos

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una manera u otra han hecho posible este trabajo:

En primer lugar a mis directores, Juan Antonio y Pilar, por el tiempo que me habéis dedicado, por vuestra profesionalidad, rigor científico, seriedad, saber hacer y como no por vuestro apoyo y confianza. También me gustaría incluir en este agradecimiento a Emilio, que ha sido como un director y pieza clave en toda esta aventura. Sois todo un ejemplo para mí.

También me gustaría reconocer la gran labor y el esfuerzo realizado por Manuel, sin su dedicación y ayuda la realización de este trabajo hubiera sido más larga y tediosa.

A las empresas que han financiado parte de la investigación de este trabajo, Landgard, Innocent Drinks, SVZ, Unilever y Coca-Cola. Especialmente a Philip Ackermann, Antonio Vila y Rozanne Davis, por la confianza que habéis depositados en nosotros en todo momento.

A todos y cada uno de los agricultores, cooperativas y técnicos que han colaborado con este trabajo. A pesar de la presión y dificultades existentes, siempre habéis encontrado el momento para poder atendernos, y facilitarnos la información necesaria de manera desinteresada. Esperamos y deseamos que este trabajo sea útil y de interés para el sector y con esta intención se ha escrito.

A mis compañeros de Belmez, Fátima, Pepe, Pedro, Fernando, y Jaime, porque con vosotros he aprendido todo lo que sé sobre mi quehacer docente. Un gran reto que compartimos y del que me siento muy orgulloso. Sin lugar a dudas un gran equipo.

A todos los compañeros y amigos con los que he tenido el placer de compartir la sala de doctorandos, y con los que he compartido tantos buenos momentos, Manuel, Irene, Teresa, Rafa González y Rafa Pérez, entre otros. Espero poder seguir viviendo tantas cosas buenas con todos vosotros.

Y como no podía ser de otra manera, a mis padres Esperanza y Luis, a mis hermanos Araceli y Luis, y la persona con la que comparto mi vida, Carmen Lucía, por vuestro esfuerzo, comprensión, paciencia, y apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí.

Este trabajo tiene algo de cada uno de vosotros. A todos, gracias.

RESUMEN

España es el principal productor de fresa (*Fragaria x ananassa*) fresca de Europa, con una producción cercana a las 300.000 t/año. Esta producción se concentra en la provincia de Huelva, destinándose el 95% de la misma a mercados internacionales cada vez más exigentes con las condiciones y técnicas de producción, que deben ir orientadas a un uso eficiente de los recursos empleados y a minimizar el impacto ambiental derivado de dicha actividad.

El cultivo intensivo de fresa, que se desarrolla en macrotúneles de plástico sobre lomos acolchados, demanda volúmenes importantes de agua para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo así como para labores de preparación del suelo o alomado y riego de apoyo en la fase de plantación. El carácter intensivo del cultivo ha suscitado críticas medioambientales en torno al uso del agua y la gestión que se realiza de ésta, que se han acentuado en parte por la cercanía de la zona productora al Parque Nacional de Doñana, y por otra parte a la compleja Normativa en materia de regadío existente en la zona.

Para poder hacer frente, de forma racional, a las fuertes críticas de que es objeto el sector de la fresa onubense, es necesario realizar un análisis profundo sobre la demanda real de agua de riego del cultivo, así como de la gestión que se realiza de dicho recurso por los agricultores. Dicho análisis permitirá identificar las buenas prácticas agrícolas especialmente en la gestión del riego e identificar las necesidades de mejora, para poder fomentar el uso sostenible del agua en una superficie cultivada que oscila entre las 6000-7000 ha, dependiendo de la campaña.

En el capítulo 3 del presente trabajo se ha caracterizado la demanda de riego en un conjunto de 22 fincas comerciales de fresa en la zona de estudio, durante las tres campañas transcurridas entre 2010 y 2013. Se han estimado las necesidades de riego del cultivo para las condiciones de manejo típicas de la zona. Estas necesidades contemplan tanto el periodo productivo que requiere como término medio una dotación bruta de 5739 m³/ha, como las fases previas de preparación del suelo y plantación, que requiere por término medio 1300 m³/ha. Esto da lugar a unas necesidades totales de riego medias en torno a los 7000 m³/ha, que puede variar según el tipo de suelo y las condiciones climáticas y de cultivo de cada año. Los valores estimados se han contrastado con los

datos de campo registrados en cada una de las fincas que componen la muestra de estudio. El valor medio del volumen total de agua aplicado durante la campaña asciende a 7066 m³/ha, aunque si bien el valor más frecuente oscila entre los 6200 y 6500 m³/ha. Del análisis de los resultados obtenidos se deduce que el comportamiento real del regante está más próximo a las estimaciones realizadas en este estudio que a las propuestas en los distintos Planes Hidrológicos que afectan a la zona y en el Plan especial de ordenación de la corona norte forestal de Doñana, que proponen una dotación media de 4500 m³/ha.

En el capítulo 4, se ha evaluado el uso y manejo del agua a escala de finca mediante la aplicación conjunta del indicador de huella hídrica (HHA_{azul}) y de un indicador sobre el manejo del riego (RIS), con la finalidad de detectar las posibles ineficiencias del proceso. En general, los valores del indicador RIS, están en valores cercanos a 1,2 para un número importante de las fincas de estudio, aunque hay un conjunto de entre 4 y 8 fincas que presentan valores fuera de rango en al menos una de las campañas de estudio, lo que indica que están aplicando más agua de la necesaria por el cultivo. Aunque los valores de RIS obtenidos presumiblemente indican que el manejo del riego es razonable a escala anual, se observa que hay una gran heterogeneidad en el comportamiento de los agricultores, debido fundamentalmente a la inexistencia de una programación del riego basada en criterios técnicos. El valor de HHA_{azul} calculado oscila entre los 90-100 m³/t, lo que indica una alta eficiencia en el uso del agua en el sistema de producción de fresa de Huelva si se compara con el valor de este indicador obtenido en otros países productores de la Unión Europea como es Polonia (592 m³/ha). Aunque el cultivo de fresa tiene una repercusión socio-económica muy importante en la zona, usa entre un 65-70% del volumen total de agua disponible en el ámbito del Plan Especial de ordenación. Por tanto es crítico que las ineficiencias detectadas tanto en el manejo como en el sistema de riego se minimicen para reducir el volumen de agua usada por el cultivo.

En el capítulo 5 se han propuesto medidas de mejora en el manejo del riego, basadas en la determinación del pulso óptimo que evite las pérdidas por percolación en distintas fases de desarrollo del cultivo. Para ello se ha utilizado el modelo de simulación del movimiento del agua en el suelo Hydrus 2D. En la etapa inicial del cultivo que va desde noviembre hasta enero, el criterio de diseño es que la humedad se mantenga en los 10-15 cm más superficiales de suelo. Para los emisores típicos de la

zona con un caudal de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$, esto se consigue con un pulso de riego inicial de 10 minutos de duración que deberá ir incrementándose hasta un máximo de 20 minutos en función del crecimiento de las plantas. En la fase de mediados de campaña, que contempla los meses de febrero y marzo, se ha comprobado que los riegos de un pulso de 30 minutos y dos pulsos de 20 minutos se mantienen en los primeros 25 cm de suelo donde se encuentra la máxima profundidad radicular para este periodo. Las variaciones de humedad en el suelo no se detectan a 40 cm, con lo que se consigue que el agua aplicada contribuya al proceso de evapotranspiración del cultivo. Al final de campaña, en los meses de abril y mayo (excepcionalmente junio), los pulsos de riego aumentan considerablemente debido al aumento de las necesidades del cultivo derivadas del incremento de la demanda evaporativa. En esta etapa, la ET_c registrada equivale aproximadamente a un tiempo de riego de 1 hora de duración, que puede aplicarse en 1 pulso o en varios pulsos de menor duración. De las distintas estrategias definidas, repartir el tiempo de riego en tres pulsos de 20 minutos de duración, nos proporciona un valor de la humedad más estable en el tiempo, manteniéndose en un valor cercano a $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a 12 cm y estando por encima de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ hasta los 40 cm.

Las circunstancias productivas y de mercado de este cultivo demandan un uso eficiente del recurso agua, de forma que cada planta reciba la cantidad que necesita en el momento adecuado. Para ello es necesario disponer de un sistema de riego de precisión que aplique el agua de forma uniforme en toda la parcela, mediante pulsos de riego de duración variable a lo largo de la campaña, de modo que el agua se mantenga en los primeros 40 cm del suelo, reduciendo al máximo la percolación. Para asegurar un uso eficiente del agua en la fresa, se ha diseñado un sistema integral de riego de precisión que está compuesto de tres fases (capítulo 6). En la primera se incluye la monitorización y evaluación del uso del agua de riego en las explotaciones mediante indicadores de gestión, identificando las ineficiencias existentes en el proceso de riego. En la segunda fase, se aplican técnicas de modelización del movimiento del agua en el suelo, para detectar la duración óptima de los pulsos de riego que permita aplicar las necesidades del cultivo. En la tercera etapa se ha diseñado un sistema de riego de precisión formado por elementos disponibles en el mercado que permiten tener un control exhaustivo del agua aplicada.

El sistema de riego de precisión está compuesto por una red de emisores autocompensantes (antisucción y/o antidrenantes), contadores inteligentes para la

medida del volumen de agua, válvula reguladora de presión en cada sector y sondas para la medida de la humedad en el suelo. La operación del sistema de riego de precisión está vinculada a un programador de riego que corrige a escala (diaria o semanal) la duración y el número de pulsos de riego en función de la información climática, de las necesidades de fertilización y de los registros de los sensores de humedad.

Este sistema integral de riego de precisión se ha instalado en una parcela compuesta por cinco túneles de una finca comercial de fresa en la zona de estudio en la campaña 2013-2014 y ha supuesto una reducción en el volumen de agua aplicada durante la fase de riego por goteo de un 45% con respecto al agua usada en el resto de la finca por el agricultor, no habiéndose registrado merma en la producción, ni diferencias significativas en cuanto a la incidencia de plagas y enfermedades.

ABSTRACT

Spain has the largest concentration of strawberry (*Fragaria x ananassa*) producers in Europe. The annual yield, close to 300000 t is concentrated in Huelva province in the South west and is mainly devoted to the international markets (more than 95%) which demands high quality strawberries produced under sustainable conditions aimed to an efficient use of the resources used and to prevent the environmental impact derived from this activity.

The intensive cultivation of strawberry, carried out on beds covered by black plastic inside polytunnels, demands large amounts of freshwater to satisfy the crop water requirements as well as other agronomic practices such as soil preparation and during plantation. In spite of the fact that strawberry farming generates wealth in the region, it is identified as a water intensive activity due to its high dependency on water resources. Therefore there is a concern regarding the environmental sustainability of the crop production in the area, mainly related to water abstraction. This concern is further aggravated by the circumstance that the production area is located in the vicinity of the Doñana National Park, which is a high environmentally sensitive area, as well as the complex irrigation regulation that there exists.

Facing the smear campaigns being carried out against the strawberry sector in Huelva, in a rational way, requires developing a deep analysis about the current crop water demand, as well as the management that has been carried out by farmers. This analysis will allow identifying the good agricultural practices, mainly in irrigation management and the need's for improvement in the process with the aim to promoting a sustainable use of water in the cropped area, that vary from 6000 to 7000 ha.

In chapter 3, irrigation water has been analysed in a set of 22 farms during the seasons from 2010 to 2013. Crop water requirements for the particular conditions of the crop in the study area have been calculated. These requirements include the theoretical water needs that amount to an average value of 5739 m³/ha, and the volume of water for soil preparation and plantation that 1300 m³/ha require on average. The total volume of water required is around 7000 m³/ha, depending on the soil texture, and the weather and crop conditions during the season. Crop water needs values calculated have been compared with the real crop water demand recorded at farm scale in every farm that comprise the sample. The average total volume of water applied comes to 7066 m³/ha,

although the most frequent value ranges from 6200 to 6500 m³/ha. It is important to point out that the irrigator behavior is closer to the estimation obtained in this research than the water allocations proposed in the different Hydrological plan that affects the study area (4500 m³/ha).

In chapter four a joint evaluation of crop water footprint applied (WFA_{blue}) and the relative irrigation supply (RIS) is proposed as a diagnostic tool to identify hotspots of the irrigation process in the strawberry production. In general, when the applied water is compared with the irrigation needs, the average value of RIS is 1,2 which is within the right interval of 1-1,2. However, there are six to eight farms that have values out of the range which means that are using more water than needed. It is also important to highlight that there is a wide variability within farms, mainly due to the lack of any irrigation scheduling based on technical criteria. The average value of WFA_{blue} has been estimated in 90-100 m³/t. This value points out the high water productivity of this strawberry production in Huelva if it is compared with the same indicator of any other producers of the European Union such as Poland (592 m³/ha). Although strawberry cultivation returns huge economics and social benefits to the region turning it into a strategic sector, the crop demands between 65 to 70% of the total volume of water available for irrigation in the study area. Therefore, it is critical that the inefficiencies detected in the irrigation process (water management and irrigation system) were minimized in order to reduce the volume of water used for strawberry cultivation.

In chapter five, improvement measures for irrigation management, has been proposed. The proposal is focused on the definition of the effective irrigation pulse duration to avoid the loss of water by percolation in the different crop stages. The numerical model Hydrus 2D has been used to define how to apply crop water requirements. At the beginning of the season (November to January), the plant roots are very shallow and therefore the maximum rooting depth is within the upper 10-15 cm of the soil. During this period, irrigation pulses should start with 10 minutes that have to be increased to a maximum of 20 minutes for the typical 5 l.h⁻¹.m discharge emitter. If the pulse is longer, the wetting pattern generates percolation. In the middle of the season, February and March, the roots reach deeper soil layers around 25 cm. Then, if the irrigation target is to maintain the humidity in the upper 25 cm of the soil, the maximum duration of the irrigation pulses (5 l.h⁻¹.m) should be increased gradually from 20 to 40 minutes. It has been simulated a 30 minutes pulse and two pulses of 20 minutes to check

that the wetting pattern generated is within the upper 25 cm of the soil. During the final stage of the season (from April to June), the irrigation time should be increased from 40 to a maximum of 60 minutes to satisfy the crop water demand maintaining the soil moisture in the upper 40 cm. From the different irrigation strategies simulated, the three pulses of 20 minutes simulation has shown a more stable value of soil moisture within the roots zone. During the peak season, when the required irrigation time is greater than the optimum pulse duration, several pulses a day should be given to satisfy crop water needs.

The production circumstances and marketing of this particular crop, demand an efficient use of water. To achieve the goal, an irrigation system has to be designed with the prevailing wisdom of meeting the needs of the crop timely and as efficiently and as spatially uniformly as possible. Aiming at the efficient water use in the strawberry production, a comprehensive drip irrigation system has been designed, according to precision irrigation principles. The system has been developed based on a three stages methodology. Firstly, the irrigation process carried out by farmers has been assessed to identify inefficiencies in the irrigation system and management. Their performances have been evaluated using performance indicators. The second phase is focused on an accurate irrigation scheduling based in precise crop water requirements estimation and the optimum irrigation pulse design. Finally, the precision irrigation system has been developed supported by new technologies that allow an exhaustive control of the amount of water applied and also gives valuable information in the decision making process.

The most appropriate drip irrigation emitters (self-compensating emitters) for the particular conditions of the strawberry production in the study area have been selected. The rest of the on-farm irrigation technologies required to control the system have been integrated, including pressure regulation valves, soil water sensors, smart water meters, programmers, electro-valves and weather station.

This precision irrigation system has been installed in a commercial strawberry farm during the irrigation season 2013-2014. The volume of water applied to meet crop water demand during de crop season has been 45% less that the volume of water applied in the farm. There isn't any significant difference between the yield in the test plot and the farm, and even in the quality of the fruit.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PERSPECTIVAS DEL REGADÍO EN ESPAÑA	1
1.2. SITUACIÓN DEL REGADÍO EN ANDALUCÍA	3
1.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR FRESERO ONUBENSE	5
1.3.1. Contexto actual del sector de la fresa en Huelva	5
1.3.2. Marco Normativo	7
1.4. PLAN ESPECIAL DE ORDENACIÓN DE LA CORONA NORTE FORESTAL DE DOÑANA	9
1.4.1. Ámbito de Plan Especial	9
1.4.2. Objetivos del Plan Especial	11
1.4.3. El espacio agrícola	12
1.4.4. Dotación de agua para riego	13
2. DESCRIPCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	15
2.1. NORMATIVA Y PROGRAMA DE DOCTORADO	15
2.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA QUE SE ENCUADRA LA TESIS	15
2.3. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	17
2.3.1. Objetivos	17
2.3.2. Estructura	17
2.4. ¿CÓMO SURGE ESTA INVESTIGACIÓN Y CÓMO SE HA FINANCIADO?	21
2.5. PUBLICACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS	22
3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRESA	25
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	25
3.1.1. Diseño experimental y dimensión del estudio	25
3.1.2. El medio físico	27
3.1.3. Análisis climático de la zona	28
3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FRESA	30
3.2.1. Proceso de registro de datos de campo	30
3.2.2. Manejo del cultivo y productividad	31
3.3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE FRESA	32
3.3.1. Cálculo de la evapotranspiración potencial (ET _o) bajo plástico	33

3.3.2. Coeficientes de cultivo (K_c)	35
3.3.3. K_c de FAO	35
3.3.4. Adaptación de K_c a las condiciones de manejo del cultivo de fresa en Huelva	36
3.3.5. Cálculo de las necesidades teóricas del cultivo	40
3.4. NECESIDADES TOTALES DE AGUA DE RIEGO DEL CULTIVO DE FRESA	42
3.4.1. Fase de alomado	42
3.4.2. Fase de aspersión en plantación	44
3.4.3. Fase de desarrollo del cultivo	45
3.4.4. Necesidades totales de agua en el cultivo de fresa	46
3.5. DATOS DE CONSUMO REALES DE AGUA EN LA ZONA	47
3.6. CONCLUSIONES	50
4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO EN CULTIVOS DE ALTO VALOR.	53
4.1. INTRODUCCIÓN	53
4.2. METODOLOGÍA	56
4.2.1. Propuesta de Indicadores sobre uso y manejo del riego.	56
4.2.2. Consideraciones sobre el cálculo de la ET_c	61
4.3. RESULTADOS	61
4.4. DISCUSIÓN	67
4.4.1. Relación entre los indicadores propuestos	67
4.4.2. Relación entre el cultivo de fresa y el agua disponible	71
4.4.3. Principales ineficiencias detectadas en el proceso de riego y propuestas de mejora.	74
4.5. CONCLUSIONES	76
5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO	79
5.1. INTRODUCCIÓN	79
5.2. METODOLOGÍA	81
5.2.1. Descripción del movimiento de agua en el suelo en Hydrus 2D	81
5.2.2. Parámetros hidráulicos	83
5.2.3. Funciones de Edafotransferencia	84
5.2.4. Parámetros de absorción de agua	85
5.2.5. Evaporación y Transpiración	86
5.2.6. Calibración del modelo	88
5.2.7. Evaluación de la validez del modelo	90

5.2.8. Aplicación de las técnicas de simulación para la programación del riego en fresa	92
5.2.9. Simulación numérica con Hydrus.	93
5.3. RESULTADOS	97
5.3.1. Calibración del modelo mediante medidas del bulbo húmedo en urna	97
5.3.2. Evaluación de la validez del modelo	101
5.3.3. Resultados de las simulaciones	103
5.3.3.1. Etapa de inicio de campaña	103
5.3.3.2. Etapa de mediados de campaña	104
5.3.3.3. Etapa de final de campaña.	110
5.4. CONCLUSIONES	120
6. EL RIEGO DE PRECISIÓN	123
6.1. INTRODUCCIÓN	123
6.2. FASE 1: INDICADORES DE GESTIÓN COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL RIEGO	127
6.3. FASE 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO	128
6.4. FASE 3. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	135
6.5. EXPERIENCIA PILOTO DE RIEGO DE PRECISIÓN EN FINCA COMERCIAL	139
6.6. CONCLUSIONES	146
7. CONCLUSIONES	149
7.1. LÍNEAS DE TRABAJO ACTUALES Y FUTURAS	152
7 bis. CONCLUSIONS	155
7.1. bis. CURRENT AND FUTURE RESEARCH	158
8. BIBLIOGRAFÍA	161
9. ANEJOS	177

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Límites del ámbito del Plan y distribución de los distintos usos del suelo en la zona de estudio (Fuente, Junta de Andalucía ,2014)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.1. Relaciones entre los capítulos de la tesis.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.1. Localización de las fincas de estudio, el ámbito del Parque Nacional y del acuífero.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.2. Esquema Hidrogeológico Acuífero 27 (Atlas hidrogeológico de Andalucía, 1998).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.3. Precipitación acumulada septiembre-junio y promedio (2001-2013)</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3.4. ETo acumulada septiembre-junio y promedio (2001-2013)</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.1. Valores de RIS, agua aplicada en alomado y plantación y riego para satisfacer las necesidades del cultivo</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.2. Relación entre los indicadores propuestos</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.3. Relación entre los indicadores de huella hídrica, adecuación del riego y la producción.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.1. Urna para la medida de bulbo húmedo y elementos auxiliares para la instalación del gotero</i>	<i>88</i>
<i>Figura 5.2. Condiciones de contorno y malla generada</i>	<i>89</i>
<i>Figura 5.3. Geometría, malla y condiciones de contorno generadas para simulación.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 5.4. Distribución de raíces en el periodo de final de campaña</i>	<i>94</i>
<i>Figura 5.5. Simulación con el modelo de un pulso de riego y de la redistribución de la humedad.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 5.6. Modelo Rosetta Hydrus 2D/3D.....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.7. Bulbo húmedo generado con gotero de caudal 1 L.h⁻¹ obtenido en Hydrus y en urna.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 5.8. Bulbo húmedo generado con gotero de caudal 0,6 L.h⁻¹ obtenido en Hydrus y en urna.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.9. Relación entre los valores observados en urna y la predicción del modelo para ancho y profundidad de bulbo en gotero de 1 l.h⁻¹ y 0,6 l.h⁻¹</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.10. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm³/cm³) al final del último evento de riego para un pulso de 10, 20 y 40 minutos.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 5.11. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para los pulsos de 10, 20 y 40 minutos de duración.....</i>	<i>106</i>
<i>Figura 5.12. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm³/cm³) al final del último evento de riego para un pulso de 30 minutos, dos pulsos de 20 minutos y un pulso de 1 hora.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 5.13. Contenido de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para un pulso de 30 minutos, dos pulsos de 20 minutos y un pulso de 1 hora</i>	<i>109</i>
<i>Figura 5.14. Volumen de agua aplicada diaria en las estrategias 1, 2 y 3.</i>	<i>111</i>
<i>Figura 5.15. Volumen de agua aplicada en las estrategias 3, 4 y 5.....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.16. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm³/cm³) al final del último evento de riego para las estrategias 1, 2 y 3.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 5.17. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para las estrategias 1, 2 y 3.</i>	<i>114</i>

<i>Figura 5.18. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3) a 12, 25 y 40 cm al final del último evento de riego para las estrategias 4, 5 y 6.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5.19. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm^3/cm^3) a 12, 25 y 40 cm para estrategias 4,5 y 6.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 5.20. Distancia radial de bulbo húmedo para todos los riegos simulados.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 5.21. Distancia vertical (profundidad) de bulbo húmedo para todos los riegos simulados.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 6.1. Etapas que componen el sistema integral de riego de precisión.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 6.2. Electroválvula, contador y programador de riego.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 6.3. Esquema del sistema de riego de precisión (Fuente: Martín Arroyo et al., 2014).....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 6.4. Esquema de la metodología para la programación del riego (Fuente: Martín Arroyo, et al., 2014).....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 6.5. Estación climática y sensores de humedad instalados en campo</i>	<i>137</i>
<i>Figura 6.6. Esquema de bulbo húmedo y sensores de humedad instalados en lomo.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 6.7. Estado de un túnel con riego de precisión y túnel testigo en enero.</i>	<i>142</i>

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1. Superficie Agrícola en Andalucía</i>	3
<i>Tabla 3.1. Superficie total de fresa monitorizada (ha)</i>	26
<i>Tabla 3.2. Valores promedio mensuales de transmisividad por campaña</i>	34
<i>Tabla 3.3. Kc inicial, medio y final para el cultivo de fresa (FAO, 2006)</i>	36
<i>Tabla 3.4. Ciclo del cultivo de fresa en Huelva (WWF, 2009)</i>	38
<i>Tabla 3.5. Kc para el cultivo de fresa (fuente: WWF)</i>	39
<i>Tabla 3.6. Necesidades teóricas del cultivo de fresa para las campañas comprendidas entre 2010-2013 (Campaña de 1 Octubre – 31 de Mayo)</i>	41
<i>Tabla 3.7. Volumen total de agua promedio que requiere el cultivo de fresa para las campañas de estudio.</i>	46
<i>Tabla 3.8. Valores registrados de agua aplicada en alomado, plantación, desarrollo del cultivo y agua total aplicada.</i>	49
<i>Tabla 4.1. Resumen análisis estadístico de los indicadores propuestos para el conjunto de fincas en las tres campañas de estudio.</i>	65
<i>Tabla 4.2. Balance de agua disponible y requerida por los cultivos</i>	71
<i>Tabla 5.1. Parámetros hidráulicos de suelo</i>	97
<i>Tabla 5.2. Índices de eficiencia de la calibración del modelo</i>	101
<i>Tabla 6.1. Características de los emisores evaluados en laboratorio y Rendimiento de aplicación (%) (Martín Arroyo, 2013a)</i>	131

ÍNDICE DE ANEJOS

<i>Anejo 9.1. Encuadre general del Ámbito de Doñana (POTAD de Doñana, 2003)</i>	177
<i>Anejo 9.2. Límites del Territorio del Ámbito de Doñana y espacios naturales protegidos (POTAD de Doñana, 2003)</i>	178
<i>Anejo 9.3. Nota de prensa acusando al sector fresero onubense de “despilfarro de agua” (El País, 2010)</i>	179
<i>Anejo 9.4. Nota de prensa en medio Británico acusando a la fresa de Huelva de secar el acuífero de Doñana(The Independent, 2012)</i>	180
<i>Anejo 9.5. Hoja de cálculo para el registro y estimación del volumen de agua aplicado al cultivo (hoja 1)</i>	181
<i>Anejo 9.6. Hoja de cálculo para el registro de datos de campo de riego (hoja 2)</i>	182
<i>Tabla 9.7. Variedades por finca y campaña. Fechas promedio de plantación, cobertura con plástica y fin de campaña (hoja 1)</i>	183
<i>Anejo 9.8. Variedades por finca y campaña. Fechas promedio de plantación, cobertura con plástica y fin de campaña (hoja 2)</i>	184
<i>Anejo 9.9. Caudal emisores de riego, densidad de plantación y producción por finca para cada campaña de estudio</i>	185
<i>Anejo 9.10. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2010-2011.</i>	186
<i>Anejo 9.11. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2011-2012.</i>	187
<i>Anejo 9.12. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2012-2013.</i>	188
<i>Anejo 9.13. Artículo publicado en Journal of Cleaner Production</i>	189
<i>Anejo 9.14. Artículo publicado en Agricultural Water Management</i>	190



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN GENERAL

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PERSPECTIVAS DEL REGADÍO EN ESPAÑA

La estrategia mundial para garantizar el abastecimiento de alimentos a la actual población de más de siete mil millones de personas, y que podría alcanzar los ocho mil quinientos millones en el año 2030, contempla inevitablemente un aumento paralelo de la producción agraria, confiándose gran parte de este esfuerzo al regadío. Teniendo en cuenta que, salvo excepciones, las nuevas transformaciones son cada vez más difíciles y costosas, el gran reto reside en mejorar la eficiencia y rendimiento productivo e hídrico de los regadíos existentes.

En España, al igual que ocurre en el resto de países de la cuenca mediterránea, el agua es un recurso escaso, frágil e irregularmente distribuido. A la escasez de precipitaciones, la elevada evapotranspiración, la alta variabilidad espacial y temporal de las lluvias, la desigual distribución de los recursos hídricos y la frecuencia de las sequías, se unen problemas como son el aumento de la presión sobre los recursos hídricos, el déficit creciente que sufren algunas cuencas y la salinización o contaminación de acuíferos, convirtiendo en una labor compleja la satisfacción, en cantidad y calidad, de las necesidades de todos los usos del agua.

Ante esta realidad, el desarrollo de políticas de gestión del agua que promuevan el uso eficiente del recurso es imprescindible y prioritario, particularmente en aquellos sectores donde se producen las mayores demandas de agua, como son los abastecimientos urbanos, la industria y sobre todo el regadío.

La agricultura junto con la ganadería son los principales usuarios del agua en España con un 75% del total de la demanda consuntiva, según los datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en 2008. Aunque la tendencia actual del consumo de agua destinada al regadío es decreciente, como consecuencia de una política activa de modernización de regadíos (MAARM, 2006), se prevé un aumento de la demanda de agua para uso doméstico e industrial debido al aumento de la población en áreas urbanas así como para usos medioambientales.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El regadío está presente, con diferentes intensidades, en el 96% de los municipios españoles, lo que significa la totalidad de las comarcas agrarias españolas y consume algo más del 68% de los recursos hídricos. La aportación de las producciones de las tierras en regadío a la producción final agrícola supone más del 50% de ésta, mientras que la superficie ocupada por las mismas sólo representa el 15% de la superficie agrícola útil (MAARM, 2006).

El significado económico del regadío, a nivel de las explotaciones agrarias, se manifiesta en el hecho de que una hectárea regada produce seis veces más que una de secano y genera una renta cuatro veces superior, relación que se incrementa especialmente en el caso de los cultivos de invernadero y bajo plástico. Además resulta muy significativa la aportación del regadío para el desarrollo rural: mantiene la población, genera empleo, mejora la renta de los agricultores, diversifica la estructura ocupacional y vertebra el territorio (Plan Nacional de Regadíos, 2008).

Sin embargo, ha surgido recientemente la necesidad de incluir criterios medioambientales en la gestión y regulación de los recursos hídricos, buscando la protección de los mismos ante la contaminación y la conservación del medioambiente y de la biodiversidad, y que emanan de distintas Normas Comunitarias. Estas normas son el resultado de un cambio de sensibilidad colectivo que demanda modificaciones en la tradicional percepción del agua como factor productivo, y su asimilación como parte integrante de un ecosistema vivo, haciendo compatible su uso y gestión con el respeto al ciclo hidrológico natural, al que el mundo del regadío no puede ni debe ser ajeno (Estrategia Nacional Regadíos, 2015).

Esta nueva percepción de la relación entre agricultura y medioambiente queda patente en la reforma de la Política Agraria Común de noviembre de 2008, en la que se reconoce la preocupación por los nuevos retos de la agricultura: biodiversidad, cambio climático, gestión del agua, energías renovables e innovación, concediéndoles un trato preferencial dentro de la política de desarrollo rural. Se pone de manifiesto la necesidad de conseguir una agricultura cada vez más sostenible y respetuosa con el medioambiente.

Es por todo esto que la agricultura de regadío actual se encuentra en una situación de especial dificultad caracterizada por el incremento de costes de producción,

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

estabilización o descenso de los precios de mercado y una creciente presión respecto a los impactos ambientales que producen. Esta situación está obligando a los agricultores a buscar formas de maximizar la rentabilidad de los cultivos haciendo un uso eficiente de los recursos en aras de una sostenibilidad integral (socioeconómica y ambiental) de dicha actividad agrícola.

1.2. SITUACIÓN DEL REGADÍO EN ANDALUCÍA

La agricultura de regadío en Andalucía es uno de los sectores estratégicos para su desarrollo económico y social. Según la Agenda del regadío Andaluz horizonte 2015 (Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, 2011) En la actualidad la superficie regable asciende a 1.176.588 ha y la superficie regada es de 1.106.394 ha. Esto supone que en la actualidad se encuentra en regadío un 23% de la superficie agrícola andaluza (4.845.000 ha), y un 33% del regadío existente en España que asciende a 3.316.296 ha (tabla 1.1).

Tabla 1.1. Superficie Agrícola en Andalucía

	SECANO		REGADÍO		GANADERÍA		TOTAL	
	UD	%	UD	%	UD	%	UD	%
Superficie cultivada (Miles ha)	2315	67,7	1106	32,3			3421	100
Producción vegetal (Millones €)	2144	24,2	6657	75,9			8771	100
Superficie Agraria Útil (Miles ha)	3669	75,7	1176	24,3			4845	100
Producción final agraria (Millones €)	2427	23,3	6657	63,8	1347	12,9	10431	100
Empleo (miles UTA)	71608	23,5	192657	63,3	39980	13,1	304245	100
Ayudas PAC (Millones €)	922	55,1	676	40,4	76	4,5	1674	100

Fuente: Agenda del Regadío Andaluz Horizonte 2015.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

De la tabla 1 se desprende la importancia del regadío en Andalucía, que representa un 76% de la producción final agrícola y un 63% de la producción final agraria.

El mayor aumento de la superficie de regadío corresponde a las dos últimas décadas, con un incremento del 65%, concentrándose sobre todo en las áreas más dinámicas de la agricultura andaluza (invernaderos de Almería, la zona de la fresa y cítricos de Huelva, y la zona de olivar de Jaén), siendo en su mayoría de iniciativa privada.

Respecto al origen del agua, la mayor parte de la superficie regada (669.679 ha) utiliza agua de origen superficial (60,8 %), 423.153 ha utilizan agua de origen subterráneo (38,2 %), 10.979 ha utilizan agua reutilizada (1,0 %) y 2584 ha utilizan agua desalada (0,2 %). El crecimiento del regadío en los últimos 10 años ha estado sustentado en el agua de origen subterráneo, que ha duplicado su uso pasando de 208.616 ha en 1997 a 423.513 ha en 2008.

En cuanto al sistema de riego, el riego localizado ha duplicado su superficie, pasando de 304.106 ha en 1997 a 708.059 ha, ocupando fundamentalmente los regadíos del olivar y de los cultivos más intensivos como son la fresa, cítricos, hortofrutícolas e invernaderos. El riego por superficie ha dejado de ser mayoritario con una reducción desde 1997 a 2008 de un 31 %, aunque sigue siendo el más utilizado en los riegos del arroz y en el Bajo Guadalquivir en la provincia de Sevilla. El sistema de riego por aspersión ocupa una superficie considerable en la provincia de Cádiz y riegos asociados al río Genil en las provincias de Sevilla y Cádiz.

Respecto a la distribución de cultivos, el principal cultivo es el olivar que ocupa un 46 % del total de la superficie regada. Los cereales de invierno (8 %), semi-intensivos (8 %), hortícolas (8 %) y cítricos (7 %) le siguen en superficie ocupada.

El uso total de agua para regadío en Andalucía es de 3942 hm³, que supone una dotación media de 3563 m³/ha. La dotación es mayor en los regadíos con cultivos más intensivos como invernaderos y hortícolas (5000-7000 m³/ha) y en el Valle del Guadalquivir en el arroz (14000 m³/ha) y en los cultivos extensivos como maíz, algodón y remolacha (5000-8000 m³/ha).

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El mayor margen bruto por unidad de superficie corresponde a los regadíos intensivos de Almería (14013 €/ha), seguido de los regadíos intensivos del litoral Atlántico (8457 €/ha) y los cítricos y subtropicales de Cádiz, Málaga y Granada (6273 €/ha). De forma similar, el margen bruto en función del uso del agua, presenta los mayores valores en los regadíos intensivos de Almería (2,85 €/m³), los intensivos del litoral atlántico (2,42 €/m³) y los cítricos y subtropicales del litoral (1,35 €/m³) (Agenda del regadío Andaluz, 2011).

El empleo generado por los regadíos en Andalucía es de 192.657 UTA (1 UTA es igual a 240 jornales) (0,17 UTA/ha) y supone un 63,3 % del empleo generado por la actividad agraria. En cuanto a los jornales producidos por el regadío, son mayores en los regadíos intensivos de Almería (0,83 UTA/ha), los intensivos del litoral atlántico (0,52 UTA/ha) y los cítricos y subtropicales del litoral de Cádiz, Málaga y Granada (0,30 UTA/ha) (Agenda del regadío Andaluz, 2011).

Además de la influencia directa del regadío en la creación directa de empleo, también produce un claro impulso en la industria agroalimentaria, uno de los sectores más importante y estratégicos de Andalucía. Por ello, es frecuente que las zonas con fuerte presencia de regadío tengan un alto nivel de empleo en el sector agrario y en la industria agroalimentaria, que se sitúa entre el 20 % y el 40 % de la población ocupada total.

1.3. SITUACIÓN ACTUAL DEL SECTOR FRESERO ONUBENSE

1.3.1. Contexto actual del sector de la fresa en Huelva

El sector de la fresa en Huelva y de los cultivos de regadío intensivos en general, genera aproximadamente unos 12000 puestos de trabajo de empleo directo en cooperativas y centros de acopio y expedición, que suponen el 17,5% de la población total de la provincia onubense, y más de 50000 empleos temporales en las explotaciones. Otro dato que avala la importancia de la producción de frutas frescas es que en 2012 representó el 48% del valor de la producción agraria comercializada de la

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

provincia, y un 4,7% del total de Andalucía. En la campaña 2012/2013 la facturación de fresa de Huelva superó los 300 millones de euros (Junta de Andalucía, 2014).

La superficie de cultivo de la fresa de la provincia de Huelva supone aproximadamente el 90% de la superficie de fresa de Andalucía y en torno al 86% de la producción nacional, lo que supone que Huelva se haya convertido en la primera región productora de fresa del mundo (Fundación Doñana 21, 2006, Junta de Andalucía 2011).

La vocación de esta producción es claramente exportadora. Además de abastecer el mercado nacional, Huelva suministra fresas a toda Europa, destacando países como Francia, Alemania, Italia, Reino Unido, Portugal, Bélgica o Países Bajos entre otros.

La elevada productividad de los invernaderos de fresa genera ingresos brutos muy importantes, aunque variables según las condiciones de mercado y muy especialmente condicionados a la capacidad de producir fresa en los primeros meses del año, cuando los precios son más altos. Considerando una producción entre 40 y 50 t/ha, y un precio medio de 1 €/kg, se puede cifrar en torno a 40000 o 50000 €/ha de ingresos brutos. Los costes de explotación se sitúan en torno a 37000 €/ha, según datos de la Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, a partir de información suministrada por empresarios freseros de Huelva en 2006. Por tanto el margen bruto de explotación se puede establecer entre 3000 y 13000 €/ha como rango orientativo, y en el que influyen tanto variables climáticas y de manejo del cultivo como las de mercado que condicionan las ventas (Junta de Andalucía, 2014).

Por estos motivos principalmente, el cultivo de fresa es considerado como el cultivo emergente con mayor repercusión económica y social de la zona occidental de Huelva. Los elevados beneficios que genera y la gran cantidad de mano de obra que requiere han provocado el aumento de la superficie cultivada por encima de las previsiones más optimistas.

Sin embargo, esta actividad agraria intensiva, a parte de sus incuestionables beneficios económicos y sociales ha sido una de las actividades que más problemas ambientales ha generado debido al modelo intensivo que se ha implantado durante las tres últimas décadas: cubiertas de plástico, regadíos, aporte de fitosanitarios y fertilizantes químicos, entre otros.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Las críticas medioambientales suscitadas se agravan debido a la proximidad de la zona productora con el Parque Nacional y Natural de Doñana, que es un espacio natural protegido de incalculable valor ecológico, con una superficie protegida de más de 130.000 ha. El valor universal de Doñana se refleja en su nominación como Reserva de la Biosfera de UNESCO, Zona RAMSAR, Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA), entre otras (Junta de Andalucía, 2009). El encuadre general y los límites del ámbito se recogen en el Plan de Ordenación del Territorio del Ámbito de Doñana (POTAD de Doñana, 2003) que se pueden consultar en el anexo 9.1 y 9.2.

De todas las relaciones que se pueden establecer entre el cultivo de fresa y el espacio natural protegido, es sin duda, la derivada del uso del agua, la más estrecha y problemática. El agua es el elemento básico de los ecosistemas (marismas, lagunas, etc...) y de la agricultura de regadío (fresas, arrozales, frutos rojos, etc...) en Doñana. Esto genera importantes tensiones y problemas ambientales, especialmente en épocas de mayor escasez del recurso, que afectan muy negativamente al sector de la producción y comercialización de fresas de Huelva y a la economía local.

1.3.2. Marco Normativo

El cultivo de fresa, además del agua de riego empleada para satisfacer las necesidades hídricas, requiere cantidades significativas de agua para otras labores como la preparación del terreno o alomado y el proceso de plantación.

La Agenda del Regadío Andaluz Horizonte 2015 (Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, 2011) ha establecido las necesidades netas de riego para el cultivo de fresa en 4474 m³/ha y año (sólo para el periodo productivo), aunque si bien señala que este dato se ha determinado para el sistema de microtúnel (actualmente en desuso) y está pendiente de ajustarse a la actual situación general del cultivo. Hay que señalar que este dato es de necesidades netas, si se tiene en cuenta la eficiencia del sistema obtendríamos las necesidades brutas de agua, sin considerar el consumo de agua derivado de la preparación del suelo o alomado y el riego en plantación.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (PHCHG, 2013) se recogen las dotaciones netas y brutas establecidas para los diversos cultivos de la Demarcación, entre los que se encuentran el cultivo de fresa del subsistema de explotación Almonte-Marismas. Para el cultivo de fresa se establece una dotación neta de 4500 m³/ha, para una superficie regable registrada de 3808 ha. La eficiencia global establecida por el Plan para un cultivo de riego localizado se ha fijado en 0,86 con lo que la dotación bruta ascendería a 5232 m³/ha.

En la misma línea, el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras, (PHDHTOP, 2012) establece las dotaciones netas para los principales cultivos presentes en la Demarcación, obtenidas a partir de las indicadas en la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH, 2011) y de diversos estudios procedentes de la Consejería de Agricultura y Pesca, según recoge dicho Plan. En el Plan se ha establecido la dotación neta para el cultivo de fresa en 4500 m³/ha. Se asume que la eficiencia media de riego es del 0,9, debido principalmente a la tecnificación de sus cultivos y los sistemas de riego localizado. Esto supone una dotación bruta de 5000 m³/ha y año.

Así mismo, existen una serie de Planes, Programas y Estrategias, que se encuentran en vigor o en proceso de desarrollo por las distintas administraciones en materia de gestión del agua, ordenación del territorio y biodiversidad, que hay que tener en consideración puesto que pueden tener incidencia o influir en la planificación Hidrológica.

Dentro de dichos Planes cabe destacar por su importancia el “Plan especial de ordenación de las zonas de regadío ubicadas al norte de la corona forestal de Doñana” en los términos municipales de Almonte, Bonares, Lucena del Puerto, Moguer y Rociana del Condado en Huelva. Dicho Plan fue elaborado inicialmente por la Consejería de Obras Públicas y Vivienda de la Junta de Andalucía (Junta de Andalucía, 2011) y aprobado definitivamente en Diciembre de 2014 por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (Junta de Andalucía, 2014).

1.4. PLAN ESPECIAL DE ORDENACIÓN DE LA CORONA NORTE FORESTAL DE DOÑANA

1.4.1. Ámbito de Plan Especial

En la formulación de Plan especial se señala como ámbito del Plan “las zonas de cultivos en regadío para la zona comprendida al norte de la corona forestal, dentro de los términos municipales de Almonte, Bonares, Lucena del Puerto, Moguer y Rociana del Condado”.

Se establece el ámbito con los límites territoriales que a continuación se describen y que comprende una superficie total de 64.457 ha (Figura 1.1):

- El límite norte se corresponde con los límites norte de los términos municipales de Almonte, Bonares, Lucena del Puerto, Moguer y Rociana del Condado.
- El límite sur coincide con el límite norte del Parque Natural de Doñana y límite sur del LIC denominado “Dehesa del Estero y Montes de Moguer”, excluyendo la zona de las Malvinas, dado que es un ámbito ordenado con suministro de agua superficial.
- El límite oriental viene establecido por la carretera A-483, incorporando suelos ubicados al este correspondientes al Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas (PTAAMM), regadíos al norte del Rocío y montes propios del Rocío.
- El límite occidental coincide con el límite del término municipal de Moguer.
- Por último, se incluyen los terrenos del Parque Nacional de Doñana correspondiente al arroyo de La Rocina declarada recientemente como Zona Especial de Conservación de Doñana.

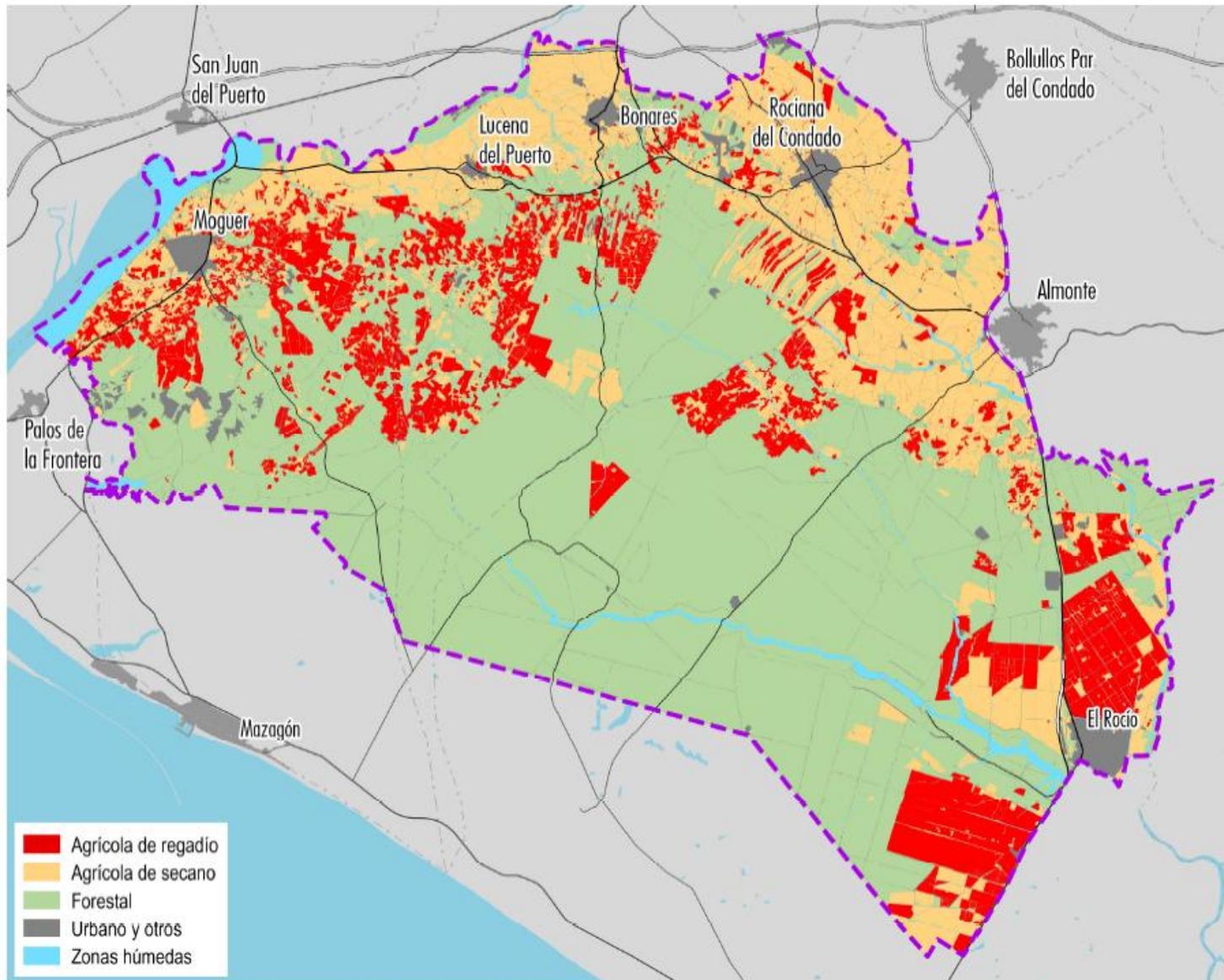


Figura 1.1. Límites del ámbito del Plan y distribución de los distintos usos del suelo en la zona de estudio (Fuente, Junta de Andalucía ,2014)

1.4.2. Objetivos del Plan Especial

El objetivo general del Plan Especial tal y cómo se recoge en dicho documento se centra en:

“Compatibilizar las oportunidades de este territorio, especialmente en materia de agricultura y turismo, con la protección de los excepcionales valores naturales de Doñana y el uso racional del agua”.

Del objetivo general se derivan un conjunto de objetivos pormenorizados de entre los que podemos destacar:

- Ordenar el uso y distribución racional de los recursos hídricos.
- Controlar la repercusión de la actividad agrícola sobre los recursos hídricos (especialmente sobre el acuífero 27).
- Ordenar la actividad agrícola, de forma que se garanticen la preservación de los recursos naturales y el desarrollo sostenible.

Así pues, las exigencias más urgentes y estructurales en el Plan se dirigen hacia la ordenación de la agricultura de regadío, buscando un modelo de desarrollo compatible con los recursos naturales, y poniendo el acento máximo en la no afección a los ecosistemas forestales, al sistema hídrico natural y en particular al acuífero 27 conocido así por la antigua nomenclatura del Instituto Geológico y Minero (IGME) o acuífero “Almonte-Marismas”. Actualmente el acuífero comprende dos Unidades Hidrogeológicas en función de la cuenca vertiente: UH 05.51 en la Cuenca del Guadaquivir y UH 04.14 en la Cuenca Atlántica Andaluza.

El sector agrícola tiene que buscar en primera instancia su compatibilidad con el espacio natural. Debe realizar una gestión eficiente de los recursos y fundamentalmente de los recursos hídricos, gran parte de ellos de origen subterráneo, así como la implementación de prácticas respetuosas con el medio.

1.4.3. El espacio agrícola

La superficie agrícola en el ámbito de estudio representa un 34% del total. Los cultivos se reparten aproximadamente entre un 42% el régimen regadío y un 58% el de secano. Así, el secano ocupa 12513 ha, localizándose mayoritariamente al norte del ámbito, mientras el regadío ocupa 9104 ha, y se sitúa en un cinturón no continuo y de anchura variable, en contacto con los terrenos forestales.

El rasgo principal de la agricultura tradicional es su escasa evolución y diversificación, lo que redundará también en su escasa competitividad, lo que favorece el proceso de reconversión, generalmente al regadío.

A partir de la década de los 80 (tras el referente del Plan de Transformación Almonte-Marismas), tiene lugar la aparición de la “nueva agricultura” o también denominados cultivos de primor (fresón y otras frutas del bosque) que imprime un auge importante a la economía en el ámbito.

En la actualidad, el ámbito de Doñana cuenta con el 60% de la producción de fresa de la provincia de Huelva, seguida de la Costa Occidental con el 36%, lo que supone una indudable posición de liderazgo.

La superficie regable asciende a 9104,1 ha de las que aproximadamente unas 6008,3 ha corresponden a herbáceos intensivos como hortícolas, fresón y otros pequeños frutos, siendo complicado conocer con exactitud la superficie dedicada al cultivo de fresa en el ámbito del citado plan. El resto corresponden a cítricos (1728,6 ha), frutales no cítricos (879,1 ha) y otros riegos (488,1 ha). Merecen destacarse los cultivos herbáceos intensivos o cultivos bajo plástico (66%) y los cítricos (19%) sumando ambos más del 80% de la superficie total de regadío.

Los municipios con mayor superficie de fresa son Almonte y Moguer, que cuentan respectivamente con el 55% y 32% de la producción del total de los municipios que forman el ámbito. Le sigue Lucena del Puerto con el 11% de la producción del ámbito de Doñana. Almonte presenta aproximadamente una superficie dedicada a cultivos herbáceos intensivos de 2527 ha y Moguer de 1357 ha, seguidas de Lucena del Puerto con 1041 ha y con menor superficie Bonares (612 ha) y Rociana (180 ha) (Junta de Andalucía, 2011).

1.4.4. Dotación de agua para riego

El Plan Especial de Ordenación de las zonas de regadío ubicadas al norte de la corona forestal de Doñana (Decreto ley 174/2014 de 16 de Diciembre) establece una dotación máxima de 4500 m³/ha y año, asegurando que con dicha dotación y un manejo adecuado del riego se pueden alcanzar las máximas producciones (Junta de Andalucía, 2014).

Para ello se basa en un estudio realizado por Instituto de Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA) en 2008 (citado en dicho Plan Especial), en el que se pone de manifiesto que se podrían alcanzar las máximas producciones en el cultivo con dotaciones netas medias de 4000 m³/ha, considerando el ahorro de agua derivado de la utilización del agua de lluvia (aproximadamente 200 m³/ha) y la inclusión del gasto de unos 500 m³/ha para labores de preparación del terreno.

Aunque no se dispone de datos oficiales y rigurosos sobre la demanda real de agua de riego de este cultivo considerando las condiciones locales, el sector de la fresa ha manifestado que las demandas reales son claramente superiores a las establecidas por los diversos organismos competentes, y así se recoge en el Plan Especial (Junta de Andalucía, 2014).

Según dicho Plan, existe una diferente apreciación sobre la dotación de agua necesaria para el cultivo de fresa entre los organismos públicos y los agricultores, circunstancia que explica atendiendo a que las explotaciones, en su mayoría, no utilizan las mejores técnicas disponibles que aseguren un uso racional y eficiente del agua, minimizando el volumen utilizado así como las pérdidas por percolación.

Por tanto no existe un criterio unánime en cuanto a la dotación del agua necesaria para el cultivo de fresa. Las cifras manejadas por los organismos públicos se acercan a una media de 4500 m³/ha/año en condiciones óptimas, siendo superiores las demandadas por los agricultores en la situación actual (Junta de Andalucía, 2014).

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

En el Plan se identifica la necesidad de continuar con programas de investigación en técnicas y en controles de la producción bajo el marco de las buenas prácticas agrícolas, así como difundir dicha información y dar asistencia al regante, con el objetivo, entre otros de disminuir las necesidades de agua, haciendo un uso más eficiente del recurso. Concluye que gran parte de los conflictos territoriales por el espacio y por el recurso hídrico en Doñana implican para el sector agrícola una serie de desventajas importantes para poder consolidar los productos hortofrutícolas como productos sostenibles. Es importante, mencionar los cada vez más importantes requerimientos en cuanto a calidad ambiental que se exigen a los productores por parte de los compradores de destino.

Debido a la compleja situación normativa en materia de regadío en que se encuentra el sector fresero onubense, así como su cercanía al Parque Nacional de Doñana, el sector ha sido objeto de numerosas críticas y campañas de desprestigio en los principales países de destino tales como Francia, Alemania y Suiza. En estos países se ha reprochado al sector de la fresa de hacer un uso irracional del recurso, calificando la situación como de “despilfarro de agua”, situación que repercute muy negativamente en la importación de fresa procedente de Huelva en los mercados internacionales.

Para poder hacer frente, de forma racional, a las fuertes críticas de que es objeto el sector de la fresa onubense, es necesario realizar un análisis profundo sobre la demanda real de agua de riego del cultivo, así como de la gestión que se realiza de dicho recurso por los agricultores. Dicho análisis permitirá identificar las buenas prácticas agrícolas especialmente en la gestión del riego e identificar las necesidades de mejora, para poder fomentar el uso sostenible del agua en una superficie cultivada que oscila entre las 6000-7000 ha dependiendo de la campaña.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

2. DESCRIPCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

2.1. NORMATIVA Y PROGRAMA DE DOCTORADO

La presente tesis se enmarca dentro de la Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación eidA3 de la Universidad de Córdoba y dentro del marco normativo del Programa de Doctorado RD 1393/2007.

Más en concreto se encuentra dentro del Programa de Doctorado denominado Biociencias y ciencias agroalimentarias, que está centrado en áreas agroalimentarias, muy relevantes del entorno económico y social de Andalucía, y que tiene Mención hacia la Excelencia (eidA3, RD 1393/2007).

La tesis opta a la obtención de la Mención Internacional para la cual el doctorando ha realizado una estancia de investigación en el “Water Science Institute” de la Universidad de Cranfield en Reino Unido, de tres meses de duración entre el 1 de junio y el 31 de agosto de 2012. Además se adjunta el informe de dos expertos internacionales que avalan la investigación.

La tesis se ha escrito en español, y está compuesta por 6 capítulos más conclusiones, bibliografía y anejos. El primer capítulo es una Introducción General y el segundo capítulo presenta los objetivos y la estructura de la tesis. En los capítulos del 3 al 6 se presenta la investigación desarrollada para la consecución del objetivo general. El resumen y conclusiones generales están escritas en castellano y en inglés.

2.2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN EN LA QUE SE ENCUADRA LA TESIS

El grupo de investigación en el que se ha desarrollado la presente tesis y al que pertenecen ambos directores y el doctorando, ha realizado múltiples trabajos en la línea de optimización y diseño de redes de riego a la demanda que se han complementado en paralelo con trabajos destinados a caracterizar la demanda de los cultivos y a mejorar la gestión del agua y los sistemas de riego.

2. DESCRIPCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

En esta línea, se ha trabajado de forma intensiva en la mejora de la gestión del agua en Comunidades de Regantes mediante indicadores de gestión y aplicación de las técnicas de benchmarking (mejora de procesos de producción mediante la adopción de prácticas que han llevado a otros a ser más eficientes en el uso de los recursos). Se ha desarrollado toda la metodología necesaria y una ingente labor de campo, lo que ha llevado al grupo a ser considerado como uno de los referentes en cuanto al ahorro y uso eficiente del agua de riego en agricultura, mediante la mejora en el uso beneficioso y sostenible del recurso (Rodríguez Díaz et al., 2003).

Una herramienta de apoyo a la gestión sostenible del recurso es la huella hídrica. Montesinos et al., (2011) aplican este concepto como herramienta para la planificación hidrológica a escala de cuenca y evalúan la huella hídrica de los principales cultivos de la cuenca del Guadalquivir, entre ellos el olivar. En dicho artículo se pone de manifiesto que la escala de trabajo es clave a la hora de utilizar los conceptos de huella hídrica, teniendo que ir a escala de parcela para poder identificar las ineficiencias en el proceso de riego y proponer medidas de mejora.

En esta línea se enmarca la investigación desarrollada en la presente tesis. Debido a la presión creciente en la zona de estudio sobre los recursos hídricos disponibles para los distintos usos, se ha propuesto llevar a cabo un estudio de detalle, a escala de finca, sobre el proceso de riego en el cultivo de la fresa mediante la aplicación de indicadores de gestión y técnicas de comparación o benchmarking. La aplicación de estas técnicas nos permitirá identificar las buenas prácticas en el riego, detectando las ineficiencias existentes y la consiguiente propuesta de mejoras para reducirlas, de modo que agregando los ahorros derivados del incremento de la eficiencia a escala de parcela se obtengan valores realistas de uso de agua a escalas mayores (comarca, sistema de explotación o demarcación hidrográfica).

2.3. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

2.3.1. Objetivos

El objetivo general de este trabajo es establecer las bases del riego de precisión en el cultivo de la fresa en el entorno de Doñana a partir de la aplicación de indicadores de gestión y técnicas de benchmarking, para identificar las ineficiencias existentes en el uso del agua y proponer medidas de mejora en el proceso de riego que permita hacer un uso más sostenible del recurso en el territorio objeto de estudio.

Las bases del riego de precisión para el cultivo intensivo de fresa se han basado en el estudio in situ de 22 fincas comerciales de fresa, durante las tres campañas comprendidas entre 2010-2013.

2.3.2. Estructura

El objetivo general se ha logrado mediante la consecución de cuatro objetivos parciales que se definen, y que se desarrollan en los capítulos del 3 al 6 de esta tesis y que se describen brevemente a continuación.

CAPÍTULO 3. Caracterización de la demanda de riego en el cultivo de fresa.

Se han seleccionado 22 fincas de estudio, ubicadas en las tres principales zonas productoras de la provincia de Huelva, aunque si bien la mayoría están en la zona de Almonte y Moguer, situadas en el entorno de Doñana. Todas las fincas de estudio se han caracterizado mediante un protocolo exhaustivo de recogida de información. Se ha elaborado un sistema de registro de datos adaptado a las características de cada explotación que ha permitido determinar el consumo de agua durante cada campaña de riego, tanto en la preparación del suelo, como en plantación y desarrollo del cultivo. En este capítulo se aborda el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo, que presenta la particularidad de desarrollar parte de su ciclo bajo plástico en el interior de un macrotúnel.

CAPÍTULO 4. Vinculación de la huella hídrica con el manejo del riego en cultivos de alto valor.

En este capítulo se desarrolla y aplica una metodología para la evaluación conjunta del uso y manejo del agua mediante el análisis combinado de indicadores tales como la huella hídrica del cultivo con indicadores de adecuación del riego. Ambos tipos de índices, aplicados de manera conjunta, se utilizan como herramienta de diagnóstico del proceso de riego en la producción de cultivos, facilitando la identificación de ineficiencias y la propuesta de medidas de mejora del proceso. Se han aplicado técnicas comparativas o de benchmarking con el objetivo de identificar las fincas que hacen un uso más eficiente de los recursos hídricos (Rodríguez Díaz, 2003). Este análisis también permite identificar las fincas con consumos más elevados, y los aspectos a mejorar para aumentar la eficiencia en el uso del agua de las mismas.

CAPÍTULO 5. Desarrollo de estrategias para la mejora del manejo del riego.

Para proponer medidas de mejora en el manejo de agua de riego, es necesario conocer con detalle el movimiento del agua en el suelo. Los suelos presentes en la zona de estudio son muy arenosos, habitualmente con más de un 85% de arena, aunque si bien el perfil del suelo en profundidad puede variar de unos a otros. Por esto, es frecuente que el riego se aplique en pulsos, aunque la duración de los mismos está basada únicamente en la experiencia del agricultor. Para analizar el movimiento del agua en estos suelos se ha calibrado el modelo Hydrus (Šimůnek, *et al.*, 2007) y se ha utilizado para simular el movimiento de agua en un suelo de textura arenosa típico del cultivo de fresa en la zona de estudio. Estas simulaciones han permitido definir la duración óptima de los pulsos de riego en dichas condiciones, o pulso efectivo de riego, que minimiza las pérdidas por percolación.

CAPÍTULO 6. El riego de precisión

El principal objetivo de este capítulo es diseñar un sistema integral de riego para el cultivo de fresa en las condiciones particulares de la zona de estudio. Este sistema se ha diseñado teniendo en cuenta los principios fundamentales del riego de precisión, es decir, aplicar la cantidad exacta de agua, de la manera más precisa posible, en el momento oportuno y con una eficiencia alta en la aplicación del recurso. El sistema se

2. DESCRIPCIÓN, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

apoya tanto en herramientas tradicionales (goteros, programador del riego, reguladores de presión) como nuevas tecnologías (sensores de humedad, estación climática, electroválvulas, contador inteligente) que faciliten la interpretación de la información en el proceso de toma de decisiones y el control del sistema de riego. Este capítulo tiene un carácter integrador y de conexión entre los contenidos desarrollados en los capítulos previos de la presente tesis.

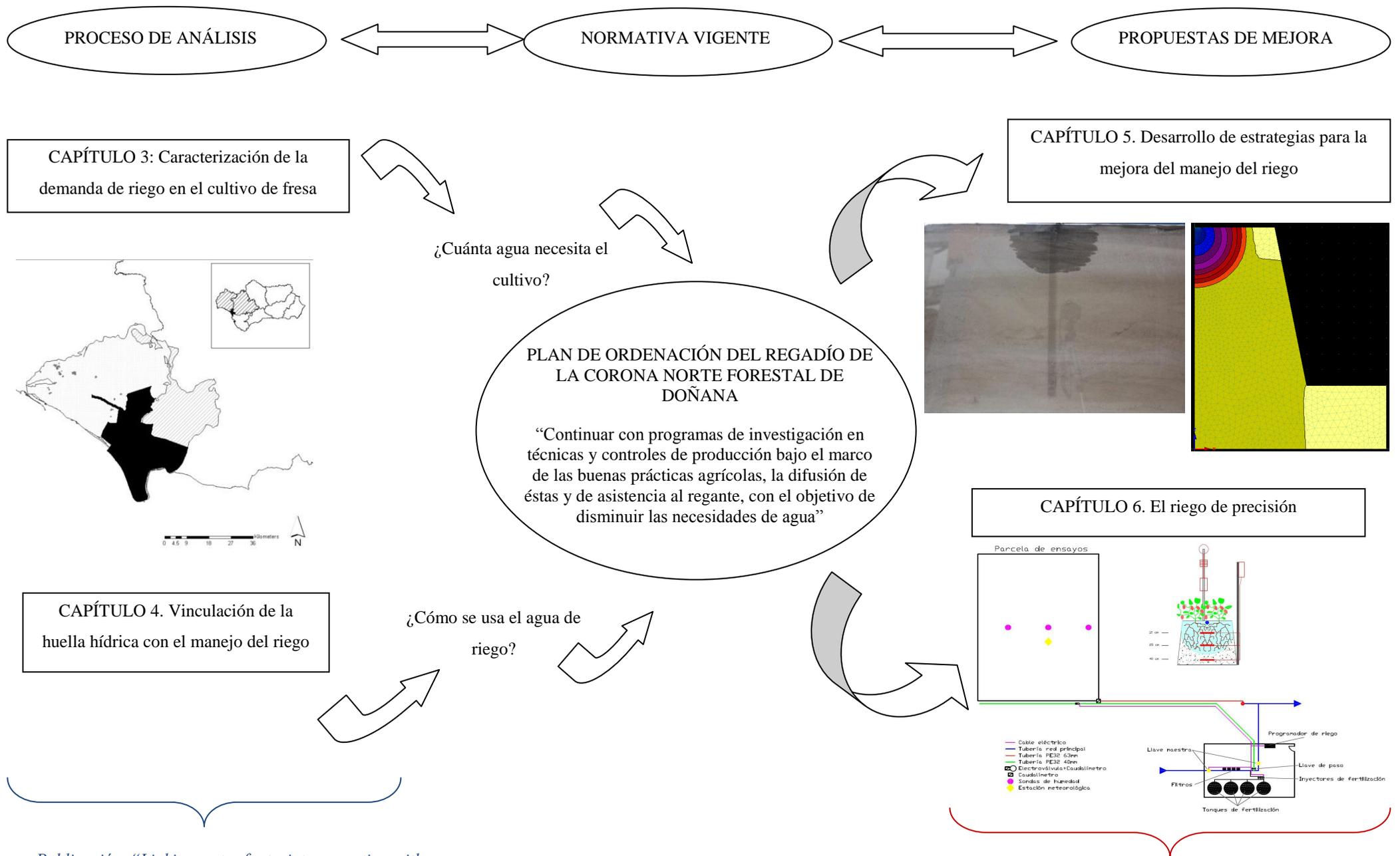
CAPÍTULOS 7, 8 Y 9. *Conclusiones, bibliografía y anejos.*

Aunque cada capítulo tiene un apartado de conclusiones, se ha incluido en el capítulo 7 las conclusiones generales derivadas de la tesis. En este capítulo se han incluido las líneas de trabajo presente y futuras derivadas del estudio que se ha desarrollado.

El capítulo 8 recoge la bibliografía consultada para el desarrollo de la investigación que se presenta. Aquí se recogen las referencias bibliográficas de todos los capítulos que componen la tesis.

Se ha incluido un último capítulo de Anejos, capítulo 9, en el que se presentan datos e información relevante que se cita en el documento pero que no procede presentarla en su capítulo. En este apartado están recogidos los anejos de todos los capítulos de la tesis.

La figura 2.1 ilustra la relación existente entre los distintos capítulos de la tesis así como las publicaciones a que han dado lugar.



Publicación. “Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production*. (Anejo 9.9)

Figura 2.1. Relaciones entre los capítulos de la tesis

Publicación. “Towards precision irrigation for intensive strawberry cultivation”. *Agricultural Water Management*. (Anejo 9.10)

2.4. ¿CÓMO SURGE ESTA INVESTIGACIÓN Y CÓMO SE HA FINANCIADO?

Durante la campaña 2009-2010 el sector de la fresa onubense fue objeto de fuertes críticas y campañas de desprestigio en países como Alemania, Francia, y Suiza entre otros. Varias asociaciones conservacionistas criticaron las malas condiciones laborales de los temporeros, así como de “despilfarro” de agua y el empleo abusivo de pesticidas. Estas declaraciones repercutieron muy negativamente en el consumo de fresa onubense en los mercados internacionales, que descendió hasta en un 11% en países como Francia (El País 2010, ver Anejo 9.3; The Independent, 2012, ver Anejo 9.4).

Ante esta situación, varias empresas importadoras de fresa que operan en Huelva y que suministran a los principales mercados europeos, se unieron para financiar un estudio que les permitiera hacer un análisis detallado de la situación, para conocer cuáles eran los consumos de agua de la explotaciones, tener datos objetivos, y ver que había de cierto de las críticas surgidas, principalmente en relación al uso del agua.

La tesis se ha desarrollado con financiación privada mediante dos contratos de prestación de servicios firmados entre el Área de Ingeniería Hidráulica del Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba y diversas empresas internacionales:

Contrato 1º. Título del proyecto: “Assessment of optimum irrigation water use in Strawberry Production in Huelva”.

Este contrato se firmó con la empresa Langard, con sede en Alemania y que suministra a los principales supermercados alemanes. Se firmó para las campañas 2010-2011 y 2011-2012 aunque posteriormente se renovó el contrato para ampliar el estudio a la campaña 2012-2013. El objeto del estudio era llevar a cabo un estudio sobre la caracterización de la demanda de riego del cultivo y el manejo que hacen de éste los agricultores. Para ello se seleccionaron un conjunto de 17 fincas proveedoras de fresa onubense para esta empresa de distribución alemana.

Contrato 2º. Título del proyecto: “Reducing de hydrological impact of imported Strawberries - Huelva Region of Spain”

Este contrato de colaboración se firmó con las empresas Innocent Drinks (sede en Reino Unido), SVZ (sede en Holanda) y Unilever (multinacional del sector agroalimentario) para llevar cabo un estudio durante la campaña 2010-2011. Al finalizar la campaña el contrato se extendió a la campaña 2011-2012. En este estudio se seleccionaron 5 fincas comerciales de fresa, de entre el conjunto de agricultores que proveían a dichas empresas. El objetivo del estudio era similar al anterior.

Entre las empresas que participaban en ambos proyectos se firmó un convenio de colaboración para compartir los datos de todas las fincas de estudio y así poder obtener datos más relevantes sobre una muestra de estudio que ascendía a unas 500 ha lo que representa un 8-9% de la superficie total de fresa de la provincia de Huelva.

2.5. PUBLICACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

Los resultados de la presente tesis han dado lugar a los siguientes artículos:

➤ Artículos indexados:

- ✓ **García Morillo, J.**, Rodríguez Díaz J.A., Camacho, E., Montesinos, P. 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production* 87. 594-602
- ✓ **García Morillo, J.**, Martín, M., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A., Montesinos, P. 2015. Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. *Agricultural Water Management*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.021>.

- Artículos publicados en revistas nacionales:
 - ✓ **García Morillo, J.**, Martín, M., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A., Montesinos, P. Hacia el riego de precisión en el cultivo de la fresa. Horticultura, Junio 2014. Pags. 28-32.
 - ✓ **García Morillo, J.**, Montesinos, P., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A. Hacia la sostenibilidad en el cultivo de fresa: demanda real de riego y posibilidades de mejora. Agricultura, Junio 2012. Pags 436-440.

- También se han presentado los resultados de esta investigación en diversos Congresos Nacionales:
 - ✓ **García Morillo, J.**, Montesinos Barrios, P., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho, E, Hess, T. Hacia la sostenibilidad en el cultivo de la fresa: Demanda real de riego y posibilidades de mejora. XXX Congreso Nacional de Riegos. Albacete, 12 al 14 de junio 2012.
 - ✓ **García Morillo, J.** Hacia la sostenibilidad en el cultivo de fresa. Demanda real de riego y posibilidades de mejora. I Congreso Científico de Investigadores en Formación en Agroalimentación. Creando Redes. II Congreso Científico de Investigadores en Formación de la Universidad de Córdoba. Córdoba, 8 y 9 de mayo de 2012.
 - ✓ **García Morillo, J.**, Martín, M., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A., Montesinos, P. Hacia el riego de precisión en el cultivo de la fresa. XXXI Congreso Nacional de Riegos. Orihuela 18-20 de Junio de 2013.
 - ✓ **García Morillo, J.**, Martín, M., Camacho, E., Rodríguez, J.A., Montesinos, P. Hacia el riego de precisión el cultivo de la fresa. I Symposium Nacional de Ingeniería Hortícola: La Agromótica en Horticultura. Orihuela, 20 de Febrero de 2014.

Esta comunicación oral ha obtenido la **mención de excelencia** al mejor trabajo presentado en las Sesiones Técnicas II: Automatización y Control para la Gestión de Recursos Hídricos en Horticultura celebrado en la Escuela Politécnica Superior de Orihuela de la Universidad Miguel Hernández de Elche del 20 al 22 de febrero de 2014.

- Esas comunicaciones se han presentado además en varias Jornadas Técnicas:
 - ✓ Jornada Técnica: “Los frutos rojos y las nuevas experiencias del sector agrario y agroalimentario”, celebrada el día 1 de Diciembre de 2011 en la sede de la Fundación Doñana 21.
 - ✓ XVIII Jornadas Técnicas Agrícolas “Villa de Almonte” celebradas en este Municipio durante los días 22 y 23 de febrero de 2012.
 - ✓ Jornada Técnica: La Sostenibilidad del cultivo de la fresa a debate: Dotación de riego, demanda real del cultivo y posibilidades de mejora. Organizado por FERAGUA y el grupo de investigación en el que se ha desarrollado la tesis, en la Comunidad de Regantes de Palos de la Frontera el 23 de Enero de 2013.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRESA

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO EN EL CULTIVO DE FRESA

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1.1. Diseño experimental y dimensión del estudio

Se han seleccionado 22 fincas comerciales dedicadas al cultivo de fresa y ubicadas en el entorno de Doñana para su estudio durante las campañas 2010-11, 2011-12 y 2012-2013 (figura 2.1).

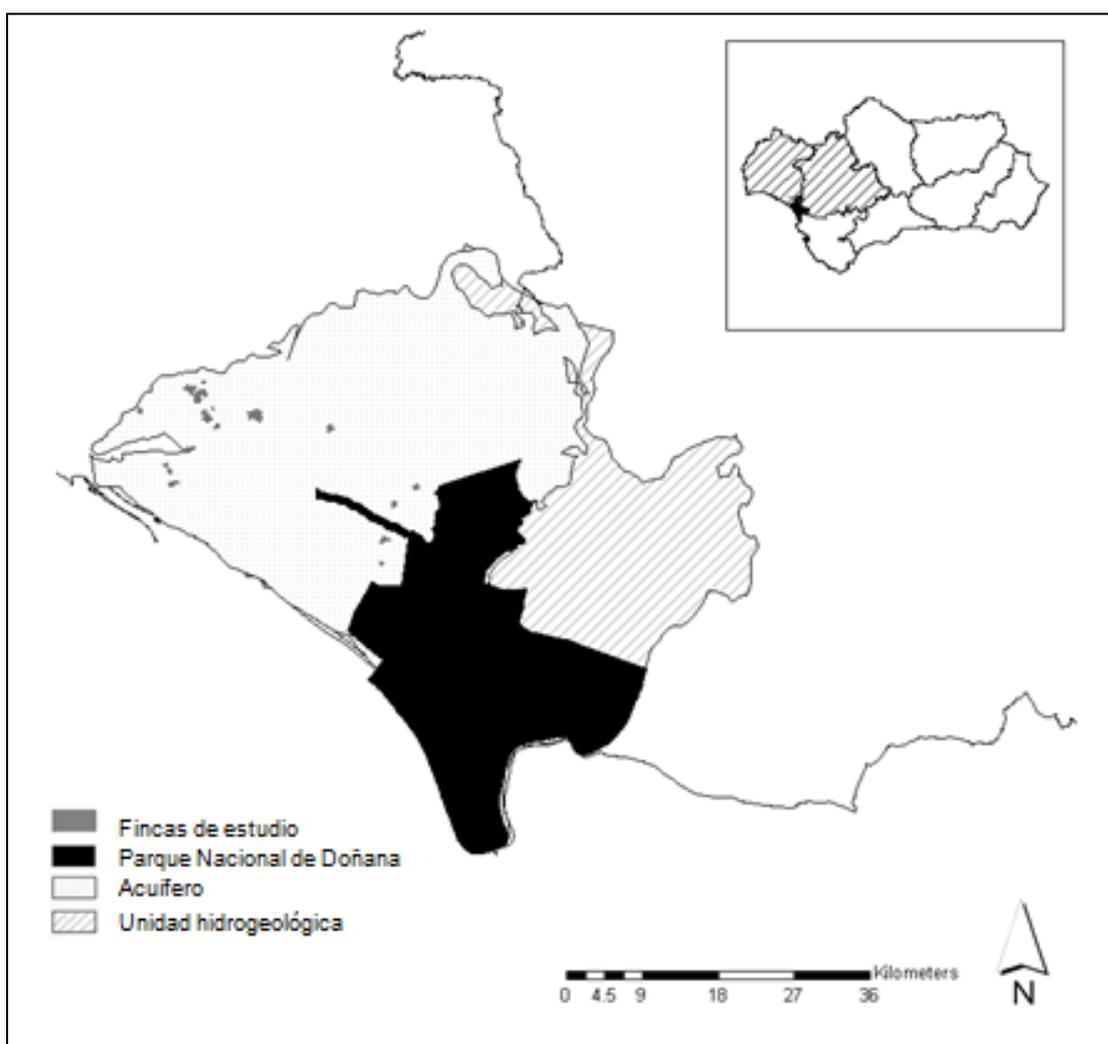


Figura 3.1. Localización de las fincas de estudio, el ámbito del Parque Nacional y del acuífero

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Las fincas seleccionadas representan la diversidad existente en la zona de estudio en cuanto a tamaño de finca, fuentes de suministro de agua, textura del suelo, manejo del cultivo y sistemas de riego.

La superficie total del conjunto de fincas de estudio asciende a unas 500 ha para las tres campañas de estudio (tabla 3.1)

Tabla 3.1. Superficie total de fresa monitorizada (ha)

Número	Campaña		
	2010-11	2011-12	2012-13
1	21,0	18	18,6
2	14,0	14,3	14
3	76,0	76,5	90,2
4	27,1	22,5	22,5
5	15,5	15,0	15,0
6	56,0	56,7	56,7
7	4,0	4,2	4,4
8	10,0	9,7	9,7
9	19,6	24,2	19,4
10	7,6	8,3	8,3
11	11,6	6,2	5,9
12	17,2	19,5	19,8
13	21,7	23,1	23,1
14	20,5	19,3	19,3
15	48,8	47,8	46,4
16	11,1	11,8	11,8
17	13,7	13,9	13,9
18	23,2	27,1	28,7
19	10	10	10
20	28,7	27,2	27,2
21	2,4	2,3	2,34
22	28,0	30,2	31,4
TOTAL	488,2	488,5	499,4

Las superficie dedicada al cultivo de fresa en la provincia de Huelva en las citadas campañas osciló entre las 6200 y 6500 ha. Esto supone una superficie monitorizada que oscila entre el 7,5 y 8% de la superficie total dedicada al cultivo de fresa en la provincia de Huelva para las campañas estudiadas.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

3.1.2. El medio físico

El mapa de suelos de Andalucía (REDIAM, red ambiental de suelos de Andalucía) contempla 62 unidades edáficas, clasificando el tipo de suelo en el que se encuentra el ámbito de estudio en “Arensoles álbicos” (figura 3.2). Son suelos de carácter arenoso, que se desarrollan sobre materiales no consolidados de textura arenosa. Aparecen sobre dunas recientes, lomas de playa y llanuras arenosas con un perfil del tipo AC, con un horizonte E ocasional, tendiendo a desarrollar un horizonte álbico.

Más al norte, se pueden encontrar suelos con un mayor contenido de arcilla que generalmente se lavan de los horizontes superiores para acumularse en zonas más profundas. Esto da lugar a la formación de suelos heterogéneos compuestos por arena en superficie con capas de arcillas más o menos profundas, lo que dificulta su manejo y comportamiento frente a las aplicaciones de riego.

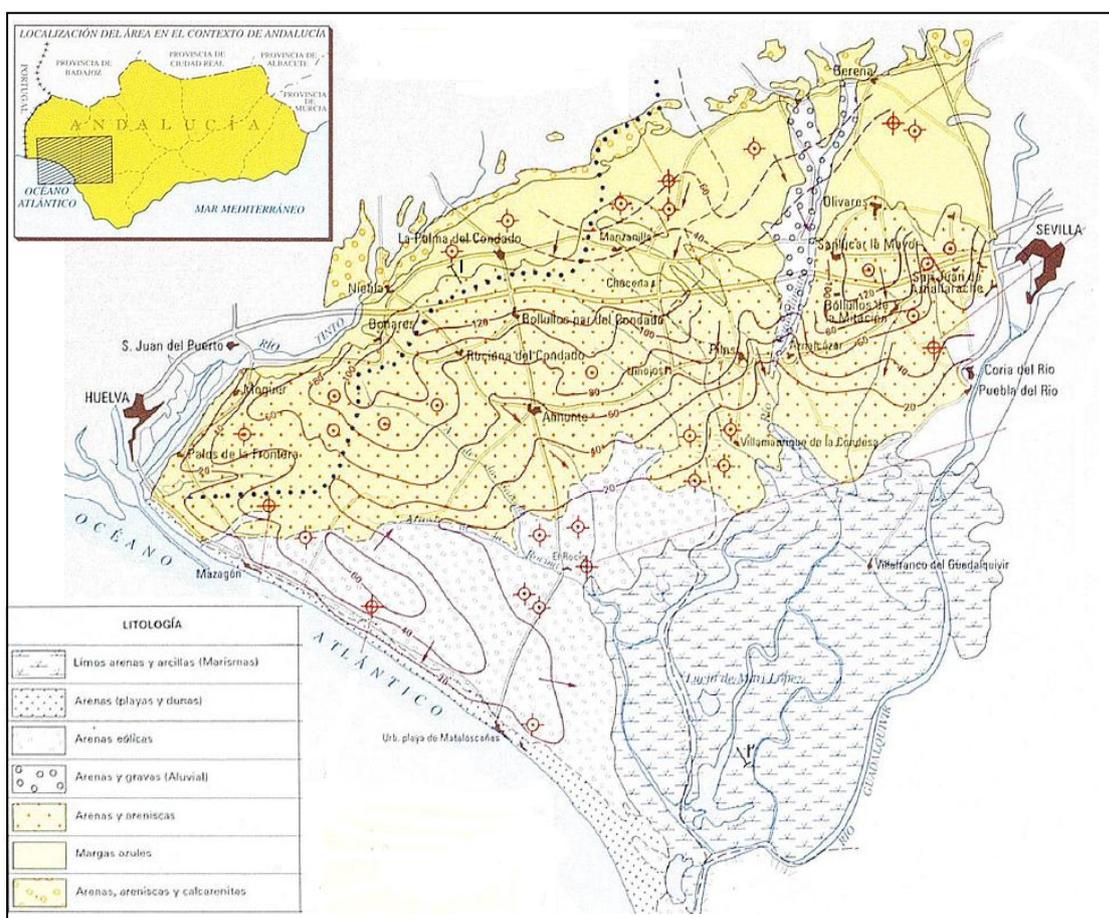


Figura 3.2. Esquema Hidrogeológico Acuífero 27 (Atlas hidrogeológico de Andalucía, 1998).

De igual modo, en el mapa hidrogeológico del Subsistema acuífero Almonte-Marismas del Instituto Geológico y Minero (IGME) (figura 3.2), se clasifican los suelos de la zona dónde se ubican las zonas regables como “Permeables” formados por terrazas, manto eólico, dunas antiguas y formación roja formada por conglomerados, gravas, arenas, limos, arcillas y margas o turbas.

En general el cultivo de fresa requiere suelos muy ligeros, por lo que se suele ubicar en suelos arenosos. Poseen en general más de un 80% de arena en capas superficiales, pudiendo existir variaciones del perfil de suelo en profundidad de unas zonas a otras. Estos suelos con alto contenido en arena tienen muy baja capacidad de retención del agua por lo que el manejo del riego es crítico si se quiere usar el agua de forma eficiente.

3.1.3. Análisis climático de la zona

Para llevar a cabo el análisis climático en la zona de estudio se ha utilizado la serie histórica registrada por la Red de Información Agroclimática (R.I.A.) de la Junta de Andalucía en la estación ubicada en el Cebollar. La serie disponible tiene información registrada desde 2001. Los valores de precipitación y evapotranspiración registrados desde el 1 de septiembre hasta el 31 de junio (duración de la campaña de fresa) entre 2001 y 2013 han sido 598 mm y 882 mm respectivamente (figura 3 y figura 4).

De la figura 3.3 se observa que la precipitación acumulada en las tres campañas de estudio (en color gris) ha sido muy diferente. En la primera campaña de estudio, 2010-11 la precipitación acumulada fue de 928 mm, frente a los 324 mm registrados en la siguiente campaña. En la tercera campaña se registró una precipitación de 573 mm, estando en valores cercanos a la media. En resumen, se han estudiado tres campañas climáticamente muy diferentes, con un año húmedo, otro seco y un año con valores medios.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

En cuanto a los valores de evapotranspiración acumulada por campaña, los valores han sido similares, con valores cercanos a la media. Los valores registrados para las tres campañas fueron de 912 mm, 988 mm, y 822 mm respectivamente (figura 3.4)

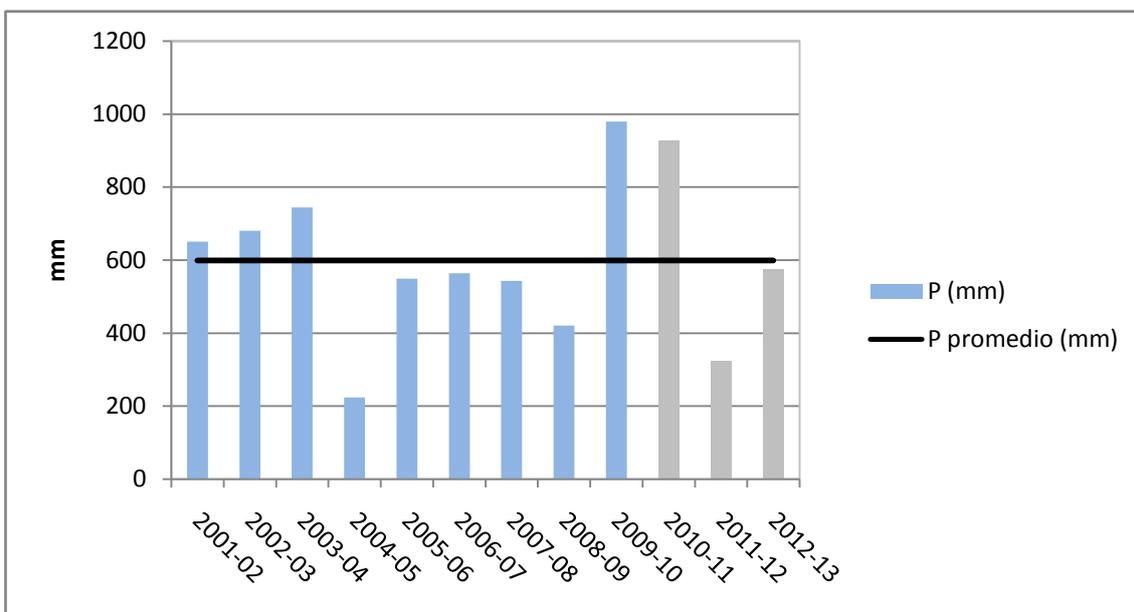


Figura 3.3. Precipitación acumulada septiembre-junio y promedio (2001-2013)

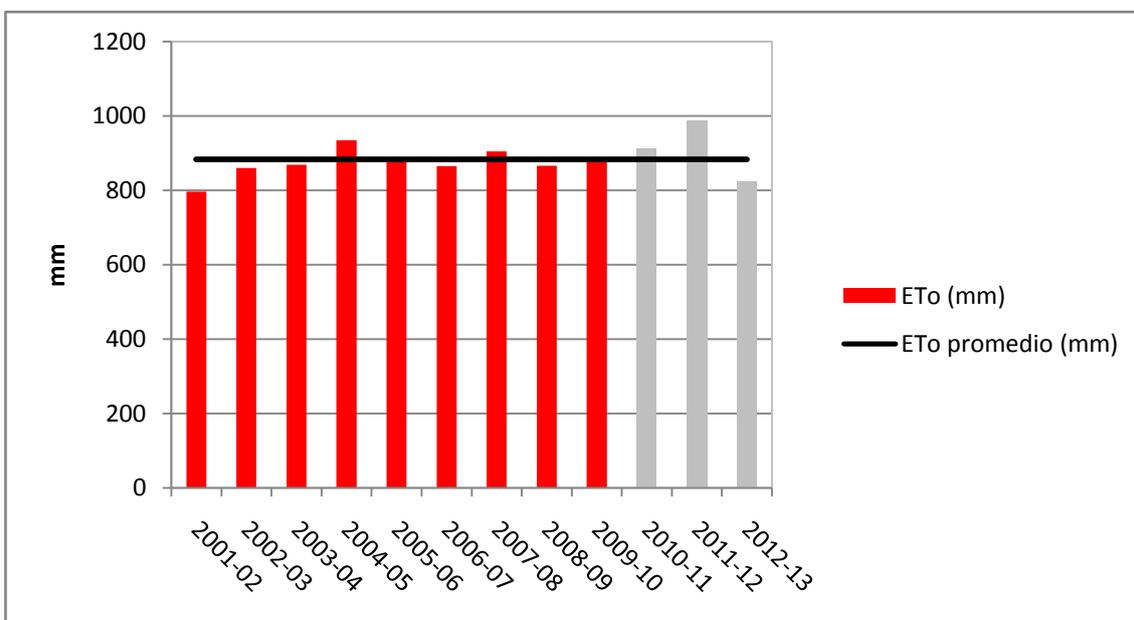


Figura 3.4. ETo acumulada septiembre-junio y promedio (2001-2013)

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Sin embargo, la serie histórica disponible es corta y los valores promedios pueden estar distorsionados por la presencia de dos campañas muy húmedas cómo fueron 2009-2010 y 2010-2011.

De una serie histórica de 34 años de la Estación Biológica de Doñana (Estación manual Palacio de Doñana) se desprende que la precipitación promedio en la zona es de 552,3 mm/año y la evapotranspiración promedio es 848,5 mm/año, valores muy próximos a los obtenidos en la serie histórica 2001-2013.

Las diferencias existente entre precipitación y evapotranspiración provocan un déficit de humedad en el suelo que unido a una distribución temporal de la precipitación muy irregular hacen que el riego sea crítico para la supervivencia del cultivo. A esto hay que añadirle que sólo una fracción muy escasa (despreciable) del agua de lluvia alcanza el suelo cultivado como consecuencia del empleo de plásticos tanto en acolchados como en los macrotúneles.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE FRESA

3.2.1. Proceso de registro de datos de campo

Se ha llevado a cabo un proceso exhaustivo de caracterización de cada finca, teniendo en cuenta la textura del suelo, variedades plantadas, infraestructura de riego, superficie de los sectores de riego, densidad de plantación así como las prácticas de manejo del cultivo.

Se ha desarrollado un protocolo sistemático de recogida de datos adaptado a las características de cada finca (Anejo 9.5 y 9.6). De esta forma, se han registrado en campo los tiempos de riego diarios por cada sector y variedad desde el inicio hasta el final de la campaña, junto con los volúmenes aplicados en alomado y plantación. A partir de los tiempos de riego diarios y el caudal de los emisores se estiman los volúmenes de agua aplicados. En las fincas que disponían de contadores volumétricos específicos para el cultivo de fresa se ha registrado

diariamente y/o mensualmente las lecturas de los contadores, lo que ha servido para calibrar el método de cálculo a partir de los tiempos de riego.

3.2.2. Manejo del cultivo y productividad

Es habitual encontrar diferentes variedades en una misma finca. En la mayoría de ellas se plantan al menos 2 ó 3 variedades, aunque existen fincas con hasta 5 variedades distintas. Las variedades más plantadas durante las campañas de estudio fueron Candonga, Splendor, Camarosa y Fortuna, aunque si bien también se podían encontrar en menor cantidad variedades como Benicia, Sabrina, San Andrea, Antilla y Primoris entre otras (Anejo 9.7 y 9.8)

La plantación, que se realiza sobre lomos acolchados, suele comenzar a principios o mediados de octubre y se realiza con plantas con raíz desnuda procedentes de viveros ubicados en el centro-norte de la Península (Segovia y Ávila). Un mes más tarde aproximadamente, se cubren los macrotúneles con plásticos de polietileno blanco. La duración de la campaña depende en gran medida de la demanda de los mercados internacionales y en menor medida del nacional, aunque si bien los meses de mayor producción son marzo, abril y mayo. Hay una tendencia a intentar adelantar la producción a los meses de enero y febrero donde hay una menor oferta y los precios son más elevados y terminar la campaña antes, principios de mayo, cuando la fresa onubense encuentra una fuerte competencia con las fresas autóctonas producidas en países del centro y norte de Europa.

La densidad de plantación promedio en las fincas de estudio oscila entre las 70000 y 75000 plantas/ha para las tres campañas de estudio (Anejo 9.9). Es importante señalar que hay fincas con densidades de 50000 plantas/ha y otras fincas con densidades cercanas a las 100000 plantas/ha. Lo más frecuente son densidades de plantación que oscilan entre las 70000 y las 80000 plantas/ha.

Los emisores de riego empleados de forma genérica en el cultivo de fresa en Huelva son las cintas de riego de medio y bajo caudal, no autocompensantes (Anejo 9.9). El caudal más empleado es $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ o muy próximo a éste, aunque si bien también nos encontramos emisores con caudales de $3,8 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$. Las cintas se

desechan al final de cada campaña. En algunas fincas de mayor superficie se deja en parte de ésta los lomos y las cintas de riego durante dos campañas consecutivas aunque si bien se les hace labores de mantenimiento y limpieza.

La producción total promedio se ha estimado en 63 t/ha, 73 t/ha y 69 t/ha para las tres campañas de estudio. Es muy común en la zona estimar la producción en gramos por planta. Dicha producción fue de 887 g/planta, 1004 g/planta y 935 g/planta para las tres campañas. El porcentaje de producción dedicado a industria osciló entre el 22 y 27% de la producción total, aunque este dato está muy influenciado por la demanda de los mercados así como por la calidad de la fruta en momentos puntuales de la campaña.

3.3. ESTIMACIÓN DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DEL CULTIVO DE FRESA

Debido a la presencia de los plásticos tanto en los lomos como en el macrotúnel, y a que en la etapa inicial desprovista del plástico la fresa es una plántula con muy poco desarrollo radicular, la precipitación no representa un aporte de agua efectiva al cultivo por lo que no influye en el cálculo de sus necesidades de riego. Esta hipótesis se afianza si se tiene en cuenta la textura extremadamente arenosa de los suelos presentes en la zona de estudio, que poseen una capacidad de retención muy baja.

El método tradicional para el cálculo de las necesidades de riego de un cultivo al aire libre se basa en la estimación de la evapotranspiración potencial (ET_o) ponderada por un coeficiente de cultivo (K_c) que depende de la fisiología y fase de desarrollo del cultivo (Doorenbos y Pruitt, 1977) (ecuación 3.1).

$$NR(mm) = \sum Kc_i \cdot ET_{o_i} - P \quad (3.1)$$

La evapotranspiración potencial o de referencia (ET_o) cuantifica la demanda evaporativa de la atmósfera, siendo equivalente a la evapotranspiración de una pradera de gramíneas con una altura entre 8 y 10 cm que crece sin limitaciones de agua y

nutrientes en el suelo y sin incidencia de plagas y enfermedades. La estimación de ET_o para una determinada zona se realiza mediante el empleo de datos climáticos. En España, existe una red de estaciones agroclimáticas, que gestionan en unos casos el Ministerio de Agricultura y en otros las Comunidades Autónomas que registran datos climáticos y los facilita libremente a los usuarios a través de su plataforma telemática. Junto a otros datos climáticos, también se facilita el valor de la ET_o estimada mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al*, 1998). Sin embargo, en la mayor parte de ellos, el valor proporcionado de ET_o está estimado para condiciones de cultivo al aire libre, y no bajo plástico.

El coeficiente de cultivo (K_c) representa la disponibilidad del cultivo y el suelo para atender la demanda evaporativa de la atmósfera, dependiendo por tanto de la fase de desarrollo del cultivo y del agua disponible en el suelo.

P , es la precipitación efectiva, que en el caso del cultivo de fresa, debido al manejo que se hace del cultivo, se ha considerado nula.

3.3.1. Cálculo de la evapotranspiración potencial (ET_o) bajo plástico

Hay diferentes procedimientos para estimar la ET_o . Como se ha mencionado anteriormente, los valores obtenidos de las estaciones agroclimáticas públicas de la Junta de Andalucía, han sido estimados al aire libre mediante la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al*, 1998). No obstante, a partir de datos de temperaturas máximas y mínimas registradas también se puede estimar la ET_o , de una forma aproximada, mediante la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985)

El cálculo de ET_o bajo plástico se ha llevado a cabo mediante la metodología propuesta por Fernández *et al*. (2010). En dicho trabajo se evaluaron distintos métodos para calcular ET_o en cultivos bajo plástico en clima mediterráneo y se establece que la ecuación de Hargreaves modificada por la transmisividad del plástico (ecuación 3.2), tiene una correlación de 0,97 con el valor medido mediante una estación agroclimática completa situada dentro del invernadero.

$$ET_{0_p} = 0.023 \cdot R_{as} \cdot \tau \cdot (T_{\max} - T_{\min})^{1/2} \cdot (T + 17.8) \quad (3.2)$$

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Donde R_{as} es la radiación solar extraterrestre (mm/día), τ es la transmisividad del plástico que es la relación entre la radiación solar dentro y fuera del túnel, y T , T_{max} y T_{min} son la temperatura media, máxima y mínima del aire dentro del túnel.

Para obtener los datos climáticos necesarios para el cálculo de la ET_o según esta metodología, se han utilizado datos de una estación agroclimática privada instalada en la zona de estudio y que registra los siguientes parámetros automáticamente cada 15 minutos:

- Radiación solar mediante dos sensores (piranómetro de célula de silicio), situados uno dentro y otro fuera del túnel.
- Temperaturas máximas y mínimas dentro del túnel.

La transmisividad se obtiene mediante el cálculo del ratio entre la radiación solar dentro del invernadero y fuera del mismo. Del análisis de los datos de radiación registrados se observa que el valor mensual de transmisividad calculado es muy estable a lo largo del ciclo de cultivo.

En la Tabla 3.2 se muestran los valores promedio de transmisividad, tanto mensuales como el anual. Para el cálculo de la ET_o se ha utilizado el valor promedio de 0,8 para las tres campañas de estudio.

Tabla 3.2. Valores promedio mensuales de transmisividad por campaña

Mes	(2010-2011)	(2011-2012)	(2012-2013)
Diciembre	0,83	0,81	0,78
Enero	0,82	0,82	0,82
Febrero	0,82	0,82	0,87
Marzo	0,83	0,80	0,85
Abril	0,81	0,79	0,82
Mayo	0,81	0,76	0,77
Junio	0,81	0,75	-
Promedio	0,82	0,79	0,83

3.3.2. Coeficientes de cultivo (K_c)

El coeficiente de cultivo ha sido ampliamente estudiado para numerosos cultivos al aire libre (Allen *et al.*, 1998). Sin embargo, son prácticamente inexistentes las estimaciones de valores de K_c para cultivos bajo plástico. Este es el caso de la fresa, cultivo para el que no existen calibraciones locales en la zona de Huelva. Los valores de K_c que se utilizan provienen de estudios realizados en otras partes del mundo, donde el desarrollo del ciclo del cultivo, el manejo de éste, variedades y densidades de plantación empleadas, así como condiciones climáticas pueden diferir considerablemente con las condiciones del cultivo en la provincia de Huelva. La utilización de estos coeficientes implica la introducción de un cierto grado de incertidumbre en el cálculo de dichas necesidades teóricas de riego del cultivo de fresa, aunque si bien, es la metodología más empleada por la comunidad científica para calcular las necesidades teóricas de un cultivo.

Por tanto, es importante destacar que es necesaria una labor de investigación rigurosa encaminada a obtener los coeficientes de cultivo de la fresa en las condiciones climáticas y con las técnicas de cultivo propias de la zona.

A continuación se realiza una breve revisión de la literatura especializada relativa a coeficientes de cultivo para la fresa.

3.3.3. K_c de FAO

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la alimentación) en el estudio titulado “Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos” (Allen *et al.*, 2006) presenta un conjunto de K_c para un gran número de cultivos, que se han utilizado de forma genérica en los estudios del cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos cuando no existe información procedente de estudios específicos en la zona.

En el estudio de la FAO divide el K_c en cuatro etapas. Una etapa inicial que está comprendida entre la fecha de plantación y el momento en que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de esta etapa depende en

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de plantación y del clima.

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de floración. En cultivos en hileras, como la fresa, ocurre cuando empiezan a solaparse las hojas o bien cuando las plantas casi alcanzan su tamaño máximo.

La etapa de mediados de temporada que comprende el periodo de tiempo entre la cobertura completa hasta el comienzo de la madurez, que está indicada generalmente por el comienzo de la vejez, amarilleamiento o senescencia de las hojas. La etapa de mediados de temporada representa la etapa más larga para una gran variedad de cultivos anuales, como es el caso de la fresa. En esta fase el K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales, con valores cercanos al valor de referencia de 1.

La etapa de final de temporada, comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. El valor de K_c en esta etapa final refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de K_c final será alto.

En la tabla 3.3 se muestran los valores de K_c para las etapas mencionadas del estudio de la FAO.

Tabla 3.3. K_c inicial, medio y final para el cultivo de fresa (FAO, 2006)

Cultivo	K_c inicial	K_c medio	K_c final
Fresa	0,4	0,85	0,75

3.3.4. Adaptación de K_c a las condiciones de manejo del cultivo de fresa en Huelva

En este apartado los valores de K_c previamente descritos se adaptan a las características del ciclo y manejo del cultivo de fresa en la provincia de Huelva.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

A medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del lomo cubierta por la vegetación de la planta, como la altura del cultivo y el área foliar aumentan y por tanto el K_c .

Se ha visto anteriormente que la etapa inicial está comprendida entre la fecha de plantación y el momento en que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. En la zona de estudio la etapa inicial se desarrolla durante el mes de octubre. Durante el periodo inicial el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación directa del suelo. Por lo tanto, el valor de K_c durante el periodo inicial (K_c inicial) es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o a la lluvia.

La plantación del cultivo de fresa en la provincia de Huelva tiene lugar en el mes de Octubre sobre lomos acolchados. Aproximadamente un mes después de plantación, y en función de las condiciones climáticas existentes, se procede a la cubrición de las plantas mediante macrotúneles. En esta fase inicial del cultivo de fresa, donde las temperaturas todavía son elevadas y el cultivo no está protegido por los túneles, se llevan a cabo riegos de apoyo para evitar la deshidratación de las plántulas con microaspersión y complementarios a los riegos con cinta de riego habituales del cultivo. En esta etapa, aunque la evaporación desde los lomos está restringida por la presencia de un acolchado plástico, el agua disponible en los pasillos, la presencia de altas temperaturas y el establecimiento del cultivo al aire libre conlleva que los K_c sean algo más elevados que los establecidos por FAO. Aunque los eventos de humedecimiento son frecuentes, el suelo desnudo es sólo una parte de la superficie cultivada, y se puede fijar el valor de K_c para la fase inicial entre 0,4-0,6 que se desarrolla durante el mes de octubre (adoptándose 0,5).

La etapa de desarrollo del cultivo tiene lugar desde el final de la etapa inicial hasta cobertura efectiva completa. Esta etapa de desarrollo del cultivo dependerá en gran medida del fotoperiodo, la temperatura, la duración de las paradas vegetativas, plagas y enfermedades, así como de la humedad en suelo y aire.

Para poder definir con más precisión esta etapa describiremos los estados fenológicos del cultivo de fresa, que pueden describirse de la siguiente manera (tabla 3.4):

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Estado A: Reposo vegetativo (vivero)

Estado B: Iniciación de la actividad vegetativa.

Estado C: Botones verdes.

Estado D: Botones blancos.

Estado E: Inicio de floración.

Estado F: Plena floración

Estado G: Fin de floración.

Estado H: Fructificación.

Tabla 3.4. Ciclo del cultivo de fresa en Huelva (WWF, 2009)

Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
A	B-C	D-E-F	F-G	H	Se repiten estados D- H varios ciclos				

Según este ciclo, el cultivo de fresa se desarrolla hasta los meses de enero-febrero en que empieza el estado de fructificación y puede considerarse que la planta presenta cobertura completa.

En esta etapa el K_c aumenta conforme se va incrementando el índice de área foliar y desarrollando la planta, hasta alcanzar su valor máximo en la etapa de mediados de temporada, por tanto tomará valores entre 0,5 (K_c inicial) y 0,85 (K_c medio).

La etapa de mediados de temporada comprende desde cobertura efectiva hasta el comienzo de la madurez. Esta etapa comienza en el cultivo de fresa en Huelva en el mes de febrero-marzo y se dura hasta final de campaña (mayo-junio). En esta etapa el K_c alcanza su valor máximo, relativamente constante y cercano a 1.

En el cultivo de fresa en Huelva no se presenta la etapa de finales de temporada, puesto que el final de la campaña viene determinado por el precio de la fruta en los mercados que generalmente es anterior al decaimiento o senescencia de la planta.

Para este estudio se han utilizado los coeficientes de cultivo (K_c) propuestos por FAO (Allen *et al.*, 2006) y ligeramente adaptados en el estudio de WWF para el cultivo de fresa en Huelva (WWF, 2009, Tabla 3.5), en consonancia a los propuestos para la zona por Verdier (Verdier, 1987). Se han considerado los mismos coeficientes

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

de cultivo para todas las variedades y densidades de plantación establecidas lo que supone una importante simplificación del problema debido principalmente a la falta de estudios específicos (ver tabla 3.5).

Tabla 3.5. K_c para el cultivo de fresa (fuente: WWF)

	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
Fresa (K_c)	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9

Existen otras fuentes donde se recogen valores de K_c para el cultivo de fresa, como es el caso de los estudios de Hanson y Bendixen en California (Hanson *et al*, 2004). En el estudio se facilita un dato de K_c quincenal desde enero hasta Julio. Pero dichos coeficientes de cultivo son inferiores a los utilizados en este trabajo, ya que las condiciones del cultivo son diferentes, tanto el ciclo del cultivo como el manejo del mismo, ya que en este caso la fresa se produce al aire libre, con dos goteros por lomo y cuatro hileras de planta por lomo.

En un estudio reciente realizado por Gavilán et al., (2014) se han estimado los K_c de la fresa en Huelva, y en una primera campaña de estudio han obtenido valores iniciales de 0,2 cuando la cobertura era del 15%, aproximadamente a primeros de noviembre. Este coeficiente ascendió de manera progresiva hasta mediados de marzo, alcanzándose valores cercanos a 0,8, con coberturas del 70%. A partir de ese momento ascendió más lentamente con valores máximos de 1,1 a mediados de mayo.

Las diferencias de los valores de K_c entre el mencionado estudio y los propuestos en este trabajo son mínimas en los meses de mayor demanda evaporativa, que son los de mayor producción, desde marzo a mayo. En los meses invernales hay ciertas diferencias, pero no tienen una gran repercusión en las necesidades de riego totales debido a que durante ese período la radiación y por tanto la ET_0 son menores.

3.3.5. Cálculo de las necesidades teóricas del cultivo

Las necesidades netas promedio del cultivo (promedio de las 3 campañas), para una campaña con fecha de plantación 1 de octubre y finalización 31 de mayo, se han estimado en un valor cercano a 4590 m³/ha (459 mm/año) (Tabla 3.6). Si se considera una eficiencia del sistema del 80% (manejo del sistema de riego y pérdidas en el sistema) las necesidades brutas del cultivo ascienden a 5730 m³/ha (573 mm/año).

Para dichos cálculos se ha calculado la ET_o como cultivo al aire libre durante el mes de Octubre y como cultivo bajo plástico a partir del mes de Noviembre.

Es importante señalar que de las tres campañas de estudio, la 2010-2011 ha sido muy húmeda con precipitaciones acumuladas de septiembre a junio cercanas a los 1000 mm con muchos eventos de lluvia (nubosidad) que han contribuido a reducir la ET_o y por tanto las necesidades de riego de la planta. Por el contrario la campaña 2011-2012 ha sido muy seca con una precipitación acumulada de 323 mm (225 mm por debajo de la media en la zona de 550 mm). Se observa que en esta campaña las necesidades del cultivo han sido mayores, con un aumento del volumen de agua empleada. La tercera campaña con datos climáticos cercanos a la media presenta unos valores de necesidades o requerimientos del cultivo intermedios a las dos campañas anteriores.

Si empleamos los valores de K_c estimados en el estudio citado de Gavilán et al., (2014), el valor medio de ET_c neto para las tres campañas de estudio es de 426 mm, algo inferior al valor mostrado en la tabla 3.6 de 459 mm, aunque si bien no son valores muy diferentes. En dicho estudio, los valores de ET_c media medida con lisímetros en tres repeticiones oscilaron entre los 430 mm y los 498 mm con valores medios de 463 mm durante la campaña 2013-2014, que se encuentran en concordancia con el valor promedio calculado en nuestro estudio para las tres campañas analizadas.

En resumen, de los valores de ET_c estimados para el conjunto de campañas de estudio se desprende que los valores oscilan entre los 430-500 mm por campaña, dependiendo del año climático y la duración de la campaña.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Tabla 3.6. Necesidades teóricas del cultivo de fresa para las campañas comprendidas entre 2010-2013 (Campaña de 1 Octubre – 31 de Mayo)

Campañas	Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Anual
	Kc	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	
2010-2011	ETo* (mm/día)	2,52	1,16	0,98	1,21	1,98	2,48	3,73	4,61	
	ETc netas (mm/mes)	43,0	20,9	18,2	26,3	38,8	69,2	100,7	128,6	445,7
	ETc brutas (mm/mes)	53,7	26,1	22,8	32,8	48,5	86,5	125,9	160,8	557,1
2011-2012	ETo* (mm/día)	3,26	1,32	1,26	1,68	2,50	2,93	3,01	4,74	
	ETc netas (mm/mes)	55,6	23,8	23,4	36,5	49,0	81,7	81,3	132,2	483,5
	ETc brutas (mm/mes)	69,5	29,7	29,3	45,6	61,3	102,2	101,6	165,3	604,4
2012-2013	ETo* (mm/día)	2,57	1,42	2,00	1,50	2,00	2,32	3,64	3,83	
	ETc netas (mm/mes)	43,8	25,6	37,2	32,6	39,2	64,7	98,3	106,9	448,19
	ETc brutas (mm/mes)	54,8	32,0	46,5	40,7	49,0	80,9	122,9	133,6	560,24
Valor Promedio	ETo* (mm/día)	2,78	1,30	1,41	1,46	2,16	2,58	3,46	4,39	
	ETc netas (mm/mes)	47,46	23,40	26,29	31,75	42,34	71,89	93,42	122,57	459,1
	ETc brutas (mm/mes)	59,32	29,25	32,86	39,69	52,92	89,86	116,78	153,22	573,9

ET* es la evapotranspiración potencial como cultivo al aire libre durante el mes de Octubre y bajo plástico desde Noviembre hasta final de campaña

3.4. NECESIDADES TOTALES DE AGUA DE RIEGO DEL CULTIVO DE FRESA

El cultivo de fresa, además del agua de riego empleada para satisfacer las necesidades hídricas, requiere una cantidad significativa de agua para otras labores como son la preparación del terreno o alomado, y el proceso de plantación.

Para estimar las necesidades globales de agua en el cultivo de fresa se estima el volumen de agua requerido en cada una de las fases del cultivo.

3.4.1. Fase de alomado

La preparación del terreno, denominado calado o alomado, tiene lugar entre los meses de julio y septiembre. La aplicación de agua se lleva a cabo mediante sistemas de aspersión. Existe una gran variabilidad en los modelos empleados (aspersores metálicos, de material plástico, cañones de elevado caudal) así como del marco de instalación de dichos aspersores.

Son ampliamente utilizados los aspersores metálicos y/o de material plástico con caudales de 1200-1300 l/h para una presión de trabajo de 3-4 kgf/cm² con marcos que oscilan entre los 10x10 m y los 12x12 m. El número de horas de riego para el alomado varía en función del tipo de suelo existente, y del perfil del suelo. Como término medio se emplean entre 6 y 10 horas repartidas en varios riegos (2 días), lo que arroja unos volúmenes que oscilan entre los 700 y 1200 m³/ha.

Es importante señalar que si durante la fase de alomado hay episodios de lluvia, el volumen necesario para el alomado se reduce significativamente. Una vez hechos los lomos, se requiere de un volumen de agua para que no se compacten. Es recomendable hacer el alomado en septiembre porque conlleva un ahorro en el mantenimiento de los lomos.

Estos aspersores se utilizan sólo en la fase de alomado, sustituyéndose en la mayoría de los casos por microaspersores en la fase de plantación.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

La aplicación de agua para alomado se realiza a “todo terreno”, siendo la superficie mojada aproximadamente un 10% más de la superficie efectiva cultivada.

Aunque no está generalizado, existen fincas en las que los lomos se mantienen durante dos o más campañas. En este caso se ahorra agua en la fase de alomado, pero los consumos durante la fase de desarrollo del cultivo aumentan como consecuencia de la compactación de lomo y la aparición de “grietas” que facilitan la pérdida de agua por percolación y deteriora una infiltración homogénea del agua en el perfil del lomo.

Otra tendencia en alomado es a instalar aspersores de material plástico con menor pluviometría (400-550 l/h y 3-3,5 kgf/cm²) que se mantienen para la fase de riego de apoyo en plantación. Estos aspersores presentan marcos parecidos a los anteriormente citados (10x10 m) con un número de horas de trabajo que oscila entre las 6 y las 12 horas. Esto supone volúmenes de agua empleados en alomado que varían entre 300 y 600 m³/hora.

En las fincas de estudio se ha registrado el consumo de agua en alomado. De las tres campañas evaluadas se ha obtenido para el conjunto de fincas de estudio un valor promedio de volumen de agua aplicado en alomado de 327, 589 y 555 m³/ha respectivamente, siendo la campaña 2010-11 muy húmeda, la 2011-12 una campaña muy seca y la 2012-2013 media desde el punto de vista de precipitaciones. Aunque los valores registrados oscilan entre 50 y más de 1000 m³/ha, valores en los que puede influir el porcentaje de finca con lomo viejo, que es variable, la textura del suelo, o los aspersores utilizados.

En el manual de buenas prácticas de riego editado por WWF (WWF, 2009) se recoge que el volumen de agua necesario para la preparación del terreno es de 700 m³/ha.

Se observa que hay una gran heterogeneidad en cuanto a los consumos de agua empleados en la fase de alomado entre las distintas fincas. Como ya se ha mencionado, estos consumos están muy condicionados por la época en la que se hagan los lomos (influye en el posterior mantenimiento de éstos hasta plantación), de los posibles episodios de lluvia durante la fase de elaboración de los lomos, así como del perfil del suelo. En suelos con mayor porcentaje de arcilla o limos, o aquellos que siendo

arenosos en superficie presenten una capa impermeable a poca profundidad, se requerirá un menor volumen de agua puesto que su capacidad de retención de la humedad es mayor.

3.4.2. Fase de aspersión en plantación

La plántula de fresa llega a los campos de plantación de Huelva a mediados-finales de septiembre y principios de octubre procedente de viveros de multiplicación ubicados en Ávila y Segovia principalmente. Las temperaturas existentes en Huelva en esa época del año son más altas, lo que provoca un alto riesgo de deshidratación de la plántula en la fase de trasplante. Este riesgo de aclimatación se acentúa debido al escaso desarrollo del material vegetativo trasplantado, así como de su escaso desarrollo radical (raíz desnuda).

El consumo de agua empleado en la fase de plantación va a estar enormemente influenciado por las condiciones climáticas existentes en ese momento. Temperaturas más suaves y un ambiente húmedo propicia unas condiciones más benignas y por tanto un menor consumo de agua en plantación. Por el contrario temperaturas elevadas y un ambiente seco supondrá un mayor aporte de agua para evitar la deshidratación de la planta y favorecer el enraizamiento.

Existe poca información sobre el consumo de agua en plantación. En términos generales se ha implantado la microaspersión, que se complementa con la cinta de riego para aportar la humedad necesaria en el suelo y el ambiente.

Existen técnicas de manejo del cultivo muy diferentes en cuanto a la aplicación de agua en plantación. Éstas difieren en la proporción de agua aplicada con microaspersión y con cinta de riego, y de la duración de la fase de microaspersión. Hay agricultores que dan riegos de apoyo con microaspersión durante una semana y otros que los mantienen durante un mes.

De los datos registrados en el conjunto de las 22 fincas de estudio, el consumo promedio de agua en plantación oscila entre 740 m³/ha y 870 m³/ha campañas, con un valor medio para las tres campañas de 799 m³/ha.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Para esta misma etapa del cultivo, el manual de buenas prácticas de riego de WWF (2009) contempla un consumo de 300 m³/ha, aunque no aporta ningún tipo de justificación.

Por tanto, los consumos medios de agua en las primeras fases del cultivo (alomado y plantación) obtenidos a partir de los datos registrados en campo oscilan entre 1112 m³/ha y 1460 m³/ha.

3.4.3. Fase de desarrollo del cultivo

Una vez que el cultivo se ha establecido se emplea un sistema de riego localizado para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo. En concreto se ha extendido el uso de cinta de riego para la aplicación de los eventos de riego. Se instala una cinta de riego por lomo que suministra a las dos líneas de plantas por lomo y que trabaja a una presión entre 0,5-0,7 kgf/cm², según el fabricante.

En términos generales, para túneles típicos presentes en la zona de 6 lomos y 60-70 metros de longitud se instalan entre 8000-9000 m de cinta de riego por ha. El caudal más empleado de cinta de riego es de 5 l.h⁻¹.m. La cinta presenta un gotero cada 20 cm (5 goteros por metro) con un caudal de 1 l.h⁻¹. También es frecuente encontrar fincas con cintas de riego de 3,8 l.h⁻¹.m.

Las aplicaciones de riego que se realizan mediante la cinta durante la campaña son muy variables, empezando con riegos ligeros durante los meses de noviembre y diciembre, que se van incrementando conforme aumentan la tasa de evapotranspiración del cultivo. Es importante señalar que el agua de riego también se utiliza como vehículo para transportar los nutrientes a la planta mediante el sistema de fertirriego. Los suelos presentes en la zona de estudio son suelos arenosos con muy poca capacidad de intercambio catiónico, por lo que los aportes de nutrientes son críticos para obtener producciones comerciales. Esta característica propicia que en los meses de invierno, cuando las necesidades hídricas del cultivo son menores, sea necesario regar para aportar los nutrientes necesarios en una fase del ciclo del cultivo crítica en la que se están formando los botones florales.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Para evitar pérdidas por percolación en los suelos arenosos, se debe aplicar el agua en pulsos de riego de corta duración. En relación a la duración de los pulsos de riego empleados y la frecuencia de los mismos existe una gran heterogeneidad, dado que habitualmente se basan únicamente en la experiencia del agricultor. En este sentido es importante determinar el pulso óptimo de riego para cada tipo de suelo que evite las pérdidas por percolación.

3.4.4. Necesidades totales de agua en el cultivo de fresa

Una vez que han sido estimados los valores de ET_o media mensual mediante la metodología anteriormente expuesta, y definidos los K_c , se han calculado las necesidades de riego para las campañas comprendidas 2010-2013.

Sumando a las necesidades de riego del cultivo el volumen de agua empleado en la preparación del suelo y en plantación, el volumen total de agua medio estimado que requiere el cultivo de fresa es 7057 m³/ha (tabla 3.7).

Tabla 3.7. Volumen total de agua promedio que requiere el cultivo de fresa para las campañas de estudio.

Campañas	Necesidades brutas (m³/ha)	Uso de agua mediante aspersión (alomado y plantación, m³/ha)	Volumen total requerido (m³/ha)
2010-2011	5571	1112	6683
2011-2012	6044	1460	7504
2012-2013	5602	1292	6984
Promedio	5739	1288*	7057

* Valor promedio de los datos registrados en campo.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Como se recoge en la tabla 3.6, la duración de la campaña que se ha considerado para el cálculo de las necesidades brutas es del 1 de Octubre al 31 de Mayo, considerando cultivo al aire libre durante el mes de Octubre y bajo plástico a partir del 1 de Noviembre. Los volúmenes de agua usados en alomado y plantación son un valor promedio de los datos registrados en campo en todas las fincas del estudio.

Estos valores medios deben tomarse con cautela, ya que se han obtenido para una campaña promedio de la zona de estudio. Pueden variar en función de dos aspectos principalmente. En primer lugar de la temperatura en la época de plantación y en segundo lugar de la duración de la campaña. Alargar la campaña durante los meses de mayor demanda evaporativa implica mayores consumos de agua de riego y viceversa, reducir la duración de la campaña reduce en gran medida los volúmenes de agua demandados por el cultivo.

3.5. DATOS DE CONSUMO REALES DE AGUA EN LA ZONA

En la actualidad no existen datos públicos oficiales y rigurosos sobre la demanda real de riego del cultivo de fresa en la provincia de Huelva.

De los datos registrados en campo para el conjunto de fincas de estudio durante las tres campañas se recoge que el volumen total promedio de agua aplicada al cultivo fue de 6991 m³/ha (2010-2011) y 7222 m³/ha (2011-2012) y 6985 m³/ha (2012-2013) (tabla 3.8). El valor promedio del volumen total de agua aplicada registrado en campo para las tres campañas ha sido de 7066 m³/ha, mientras que el valor medio de agua aplicada mediante cinta de riego para satisfacer exclusivamente las necesidades del cultivo ha sido de 5786 m³/ha. En el estudio realizado por Gavilán et al. (2014) el volumen aplicado en esta etapa fue de 5610 m³/ha para la campaña 2013-2014, muy similar a los resultados obtenidos en este trabajo, que arrojó un valor promedio de 5739 m³/ha para las tres campañas de estudio.

Del análisis de los datos obtenidos se deduce que el comportamiento real del regante está más próximo a las estimaciones de necesidades de riego realizadas en el apartado 3.4 del presente estudio que las propuestas en los Planes Hidrológicos o en el citado Plan especial de ordenación del regadío de Doñana.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

Considerando la incertidumbre asociada a los valores de K_c , basándonos en nuestra experiencia pensamos que las necesidades de riego podrían variar en no más del $\pm 10-15$ %, siendo siempre superiores a los 4500 m³/ha netos (5232 m³/ha brutos) propuestos en los Planes Hidrológicos y en el Plan especial de ordenación del regadío de la corona norte forestal de Doñana.

Además, cabe destacar que en los cálculos teóricos se ha considerado una eficiencia media en el riego del 80% el cual es un valor ciertamente optimista tal y cómo se recoge en el estudio llevado a cabo por Camacho et al. (2013) y se pone de manifiesto en el último capítulo de este trabajo. Dado que el suelo es extremadamente arenoso (habitualmente más de un 85-90% de arena), dichos valores de eficiencia no son demasiado realistas pese a que el agua se aplique en pulsos de riego cortos de pocos minutos y, por tanto, se minimicen las pérdidas por percolación. La alta conductividad hidráulica en saturación de este tipo de suelos, en general superior a 150 mm/h, hacen que aunque se realice un manejo correcto del riego sea difícil conseguir una eficiencia global superior al 80%. Inferiores valores de eficiencia llevarían a dotaciones de riego incluso superiores a las obtenidas.

No obstante, también es importante relacionar la producción obtenida por hectárea con el consumo de agua, que está relacionada tanto con la densidad de plantación, como con la duración de la campaña. Reducciones de la cantidad de agua aplicada puede llevar a reducciones de la producción, con la consecuente repercusión económica, que puede poner en peligro la sostenibilidad económica de un cultivo.

Tabla 3.8. Valores registrados de agua aplicada en alomado, plantación, desarrollo del cultivo y agua total aplicada.

Finca	Alomado (m ³ /ha)			Plantación (m ³ /ha)			Desarrollo del cultivo (m ³ /ha)			Agua total aplicada (m ³ /ha)		
	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13
1	-	640	433	2667	2286	2373	12548	11249	8976	15214	14175	11783
2	-	640	433	2667	2667	2673	9062	9956	7975	11728	13263	11082
3	414	538	414	1716	1442	1192	4764	4575	3128	6894	6555	4734
4	470	397	284	235	199	710	5430	3575	3678	6134	4171	4672
5	249	440	439	909	800	799	5713	5217	5568	6871	6457	6806
6	241	241	174	845	845	600	5066	5066	10205	6152	6152	10979
7	399	363	400	599	544	200	5359	4220	4759	6357	5127	5359
8	400	400	400	400	1200	400	4917	4900	5929	5717	6500	6729
9	399	402	400	747	754	600	5493	4728	5411	6639	5884	6411
10	99	91	281	49	46	400	4075	4118	4954	4223	4255	5635
11	400	700	400	600	300	600	6415	7595	4983	7415	8595	5983
12	400	200	173	1200	800	800	5001	4877	3562	6601	5877	4535
13	240	1262	1120	480	811	720	4730	5072	3887	5450	7145	5727
14	160	800	800	240	200	200	5895	5902	5381	6295	6902	6381
15	10	236	397	36	1180	476	4319	5068	5736	4365	6484	6609
16	79	200	200	300	800	800	5803	3242	4299	6182	4242	5299
17	360	1260	600	600	600	240	6559	7926	8430	7519	9786	9270
18	55	31,9	55	558	525	414	6654	6688	5252	7269	7245	5721
19	355	2045	2622	804	1869	1013	8783	10086	9105	9942	14000	12740
20	660	385	423	345	361	350	3066	4028	3540	4071	4774	4313
21	355	640	567	804	915	759	4435	3172	3860	5595	4727	5186
22	798	1064	1197	480	0	0	5891	5523	6524	7168	6587	7721
PROMEDIO	327,2	589,8	555,1	785,5	870,2	741,8	5908,1	5762,8	5688	6991	7222,8	6985,2

3.6. CONCLUSIONES

Se han estimado las necesidades de riego en el cultivo de fresa para las condiciones de manejo típicas presentes en la zona de estudio. Estas necesidades contemplan tanto el periodo productivo del cultivo, como las fases previas de preparación del suelo y plantación en los que se requieren, por término medio unos 1300 m³/ha. Los valores de necesidades de riego totales oscilan en torno a 7057 m³/ha, variando según las condiciones climáticas y de cultivo de cada año, así como del tipo de suelo.

Los valores estimados de necesidades de riego del cultivo han sido contrastados con los valores obtenidos a partir de los datos de campo registrados en 22 fincas comerciales de fresa. El valor medio del volumen total de agua aplicado durante la campaña y registrado en campo asciende a 7066 m³/ha.

Del análisis de los datos obtenidos se deduce que el comportamiento real del regante está más próximo a las estimaciones de necesidades de riego realizadas en el presente estudio que a las propuestas en los Planes Hidrológicos (4500 m³/ha) o en el citado Plan especial de ordenación del regadío de Doñana, que propone una dotación bruta de 4500 m³/ha.

Las dotaciones netas establecidas en los Planes hidrológicos y las necesidades netas calculadas en este informe son semejantes. Las principales diferencias se manifiestan por una parte en la estimación de la eficiencia global de los sistemas propuesta en los planes hidrológicos (86-90%), y por otra, en que ignoran o no contempla la demanda de agua en las fases de alomado y plantación, que son imprescindibles para el desarrollo productivo del cultivo de la fresa.

El utilizar valores más conservadores de eficiencia conlleva mayores valores de necesidades brutas, a los que añadiendo los consumos en las fases previas al desarrollo del cultivo, coinciden en términos generales con los consumos reales registrados.

Cabe destacar que estas necesidades de riego se han estimado para una serie de tres años, uno de ellos húmedo, otro seco y un año medio. Por el sistema de cultivo de la fresa, la precipitación no afecta directamente al balance hídrico del cultivo, pero en años

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO

secos y normales, las necesidades de riego aumentan como consecuencia del aumento de la evapotranspiración (más días despejados y mayor radiación solar).

En general, se ha observado un comportamiento muy heterogéneo en cuanto a los volúmenes de agua aplicados en las distintas fases del cultivo en la muestra de estudio. Estas diferencias pueden incluso ser mayores en las fases previas al cultivo, como el alomado, en las que no hay un valor de referencia de humedad en el suelo para su elaboración en función de la textura de éste, o en plantación, en el que los riegos están muy condicionados por la exposición del cultivo a los vientos secos procedentes del litoral. Durante la campaña, la lámina bruta aplicada está muy condicionada por la presencia del cultivo y el grado de desarrollo de éste, siendo un elemento que sirve de referencia para decidir cuándo y cuánto regar.

Una vez se ha caracterizado la demanda de riego del cultivo de fresa en el ámbito de Doñana, se ha propuesto hacer una evaluación sobre el manejo que se hace del recurso a través de la aplicación de indicadores de gestión. Éstos nos permitirán identificar las buenas prácticas en el manejo del riego así como las ineficiencias del sistema para proponer medidas de mejora.

3. CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA DE RIEGO



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 4

VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO EN CULTIVOS DE ALTO VALOR.

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO EN CULTIVOS DE ALTO VALOR.

4.1. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua dulce se ha convertido en una de las mayores preocupaciones medioambientales a escala mundial (UNESCO, 2006). Actualmente, una tercera parte de la población mundial vive en regiones que sufren problemas de escasez de agua y está previsto que esta cifra ascienda a dos terceras partes para el año 2025 (UNESCO, 2009). La disponibilidad de agua está condicionada por numerosos factores como son el crecimiento de la población mundial, el cambio climático o los procesos industriales. La mejora en el uso y manejo del recurso es por tanto un reto que afecta no sólo a los usuarios, sino también a las administraciones y empresas (WBCSD, 2006).

Muchas organizaciones se han hecho eco de esta situación y están llevando a cabo iniciativas para conocer mejor la dependencia de su actividad con el uso del agua en toda su cadena productiva. Recientemente han surgido numerosas herramientas que ayudan a contabilizar el volumen de agua empleado en un proceso productivo, el impacto sobre los recursos hídricos disponibles, o a promover un mayor compromiso en el manejo del recurso (Alliance for Water Stewardship, 2012). Referencias a la mayoría de estas herramientas se pueden encontrar en la web de CEO Water Mandate (CEOWM, 2012). Muchas de estas iniciativas y herramientas tienen fortalezas y debilidades (UNEP, 2011), algunas de ellas están todavía en vías de desarrollo (Bayart *et al.*, 2010), o han sido aprobadas recientemente como la norma la Organización Internacional de Normalización, ISO 14046, para el cálculo de la huella hídrica de productos, procesos y organizaciones (ISO, 2014). No obstante, estas herramientas habitualmente relacionan el agua aplicada con la producción obtenida pero en el caso particular del agua destinada a la producción agrícola no evalúan el manejo del riego y hasta qué punto se ajusta a las necesidades del cultivo. Otra limitación importante reside en el hecho de que estas metodologías generalmente se han aplicado habitualmente a grandes escalas de trabajo, basadas en estadísticas nacionales, lo que genera grandes imprecisiones en los resultados (Montesinos *et al.*, 2011).

A escala global, la agricultura de regadío es reconocida como el sector que demanda un mayor volumen de agua. Es por esto que los agricultores tienen una gran responsabilidad en la conservación del recurso y es crítico que hagan un uso eficiente del mismo.

El uso eficiente del agua es particularmente importante en zonas medioambientalmente sensibles donde unas malas prácticas en el proceso de riego pueden tener importantes impactos sobre los recursos hídricos disponibles así como una mayor contaminación de las aguas subterráneas por lixiviados. Este es el caso de una parte importante de la producción de fresa en Huelva, donde el 73% de la producción está ubicada en el entorno del Parque Nacional Doñana (Fundación Doñana 21, 2006). Por tanto y especialmente en estos casos, son necesarias metodologías que vinculen la productividad del agua mediante indicadores como la huella hídrica con el manejo del riego por parte de los agricultores.

Uno de los indicadores más utilizados actualmente para contabilizar el volumen de agua empleado en la producción de alimentos es la huella hídrica. Este indicador fue desarrollado por primera vez por Hoekstra (Hoekstra *et al.*, 2003, Hoekstra *et al.*, 2011). Recientemente se ha incluido en el análisis del ciclo de vida (Mazzi *et al.*, 2014; Berger and Finkbeiner, 2010; Bayart *et al.*, 2010) y en la norma ISO 14046 (ISO, 2014). Utilizado como indicador, la huella hídrica es un índice de uso de agua que tiene en cuenta tanto el uso directo como indirecto desde el productor hasta el consumidor final. En la producción de alimentos, es la etapa del cultivo la que supone más del 90% de la huella hídrica. Puede ser considerada como un indicador global de la apropiación de los recursos de agua dulce. Es un indicador multidimensional que muestra los volúmenes de agua consumidos y su origen y da una orientación preliminar sobre los volúmenes necesarios para reducir la contaminación causada por cada actividad (Hoekstra *et al.*, 2019).

Se han publicado numerosos casos de estudio de huella hídrica sobre producción de cultivos y procesos agro-industriales que dependen en gran medida del agua como son: el cultivo de algodón y la industria textil (Chico *et al.*, 2013); la producción de uvas y el proceso de fabricación del vino (Ene *et al.*, 2013) la producción de té y margarina (Jefferies *et al.*, 2012) o la producción de aceite de oliva (Salmoral *et al.*, 2010). Aunque en menor medida, también se han llevado a cabo algunos estudios sobre

la producción de cultivos hortícolas intensivos, aunque a escala de cuenca. En esta línea, Chapagain y Orr (2009) concluían que la producción de hortícolas en Almería estaba produciendo un estrés severo en los recursos hídricos locales. El estudio se basaba en que las extracciones de agua eran de 4 a 5 veces superiores a la precipitación anual.

El cultivo de fresa es un cultivo que demanda un volumen importante de agua y que es muy solicitado en el mercado nacional e internacional, tanto en fresco como para industria. Según estudios previos la huella hídrica del cultivo de fresa en Huelva oscila entre los 140 m³/t (Aldaya *et al.*, 2010) y los 173 m³/t (Adams *et al.*, 2009). Adams, en el estudio citado estima la huella hídrica de la fresa en Polonia en 592 m³/ha. La gran diferencia entre la huella hídrica del cultivo de fresa entre ambos países es debida al carácter intensivo del cultivo que se hace en Huelva, frente a técnicas menos intensivas de manejo del cultivo llevadas a cabo en Polonia. En Polonia, el cultivo de fresa es al aire libre y depende en gran medida de las precipitaciones, presentando producciones menores.

Sin embargo, los estudios de huella hídrica de un cultivo informan sobre el volumen de agua usada para producir una unidad de producto, pero no dan información sobre el manejo del riego, es decir, si el agua se ha utilizado de una manera eficiente. Por tanto, la información que proporciona el indicador de huella hídrica debe de acompañarse de otros indicadores para evaluar si el manejo del riego aplicado es el adecuado.

En esta línea, uno de los indicadores más utilizado para evaluar el manejo del riego es el Suministro Relativo de Riego (RIS) (Levine, 1982). El indicador RIS es el cociente entre el volumen de agua total anual derivada o bombeada para riego y las necesidades teóricas del cultivo en la campaña de estudio. Este indicador se ha convertido en una herramienta muy útil para evaluar el riego a escala de Comunidad de regantes o de finca (Rodríguez Díaz *et al.*, 2008, 2011, 2012).

En este capítulo se desarrolla y aplica una metodología para la evaluación conjunta del uso y manejo del agua mediante el análisis combinado de indicadores tales como la huella hídrica del cultivo con indicadores de adecuación del riego. Ambos tipos de índices, aplicados de manera conjunta, se utilizan como herramienta de diagnóstico

del riego en la producción de cultivos, facilitando la identificación de ineficiencias y la propuesta de medidas de mejora del proceso (García Morillo *et al.*, 2015).

Para ello se han seleccionado y adaptado un conjunto de indicadores para el caso de cultivos hortícolas que desarrollan parte de su ciclo fuera o dentro de un invernadero o macrotúnel, como es el caso de la fresa entre otros muchos cultivos hortícolas de alto valor. La metodología propuesta se ha aplicado al análisis del conjunto de las 22 fincas de fresa que se han estudiado en el capítulo anterior.

Finalmente se analizan las relaciones entre los distintos indicadores propuestos para identificar las ineficiencias existentes y proponer medidas de mejora en el riego de la fresa, de modo que se minimicen los impactos negativos derivados de la interacción entre el cultivo y la disponibilidad de agua en el entorno.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. Propuesta de Indicadores sobre uso y manejo del riego.

El sector de la agricultura de regadío es un gran consumidor de agua, por ello es particularmente importante estudiar la huella hídrica de la producción de los cultivos (Hoekstra, 2003).

Según Allan (1998), el agua se puede clasificar en tres categorías: verde, azul y gris. La huella verde de un cultivo se define como la evapotranspiración del agua de lluvia disponible en el suelo en su desarrollo.

La huella hídrica azul del cultivo se refiere al uso de los recursos hídricos superficiales o subterráneos que se emplean en evapotranspiración del cultivo durante el ciclo de desarrollo de éste.

La huella hídrica gris de un cultivo es el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes que transporta el agua de riego, basados en las normas vigentes de calidad ambiental del agua. Se calcula como el volumen de agua

que se requiere para diluir los contaminantes hasta el punto de que la calidad del agua ambiental se mantenga por encima de lo estipulado en las normas de calidad del agua.

Siguiendo la terminología desarrollada por Hoekstra (Hoekstra, 2003), la huella hídrica en la producción de un cultivo (HH_c) es la suma de las componentes de huella hídrica verde, azul y gris, y se expresa habitualmente en m^3/t que equivale a l/kg (ecuación 4.1).

$$HH_c = HH_{\text{verde}} + HH_{\text{azul}} + HH_{\text{gris}} \quad (4.1)$$

La huella hídrica verde en la producción de un cultivo (HH_{verde} , m^3/t) se calcula como la componente procedente del agua de lluvia usada por el cultivo (AU_{verde} , m^3/ha) dividida por la producción (P , t/ha). Siguiendo el mismo razonamiento, la huella hídrica azul será el agua de riego usada por el cultivo (AU_{azul} , m^3/ha) dividida por la producción (ecuaciones 4.2, 4.3).

$$HH_{\text{verde}} = \frac{AU_{\text{verde}}}{P} \quad (4.2)$$

$$HH_{\text{azul}} = \frac{AU_{\text{azul}}}{P} \quad (4.3)$$

El agua usada gris se calcula como la concentración del contaminante por hectárea (L , kg/ha) multiplicado por la fracción de lavado (α) y dividido por la diferencia entre la calidad ambiental del agua para este contaminante (concentración máxima aceptable C_{max} , gr/l) y su concentración natural en el cuerpo de agua receptor (C_{nat} , gr/l). La huella hídrica gris se obtiene dividiendo el agua usada gris por la producción (ecuación 4.4).

$$HH_{\text{gris}} = \frac{(\alpha \times L) / (c_{\text{max}} - c_{\text{nat}})}{P} \quad (4.4)$$

La huella hídrica gris puede servir para poner de manifiesto la importancia de la contaminación difusa de origen agrícola, que según la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir es un fenómeno generalizado en la demarcación del Guadalquivir (PHDHG, 2013). A pesar de la importancia de este tipo de contaminación, su cálculo se sigue debatiendo, especialmente para el caso de la producción de cultivos.

Cuando el estudio es a escala detalle, las variables que intervienen en su cálculo son complejas de medir en campo. La aplicación de fertilizantes varía en gran medida de unos agricultores a otros, no existiendo criterios de carácter general. La estimación de la fracción de lavado de los contaminantes, especialmente fertilizantes, requiere de diseños experimentales complejos para poder disponer de datos rigurosos. De igual modo, la concentración natural del contaminante puede variar espacialmente, incluso dentro de la misma finca, por lo que se necesitarían una gran cantidad de muestras para su determinación. No obstante, los programas de fertilización deberían diseñarse para aplicar la cantidad precisa de agua y fertilizante que eviten pérdidas por percolación y de este modo reducir la contaminación difusa.

De acuerdo con la Ley de Aguas Española (2001), y la Directiva de aguas Europea (2000), el agua contaminada debe ser tratada antes de ser devuelta al medio conforme a los estándares de calidad ambiental y vertido propuestos. Estos tratamientos no están basados en la dilución del agua contaminada ya que mediante este procedimiento no es posible eliminar todos los contaminantes, y además supone un consumo adicional de agua. La huella hídrica gris no se ha incluido en este estudio, debido a que el objetivo es disminuir la presión del sector agrícola sobre los recursos hídricos disponibles.

Las componentes verde y azul de agua usada por el cultivo (AU , m^3/ha) se calculan como la acumulación diaria de la evapotranspiración (ET_c , $mm/día$) a lo largo del ciclo del cultivo (ecuación 4.5 y 4.6).

$$AU_{\text{verde}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lg p} ET_{c \text{ verde}} \quad (4.5)$$

$$AU_{\text{azul}} = 10 \times \sum_{d=1}^{lg p} ET_{c \text{ azul}} \quad (4.6)$$

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

El agua usada verde representa el total de agua de lluvia empleada en la evapotranspiración del cultivo desde el día de plantación (día 1) hasta el día de la recolección o cosecha (lgp, longitud del periodo de cultivo). El agua usada azul representa el agua de riego empleada en el fenómeno de evapotranspiración por el cultivo, y por tanto las pérdidas netas de agua en la zona.

El agua usada azul (AU_{azul}) calculada según la ecuación 4.6 no tiene en cuenta los usos indirectos, ni las ineficiencias del riego. No obstante, es habitual que en el proceso de producción se requieran volúmenes de agua importantes para las diferentes prácticas agronómicas como son: la preparación del suelo (AA_{suelo}), riego de apoyo durante las fases de plantación para evitar la deshidratación del cultivo ($AA_{plantación}$), riegos para lavado de sales del suelo (AA_{ss}), o para disminuir los daños derivados de las heladas ($AA_{heladas}$) entre otras.

El volumen de agua usado durante la fase de desarrollo del cultivo depende de la programación del riego y habitualmente, por exceso o por defecto, no coincide con las necesidades teóricas del cultivo (ET_c). En la ecuación 4.7 se tiene en cuenta el volumen total de agua aplicada en todo el proceso de producción del cultivo (agua aplicada total: AAT_{azul} , m^3/ha).

$$AAT_{azul} = AA_g + \sum_{i=1...n} AA_i \quad (4.7)$$

Donde AA_g (m^3/ha) es el agua de riego aplicada durante el desarrollo del cultivo y AA_i (m^3/ha) es el volumen de agua aplicada en las diferentes prácticas agronómicas y de manejo del cultivo (desde 1 hasta n) citadas anteriormente. Así, AAT_{azul} representa el volumen total de agua aplicado para obtener la producción agrícola y es un indicador del agua real utilizada por cada productor a escala de parcela. Aunque sólo una parte de ella se haya consumido en evapotranspiración, el resto puede que haya retornado al entorno bien por percolación o evaporación no productiva, no quedando disponible a escala de finca, aunque sí pueda estarlo a escala de cuenca.

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

Si consideramos AAT_{azul} en lugar del AU_{azul} , la HH_{azul} se convierte en huella hídrica aplicada azul (HH_{azul} , m^3/t). La HH_{azul} informará del volumen de agua total necesario para producir una unidad de cosecha, por tanto relaciona las extracciones totales de agua con la producción.

Para calcular la huella hídrica azul y verde son necesarios gran cantidad de datos e información relacionada con el clima y el cultivo. Cuando el estudio se realiza a escala de parcela, los datos de clima y cultivo que se requieren para los cálculos deben ser muy precisos. El volumen de agua aplicada en cada fase del cultivo, incluidos los usos indirectos deben ser registrados diariamente. También es necesario recabar información sobre el manejo del cultivo como son fechas de plantación y cosecha, densidad de plantación, variedades, características del suelo, producción y datos climáticos in situ.

El indicador Suministro relativo de riego (RIS) (Levine, 1982), es un indicador que informa sobre cómo se ajusta el riego a las necesidades teóricas del cultivo. Se calcula según la ecuación 4.8:

$$\text{RIS} = \frac{AA_g}{10 \cdot (ET_c - P_e)} \quad (4.8)$$

Donde AA_g (m^3/ha), ya definido, es el agua de riego aplicada durante el desarrollo del cultivo, ET_c ($\text{mm}/\text{año}$) es la evapotranspiración del cultivo, y P_e ($\text{mm}/\text{año}$) es la precipitación efectiva, es decir la cantidad de agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada por el cultivo.

En teoría, valores por debajo de 1 indica que el riego es deficitario, es decir que se ha aplicado menos agua que la estrictamente necesaria por el cultivo. Valores por encima de 1, indican que se está aplicando más agua que la necesaria por el cultivo. En la práctica, valores de RIS entre 1-1,2 son deseables para contemplar las ineficiencias del sistema de riego así como del manejo de éste.

4.2.2. Consideraciones sobre el cálculo de la ET_c

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) generalmente se calcula de forma indirecta a través de modelos que requieren como variables de entrada, datos de clima, suelo y características de los cultivos. El modelo CROPWAT desarrollado por la Organización para la Alimentación y Agricultura de Naciones Unidas (FAO, 2010b) y basado en el método descrito en Allen et al. (1998), es el más empleado en la actualidad, dado el nivel de detalle requerido en el cálculo de la huella hídrica de los cultivos.

En España, los datos de clima necesarios para estimar la ET_c con CROPWAT son obtenidos generalmente de estaciones públicas instaladas al aire libre. Igualmente los datos de suelo y características del cultivo son obtenidos de bases de datos genéricas y o de estadísticas regionales o nacionales.

Sin embargo, la mayor parte de los cultivos hortícolas de gran valor, se desarrollan completamente o parte de su ciclo dentro de un invernadero o bajo cubiertas de plástico. En este trabajo, la metodología descrita por Allen et al. (1998) e integrada en el modelo de CROPWAT ha sido adaptada, según se muestra en el capítulo 3, a la posibilidad de que el cultivo se encuentre bajo plástico en algún momento durante la campaña (valores de coeficientes de cultivo y no consideración de las precipitaciones).

4.3. RESULTADOS

La metodología descrita en el epígrafe 4.2 se ha aplicado al conjunto de las 22 fincas comerciales de producción de fresa, previamente descritas en el capítulo 3, con el objetivo de evaluar el proceso de riego que se lleva a cabo en el cultivo de fresa e identificar medidas de mejora y/o buenas prácticas en el riego.

El cultivo de fresa en la zona de estudio es un cultivo anual que se planta en lomos acolchados inicialmente al aire libre que posteriormente son cubiertos por macrotúneles de polietileno. Esta consideración se ha tenido en cuenta en los cálculos de la ET_c que se ha calculado para cada finca de estudio. Los requerimientos de agua en vivero (fuera de la cuenca de estudio), no se han considerado en este trabajo. Debido a

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

que el cultivo se desarrolla en lomos acolchados con plástico dentro de macrotúneles, el agua de lluvia no se ha tenido en cuenta en los cálculos, por ser despreciable como fuente de agua para este cultivo. Es decir, el desarrollo del ciclo del cultivo de fresa en estas condiciones de manejo depende exclusivamente el agua de riego o agua azul.

El cultivo de fresa requiere un volumen de agua importante para la preparación del suelo (AA_s) y durante el proceso de plantación (AA_p), adicional al volumen de agua aplicada durante la campaña para satisfacer los requerimientos hídricos del cultivo. Los volúmenes de agua aplicada durante toda la campaña, desde Agosto a Junio, para cada finca han sido registrados para las tres campañas de estudio.

En la figura 4.1.se muestra para cada finca en las tres campañas de estudio, el volumen de agua aplicada en preparación del suelo y riego de apoyo en plantación (en color azul, m^3/ha) así como el riego registrado para satisfacer la ET_c (color rojo, m^3/ha). También se ha representado el valor de RIS para cada campaña y finca (trazo verde).

De la figura se desprende que el volumen total de agua aplicada (AAT_{azul}) presenta una gran variabilidad con valores que oscilan entre $4500 m^3/ha$ y más de $12000 m^3/ha$. Igualmente hay una gran variabilidad en el volumen de agua aplicada en alomado y plantación con valores que oscilan entre los $400 m^3/ha$ y valores de más de $3000 m^3/ha$. También existe una gran diferencia entre los valores de RIS para el conjunto de fincas, con valores que se encuentran por debajo de 1 y casos en los que el valor de RIS es superior a 2.

En la finca 11, se observa un comportamiento muy diferente en la campaña 2013-2014 con respecto a las dos anteriores. Esta diferencia se ha debido a que en la última campaña la persona encargada del riego dejó la explotación, lo que se tradujo en un aumento muy importante de volumen de agua aplicada, originado en parte por el desconocimiento y/o falta de experiencia del encargado que lo sustituyó, que tendió a aplicar más agua para quedarse del lado de la seguridad.

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

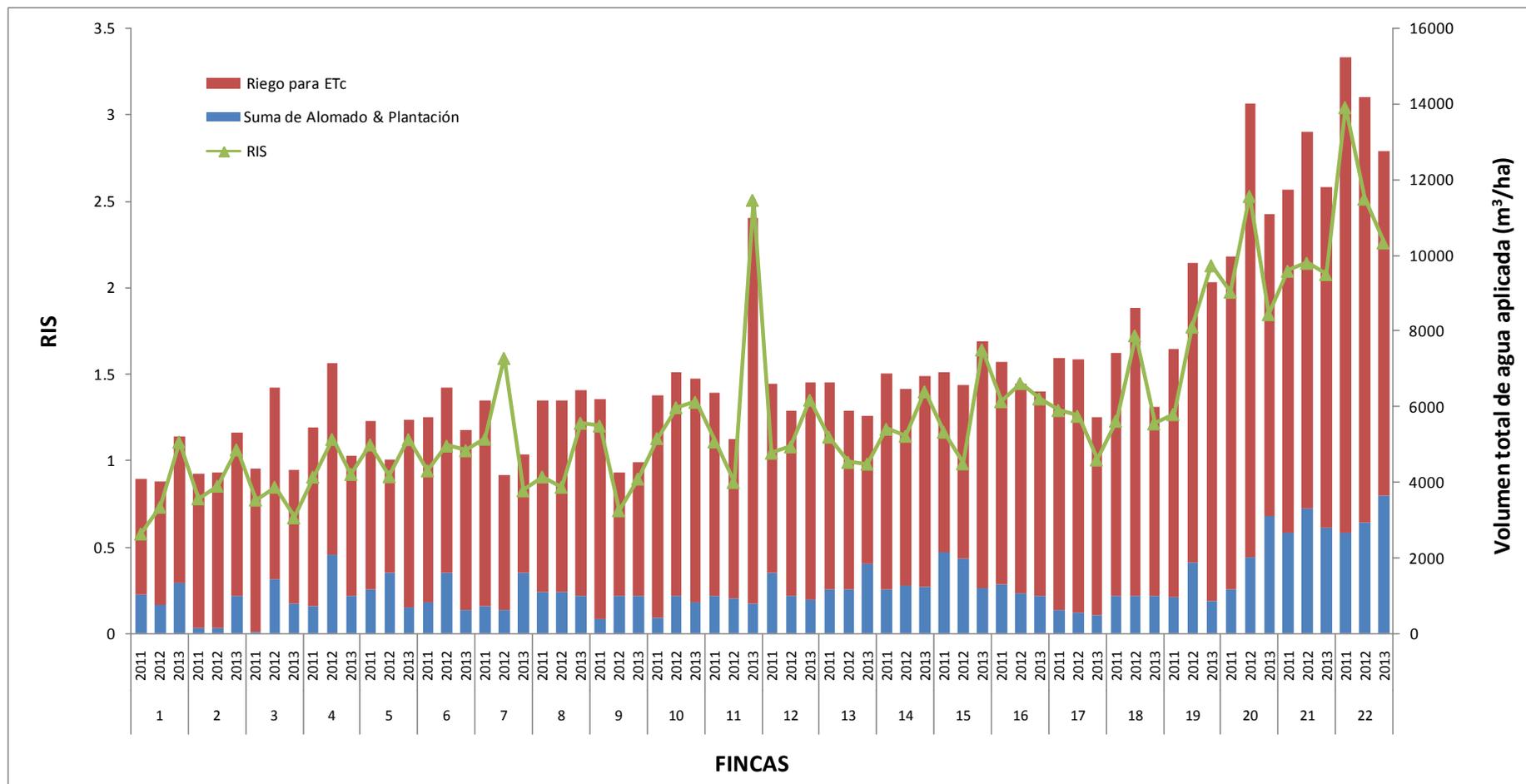


Figura 4.1. Valores de RIS, agua aplicada en alomado y plantación y riego para satisfacer las necesidades del cultivo

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

En la Tabla 4.1 se muestra un análisis estadístico de los indicadores para cada campaña. En los apéndices 9.10, 9.11 y 9.12 se pueden consultar los valores de los indicadores desglosados para cada una de las fincas de estudio en cada campaña.

Los valores de RIS medios obtenidos se encuentran en valores ligeramente superiores al rango óptimo de 1-1,2 a escala anual lo que indica que el riego puede ser considerado como adecuado, aunque el análisis a escala mensual proporciona valores altos de RIS en los primeros meses de campaña que se van reduciendo a lo largo de la misma lo que indica que aún hay margen de mejora en la gestión del riego. Hay que destacar que durante las tres campañas hay al menos tres o cuatro fincas con valores de RIS superiores a 2, lo que indica que se está aplicando más agua de la estrictamente necesaria por el cultivo. Sin embargo el número de fincas que presentan un valor de RIS superior a 1,5 en al menos una campaña asciende a 8, que supone un 36% de la muestra. Se deben evitar valores de RIS elevados que indican tanto una extracción excesiva de agua, como un volumen considerable de aguas de retorno que provocan contaminación difusa por el lixiviado de fertilizantes y otros agroquímicos.

El valor promedio del volumen total de riego aplicado, AAT_{azul} , presenta valores cercanos a los 7000 m³/ha para las tres campañas estudiadas, aunque si bien la variabilidad del indicador entre distintas fincas es muy elevada, con fincas que aplican por encima de los 12000 m³/ha y otras que están próximas a los 4000 m³/ha. Esta elevada heterogeneidad se acentúa en las aplicaciones de agua en las fases previas al cultivo, como son el alomado y plantación, como consecuencia del desconocimiento sobre las necesidades de agua reales en estas etapas, lo que conlleva que cada agricultor aplique más o menos agua según su propia experiencia y la del maquinista que lleva a cabo la labor del alomado. El valor más frecuente de AAT_{azul} se encuentra entre los 6200 y 6500 m³/ha para las tres campañas. De los valores medios registrados de AAT_{azul} se observa que la campaña 2011-2012 presenta el mayor valor de las tres campañas (7222 m³/ha), debido a que fue un año seco con una precipitación media de 324 mm y con mayores tasas de evapotranspiración. El agua aplicada en la campaña 2010-2011 fue muy similar a la aplicada en 2012-2013, aún siendo campañas climatológicamente diferentes, siendo la primera muy húmeda, y presentando la segunda valores cercanos a la media de la zona.

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

Tabla 4.1. Resumen análisis estadístico de los indicadores propuestos para el conjunto de fincas en las tres campañas de estudio.

	RIS			AAT _{azul} (m ³ /ha)			AU _{azul} (m ³ /ha)			HHA _{azul} (m ³ /t)			HH _c (m ³ /t)			Producción (t/ha)		
	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13
Media	1,24	1,28	1,36	6991	7222	6985	4876	4604	4204	118	99	102	79	65	62	69,1	73,2	69,1
Desv. estándar	0,53	0,50	0,50	2504	3009	2524	463	779	415	58	42	39	12	20	12	10,7	11,7	8,8
Máximo	3,04	2,51	2,51	15214	14175	12739	5584	5977	5278	280	220	194	116	110	105	81,4	98,1	82,4
Mínimo	0,58	0,71	0,67	4071	4171	4313	4060	2244	3484	60	53	60	63	30	50	45,4	47,8	50,4
Mediana	1,13	1,11	1,22	6479	6492	6182	4830	4560	4056	102	91	87	78	60	57	62,1	72,8	71,5
Valor más frecuente	1,1	1,1	1,2	6200	6500	6400	5200	4500	4400	90	90	80	80	60	55	61	72	72

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

El indicador de agua usada, AU_{azul} , que nos informa de los requerimientos hídricos del cultivo, presenta valores que oscilan entre los 4204 y los 4876 m^3/ha para las tres campañas de estudio. Las diferencias entre fincas se deben fundamentalmente a la duración que la campaña, que puede variar considerablemente de una finca a otra, habiendo fincas que acaban la campaña a mediados de mayo y otras que continúan hasta mitad de junio.

El valor más frecuente de HH_{azul} ha sido de 80 y 90 m^3/t con valores promedio que oscilan entre los 99 y 118 m^3/ha para el conjunto de las tres campañas de estudio. Se ha observado que en la campaña más seca (2011-2012) con mayores volúmenes de agua aplicada, la huella hídrica del cultivo (HH_{azul}) fue menor (99 m^3/t), debido a que se obtuvieron producciones más elevadas por los mayores niveles de radiación que en las otras dos campañas estudiadas. No se han observado variaciones significativas entre campañas aunque si bien las diferencias de este indicador en la muestra de estudio son muy altas con valores máximos mayores de 200 m^3/t y valores mínimos en torno a 60 m^3/t . La diferencia en estos valores está en gran parte influenciada por la heterogeneidad en los volúmenes de agua aplicados al cultivo entre fincas (AAT_{azul}).

Aldaya *et al.* (2010) estimaron el valor de HH_c en el cultivo de fresa en Doñana en 140 m^3/t mientras otros autores como Adams (2009) la estimaron en 173 m^3/t . Estos valores de huella hídrica los calcularon a partir del valor de agua usada por el cultivo (AU_{azul}), es decir el agua evapotranspirada, tal y como sugiere Hoekstra (2003) en el manual para el cálculo de huella hídrica.

En ese trabajo, se ha calculado el valor de HH_c como se sugiere en la metodología de Hoekstra, y se han obtenido valores medios de 79, 60 y 62 m^3/ha , para las tres campañas respectivamente. Como se puede observar, estos valores son significativamente menores que los aportados por Aldaya *et al.* (2010) y Adams (2011). Esta diferencia puede deberse a que como regla general, los datos de entrada de clima, suelo y características de cultivo que requiere el modelo CROPWAT, se obtienen de bases de datos genéricas o de estadísticas, y raramente particularizados para las condiciones del cultivo de la zona. En este trabajo se han utilizado datos climáticos, de suelo y cultivo registrados a escala de parcela en las fincas de estudio. Estas diferencias justifican las afirmaciones de Montesinos *et al.* (2011), quienes afirmaron que la escala

territorial en la toma de datos es clave a la hora de aplicar los conceptos de agua virtual y huella hídrica.

De este análisis se desprende que existe una diferencia considerable entre los valores medios de HH_c calculada según la definición propuesta por Hoekstra (2003) y la metodología de huella hídrica que se ha propuesto en este trabajo (HH_{azul}) y que nos da un valor más real de la extracciones totales de agua para el cultivo.

Si comparamos el valor de huella hídrica aplicada (HH_{azul}) de la fresa cultivada en Doñana, se observa que es más eficiente en el uso del agua que el mismo cultivo en otros países productores de la Unión Europea, como es el caso de Polonia con $592 \text{ m}^3/\text{t}$ (Adams, 2011). Esto se debe fundamentalmente al carácter intensivo del cultivo en Huelva que obtiene altas producciones ($60\text{-}75 \text{ t/ha}$) con volúmenes promedio de agua aplicada total entorno a $7000 \text{ m}^3/\text{ha}$ de agua azul. Que gran parte de ella proceda del acuífero 27, podría producir un impacto severo sobre la disponibilidad de agua y conflictos con otros usos, a diferencia del agua usada en Polonia que es verde. Aunque por otra parte no se puede olvidar que el agua que es verde hoy, si no se consume, mañana será azul gracias al ciclo del agua.

La producción media para el conjunto de fincas de estudio oscila entre las $62,7 \text{ t/ha}$ para la campaña 2010/11 y las $73,2 \text{ t/ha}$ para las campaña 2011/12. Existe una gran variabilidad en la producción entre las distintas fincas de estudio con valores máximo que oscilan entre 80 y 90 t/ha y valores mínimos de 50 t/ha .

4.4. DISCUSIÓN

4.4.1. Relación entre los indicadores propuestos

La figura 4.2 muestra la relación existente entre los indicadores propuestos. Las líneas continuas conectan las variables o términos intermedios que intervienen en el cálculo de indicadores mientras que las líneas discontinuas relacionan los indicadores de uso y manejo del agua.

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

Una simple comparación entre los indicadores de HH_c y HH_{azul} no es suficiente si lo que se pretende con la aplicación de los indicadores de huella hídrica a un cultivo es identificar los sistemas de producción agrícolas más eficientes. Sin embargo, cuando esta información se analiza junto con otros indicadores del manejo del riego, es posible evaluar la producción agrícola en relación al agua usada, así como el manejo que se ha hecho de esta.

Por tanto, AAT_{azul} da información acerca de cuánta agua se aplica en el proceso de riego (indicador de extracción de agua) mientras que el RIS informa de si el agua se ha aplicado de manera eficiente, relacionándola con las necesidades teóricas del cultivo. Estos indicadores usados de manera conjunta son una herramienta útil y valiosa para el análisis del manejo del riego así como de la producción agrícola obtenida en relación al agua usada.

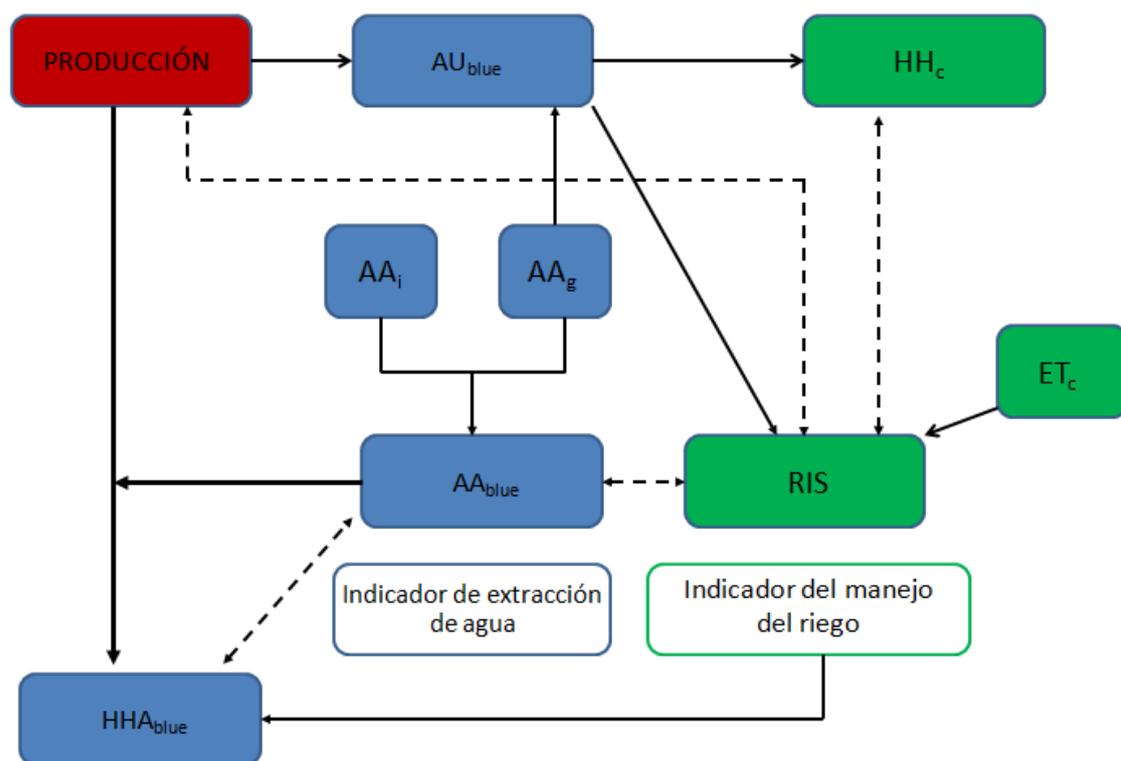


Figura 4.2. Relación entre los indicadores propuestos

Basando el cálculo de huella hídrica en el agua total aplicada en el todo el proceso de riego del cultivo de fresa (AAT_{azul}) obtenemos la huella hídrica aplicada azul (HH_{azul}). Si se utiliza el agua usada azul (AU_{azul}) esta sólo tendría en cuenta el agua

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

aplicada durante la fase de desarrollo del cultivo (AA_g) sin contemplar el agua empleada en las fases iniciales como alomado y plantación (AA_i). Si se emplea este término en el cálculo de huella hídrica se obtiene el valor de huella hídrica consumida (HH_c) que se corresponde con la definición de Huella hídrica de Hoekstra (2003).

Puesto que el fin último de cualquier proceso productivo es la producción, es importante relacionar los indicadores de uso y manejo con ésta última. Las figuras 4.3 (A, B y C) muestran la relación entre los indicadores de huella hídrica, manejo y uso del agua y la producción. La figura 4.3. A) relaciona el indicador de huella hídrica consumida (HH_c , m^3/t) con el RIS, que es un indicador de adecuación del riego adimensional. Las fincas con valores apropiados de RIS, entre 1-1,2, presentan valores de HH_c entre 60 y 80 m^3/t que es el valor promedio de la muestra. En este caso, las fincas que presentan valores de RIS más elevados, es decir que aplican más agua de la que necesita el cultivo, presentan valores de HH_c similares al resto de las fincas. Esto es debido a que en este caso la HH_c evalúa la relación entre al agua usada por el cultivo, es decir la ET_c o necesidades del cultivo, que son iguales para todas las fincas, y la producción, que en esta caso se desprenden que son iguales o parecidas a las del resto de fincas.

La figura 4.3. B) muestra la relación existente entre el agua total aplicada (AAT_{azul} , m^3/ha), indicador de uso y la huella hídrica aplicada ($HH_{A_{azul}}$, m^3/t). Se observa que hay un número importante de fincas con valores de AAT_{azul} entre 6000 y 7000 m^3/ha , intervalo entre el que se encuentra el valor promedio y el más frecuente para la muestra estudiada. Estos valores de AAT_{azul} se corresponden con valores de $HH_{A_{azul}}$ de entre 80 y 100 m^3/t , lo que supone producciones en torno a las 70-75 t/ha. Valores más elevados de AAT_{azul} implican valores mayores de huella hídrica aplicada, con producciones por unidad de superficie igual e incluso inferior a la media.

La figura 4.3. C) relaciona el indicador de manejo del riego (RIS) con la producción que varía desde 45 t/ha hasta más de 90 t/ha en algún caso. Aunque se puede apreciar una gran variabilidad entre fincas, se observa que los agricultores que aplican más agua no obtienen mayores producciones. Por tanto, una mala praxis en el riego, basada en mayores volúmenes de agua aplicada, no se ha traducido en una mayor producción, si no que por el contrario supone una merma en los beneficios como consecuencia del gasto adicional en agua, energía y fertilizantes.

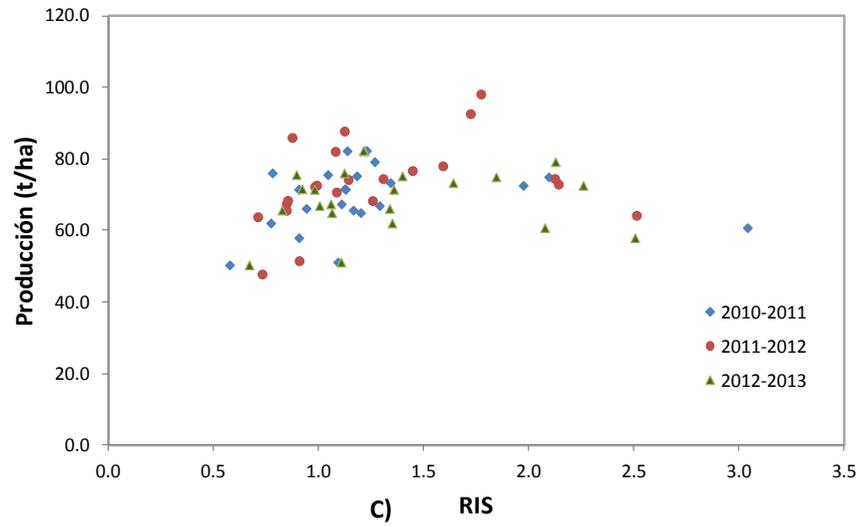
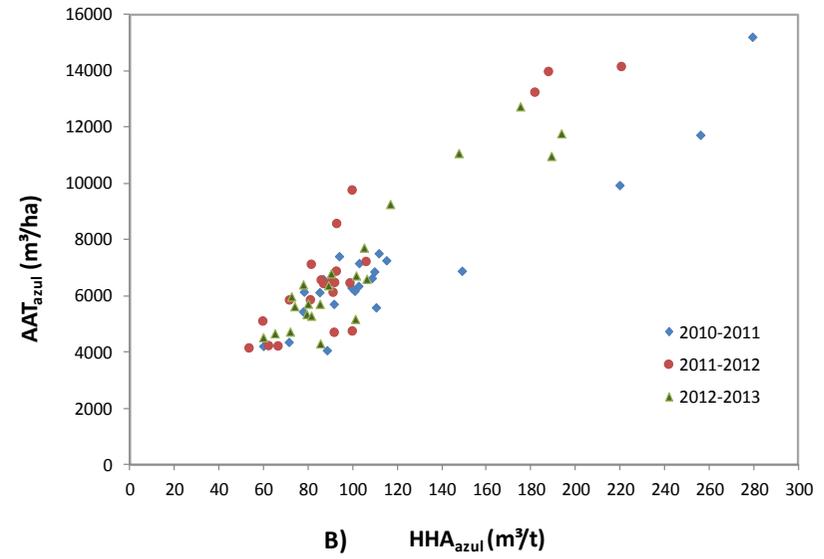
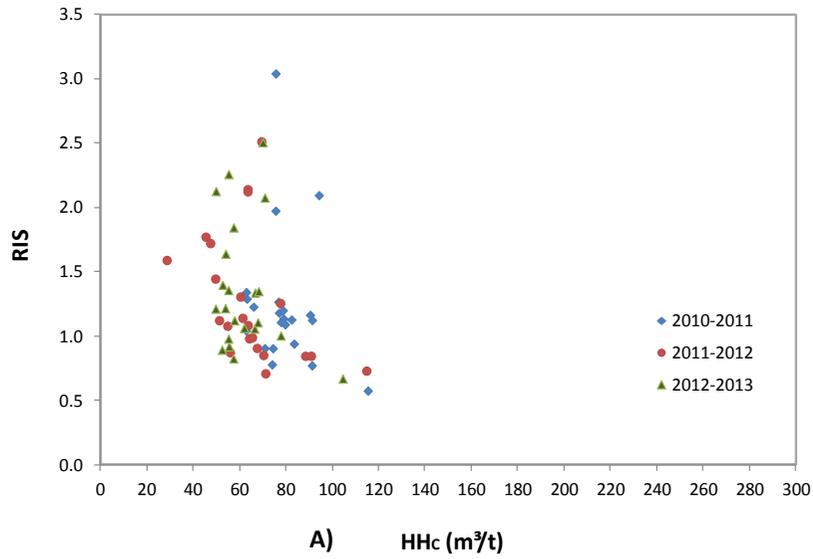


Figura 4.3. Relación entre los indicadores de huella hídrica, adecuación del riego y la producción.

4.4.2. Relación entre el cultivo de fresa y el agua disponible

La tabla 4.2 presenta un resumen del balance de los recursos hídricos disponibles en el entorno de Doñana, presentado en el Plan Especial de Ordenación de la corona norte forestal de Doñana (Junta de Andalucía 2011 y 2014). Se observa que el volumen total de agua disponible asciende a 35,46 Hm³/año, siendo de origen subterráneo y procedente del acuífero 27 un 65% del volumen total disponible y el resto de origen superficial.

Tabla 4.2. Balance de agua disponible y requerida por los cultivos

Volumen agua superficial disponible (Hm ³ /año)	8,17
Volumen de agua subterránea disponible (Hm ³ /año)	23,30
Transferencia de agua en ejecución (Hm ³ /año)	3,99
Volumen total agua disponible (Hm³/año)	≈35,46
Superficie en regadío (ha)	9340,2
- <i>Herbáceos intensivos</i>	5771,8
- <i>Cítricos</i>	1602,3
- <i>Otros frutales</i>	770
- <i>Otros usos de riegos</i>	1196,1
Dotación de agua para cultivos (m³/ha)	
- <i>Herbáceos intensivos</i>	4500
- <i>Cítricos</i>	5400
- <i>Otros frutales</i>	4000
- <i>Otros usos de riegos</i>	1500
Requerimientos de los cultivos (Hm³/año)	≈39,5

Fuente: Plan Especial de ordenación del regadío (Junta de Andalucía, 2014)

4. VINCULACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA CON EL MANEJO DEL RIEGO

El déficit asciende a unos 5-6 Hm³/año, de los que 1 Hm³ aproximadamente corresponde a la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras (2100 ha regables) que se atenderá con el aumento de los caudales concesionales de aguas superficiales. Los 5 Hm³ restantes corresponden a la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir (7240 ha regables), y en el Plan se considera que es un déficit relativo, ya que las extracciones estarán ligadas a la disponibilidad del acuífero, que se explotará según criterios de sostenibilidad.

Se han calculado los indicadores para las tres campañas estudiadas que han sido climatológicamente muy diferentes, siendo la 2010-2011 una campaña húmeda (928 mm), la 2011-2012 seca (324 mm) y la 2012-2013 una campaña con un valor de precipitación cercano a la media de la zona (573 mm). De la tabla 4.1 se desprende que el valor más frecuente de AAT_{azul} de la campaña con valores climáticos medios asciende a 6400 m³/ha, valor intermedio a la campaña húmeda (6200 m³/ha) y la seca (6500 m³/ha). Este valor puede ser representativo del volumen total de agua aplicada en el cultivo de fresa en un año climático medio y en la zona de estudio.

Del total de la superficie regable, 5771,8 ha están dedicadas a cultivos bajo plástico, aunque no se detalla la superficie de fresa en el ámbito del Plan. Del manual de buenas prácticas agrarias sostenibles en Doñana (Fundación Doñana 21, 2006) se deduce que la superficie de fresa en los límites del ámbito es del orden de 4000-4500 ha. Asumiendo el valor más frecuente de AAT_{azul} del año promedio de 6400 m³/ha como dato de referencia, el volumen de agua extraído para satisfacer el cultivo de fresa oscila entre 25,6 y 28,8 Hm³, lo que supone un 65 y 72 % del volumen total de agua disponible en el ámbito del Plan.

Sin embargo si utilizamos el valor más frecuente de agua usada estrictamente por el cultivo (AU_{azul}) para la campaña climática media (4400 m³/ha) el valor de agua total usada por el cultivo de fresa oscilaría entre 17,6 y 19,8 Hm³, lo que supone entre un 44 y un 50 % del total de agua disponible.

La diferencia entre ambos indicadores es de entre 8 y 9 Hm³, que representa el resultado de la ineficiencia del sistema y, por tanto, el volumen de agua que regresa al acuífero por percolación, fluye al mar y/o se evapora a la atmósfera. Con las consideraciones establecidas, entre 8 y 9 Hm³ sería el ahorro máximo potencial de agua

que se podría alcanzar si se llevaran a cabo medidas de conservación del recurso y mejora del riego en el cultivo de la fresa en la zona. La diferencia entre estos dos indicadores, muestra de nuevo la gran diferencia existente en el cálculo de la huella hídrica según la metodología propuesta por Hoekstra (HH_c) y la metodología seguida en este trabajo, donde se utiliza también el volumen total de agua aplicada, obtenida a escala de parcela y que nos da información más real del agua necesaria para obtener las producciones en la zona, extraída localmente para tal uso y las ineficiencias del sistema de captación, distribución y aplicación del agua.

De la evaluación realizada previamente con los indicadores sobre el proceso de riego en la fresa se desprende que los volúmenes de agua aplicada son razonablemente aceptables, para la mayoría de los casos a escala anual. Entonces, la pregunta que surge es: ¿Cuál podría ser una dotación adecuada de riego para el cultivo de fresa? Se pueden plantear diferentes enfoques para resolver dicha cuestión. Las autoridades competentes en la materia han optado por una dotación muy parecida para todos los cultivos en el ámbito del Plan, tal y como se muestra en la tabla 4.2. Sin embargo, la productividad del agua de riego del cultivo de fresa es muy superior si se compara con la de otros cultivos. En un estudio de Salmoral et al. (2011) se estima la productividad aparente del agua para el cultivo de fresa en Doñana en $11,43 \text{ €/m}^3$, mientras que para los cítricos es de $1,04 \text{ €/m}^3$ y para frutales $2,03 \text{ €/m}^3$. Dos de los pilares principales sobre los que se basa la sostenibilidad de una actividad, son la sociedad y la economía. En este sentido, el impacto socio-económico del cultivo de fresa es muy elevado, y debería ser un factor de peso importante a la hora de decidir las dotaciones asignadas a los cultivos.

Los agricultores plantean un enfoque diferente del problema, y están reclamando activamente una dotación mayor para el cultivo. Con los datos disponibles hasta el momento parece claro que con una dotación de $4500 \text{ m}^3/\text{ha}$ para toda la campaña no se podrán satisfacer íntegramente las necesidades totales del cultivo para obtener una producción media de 60-70 t/ha. Si las dotaciones no se revisan, la alternativa de los agricultores será reducir la superficie cultivada para mantener las producciones actuales, o mantener la superficie cultivada actual asumiendo una merma en la producción. Ambos casos llevan asociados una disminución de ingresos para los agricultores y de forma indirecta para la industria auxiliar de la fresa, y por tanto tendrá un impacto socio-económico negativo en su entorno.

Sin embargo, los agricultores deben actuar de manera proactiva ante esta situación, y aún más teniendo en cuenta que en el citado Plan se recoge específicamente que han de desarrollarse medidas de mejora y eficiencia en el uso del agua para disminuir los volúmenes aplicados. En esta línea, los agricultores deben mejorar tanto sus sistemas de riego como el manejo de éste.

4.4.3. Principales ineficiencias detectadas en el proceso de riego y propuestas de mejora.

En un cultivo intensivo como es el de la fresa, y ubicado en un entorno medioambientalmente sensible como el de Doñana, el riego de precisión debería ser el principal objetivo de cualquier productor. Un riego de precisión bien diseñado y manejado puede ayudar a reducir el volumen de agua aplicada, así como el consumo de energía y fertilizantes, disminuyendo el riesgo de contaminación por lixiviados y disminuyendo los costes de producción. Si se consiguen estas premisas, se favorecerá el mantenimiento de los precios de la fresa en los mercados, que cada vez son más exigentes en cuanto a que la producción se lleve a cabo bajo criterios de sostenibilidad.

Ambas partes, Administración y agricultores, deben buscar un consenso en cuanto a las dotaciones para evitar que se produzcan extracciones ilegales de agua. La Administración debería establecer un criterio claro de asignación de recursos en el entorno de Doñana con dotaciones establecidas de forma transparente y asignadas de manera racional acorde a las necesidades reales de los cultivos y sus prácticas agronómicas, así como con la productividad aparente del agua de riego. Además, la Administración debería controlar que no se aplique más agua de la dotación asignada, que no se aumente la superficie máxima dedicada a cada cultivo, mientras que los agricultores deberían minimizar el impacto medioambiental derivado de su actividad. Por estos motivos, un riego de precisión que permita aplicar el volumen exacto de agua en el momento oportuno, debe ser el fin último del riego en este entorno tan peculiar.

El riego de precisión se basa principalmente en el cálculo preciso de las necesidades hídricas de cada cultivo en cada momento, así como de un sistema de riego que permita aplicar el volumen exacto de agua de una manera precisa y uniforme, lo que

dependerá en gran medida de los emisores seleccionados y de la configuración de la propia red de riego. Los agricultores que han tenido menores usos, aplican el agua en pulsos de corta duración a lo largo del día debido a la baja capacidad de retención del agua en el suelo que presentan los suelos extremadamente arenosos de la zona de estudio.

El emisor que más se utiliza en la zona es la cinta de riego, fabricada en polietileno de baja densidad, son emisores no autocompensantes ni antidrenantes, que no parecen ser los más idóneos para aplicar el riego en pulsos de corta duración. Aunque las cintas de riego son baratas y fáciles de instalar, presentan importantes debilidades principalmente vinculadas a su gran sensibilidad a los cambios presión, generando una gran variabilidad en el caudal de los emisores y favoreciendo la obturación de goteros debido a los procesos de succión que se originan cada vez que se drena la tubería al final del riego. Estos aspectos negativos se pueden traducir en una mala uniformidad en la aplicación del riego a lo largo del sector (Martín Arroyo *et al.*, 2013).

Actualmente, los costes correspondientes al sistema de riego y agua aplicada representan tan sólo un 4-5% de los costes totales del cultivo (Adesva, 2010). Es por esto que el sector debe hacer un esfuerzo en actualizar sus sistemas de riego, considerando los costes derivados de ello más como una inversión que como un gasto.

Un riego de precisión también requiere un mayor control tanto de los volúmenes de agua aplicados como de las principales variables hidráulicas, caudal y presión. Para ello, se deberían instalar contadores independientes que permita registrar el agua aplicada a cada cultivo, incluso a nivel de cada hidrante o sector de riego, y que nos permita conocer el volumen total de agua aplicada por periodos a lo largo de la campaña de riego.

El exceso o déficit de riego en un cultivo hortícola de gran valor como la fresa, puede suponer importantes pérdidas en la producción, en términos tanto de cantidad como de calidad del fruto. Por este motivo, es necesario mejorar el proceso del riego en el cultivo de fresa, tanto el sistema de riego como el manejo de éste, con la intención de aplicar la cantidad exacta de agua que necesita cada planta en el momento oportuno,

minimizando de esta forma el agua extraída para riego, evitando las pérdidas por percolación y la contaminación por lixiviados.

4.5. CONCLUSIONES

El indicador de huella hídrica por sí solo tiene ciertas limitaciones. Aunque informa acerca del agua usada para obtener una unidad de producción, no nos informa sobre el manejo del riego y el agua aplicada en las prácticas agronómicas locales.

Por tanto el indicador de huella hídrica debe de emplearse junto a otros indicadores del manejo del riego para que conjuntamente se puedan utilizar como una herramienta de diagnóstico que determine la eficiencia de un sistema agrícola de regadío. Con este objetivo, se ha desarrollado una metodología basada en un conjunto de indicadores como el indicador de huella hídrica (HH_{azul} y HH_c) y el indicador agua aplicada (AAT_{azul}) relacionados con el uso del agua, adaptados a las condiciones de manejo de un cultivo intensivo bajo plástico, y un indicador relativo a la adecuación o manejo del riego ampliamente utilizado como es el suministro relativo de riego RIS.

En este caso particular sobre la fresa en el entorno de Doñana, los indicadores muestran que el manejo del riego es adecuado a escala anual, aunque si bien se observa una gran heterogeneidad entre las fincas estudiadas. En general, los valores del indicador RIS están en valores cercanos a 1,2 lo que indica que los agricultores hacen un uso del riego razonable durante la fase de desarrollo del cultivo. Este aspecto es importante debido a la dificultad de hacer un manejo eficiente del riego en los suelos extremadamente arenosos presentes en la zona de estudio, debido a que presentan muy baja capacidad de retención de la humedad. Sin embargo, hay 8 fincas que tienen valores de RIS por encima de 1,5 para al menos una de las campañas de estudio, y 4 fincas que presentan valores de RIS por encima de 2. Habría que hacer un estudio más detallado en las fincas en cuestión para intentar disminuir los volúmenes de agua aplicada.

El valor más frecuente de AAT_{azul} ha oscilado entre 6200 y 6500 m³/ha para las tres campañas de estudio. Este valor es un 38% - 45% mayor que la dotación propuesta

por la Administración competente de 4500 m³/ha, que parece ser considerablemente menor que las necesidades del cultivo, y que así han hecho saber los agricultores. Sin embargo cuando se calculan los valores de HHA_{azul} se obtienen valores cercanos a los 90-100 m³/t, lo que indica una alta eficiencia en el uso del agua en el sistema de producción de fresa de Huelva si se compara con el valor de este indicador obtenido en otros países productores de la Unión Europea como es Polonia (592 m³/ha). Además el cultivo de fresa presenta una elevada productividad aparente del agua de riego con un valor estimado de 11,43 €/m³ generando más de 50000 empleos directos por campaña. Se pone de manifiesto la importancia de tener en cuenta el impacto socio-económico del cultivo a la hora de asignar los recursos y establecer una dotación para este cultivo.

En la zona de estudio, muy sensible medioambientalmente, la Administración competente, los regantes y los grupos ecologistas deberían encontrar un consenso sobre los criterios de asignación de recursos. Estos criterios deberían tener como principales aspectos a considerar no sólo los medioambientales, sino también los criterios económicos y sociales. Deberían ir encaminados a definir una dotación razonable que permita disminuir las extracciones irregulares o ilegales, potenciando que los agricultores implementen sistemas de riego que les permitan hacer un uso más eficiente del recurso y minimizando el impacto de la actividad sobre los recursos hídricos disponibles.

Las ineficiencias identificadas tanto en el manejo del riego como del sistema de riego deben ser reducidas. Por esta razón, uno de los principales objetivos de los productores debe ser implementar sistemas de riego de precisión diseñados para lograr un manejo óptimo del proceso de riego. Esto implica la elección de los emisores adecuados para el riego en pulsos de corta duración que permitan aplicar las cantidades requeridas de forma precisa. Además se debe hacer un manejo adecuado del riego, que implica definir el pulso óptimo de riego que garantice los requerimientos hídricos del cultivo, minimizando al máximo las pérdidas por percolación.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

5.1. INTRODUCCIÓN

El manejo que se hace del riego, influenciado por las condiciones atmosféricas y de suelo, tiene una gran influencia en el movimiento del agua en el suelo y en el uso de dicho recurso. Una de las herramientas más importantes para desarrollar unas buenas prácticas en el riego es la programación de éste. En ASAE (2007) la programación del riego se define como “el proceso en el que se determina cuándo regar y cuánta agua aplicar, basado en medidas o estimaciones de humedad del suelo o agua usada por la planta”.

El riego por goteo está considerado como uno de los sistemas de riego más eficiente dado que permite tener un mayor control sobre las aplicaciones de agua, fertilizantes y pesticidas. El conocimiento del perímetro de bulbo húmedo que genera es crítico para manejar el sistema de riego por goteo de manera eficiente (Samadianfard, *et al.*, 2012). Para desarrollar todo el potencial de esta tecnología se requiere optimizar los parámetros de operación disponible por el agricultor, como son la frecuencia y duración del pulso, el caudal de descarga, distancia entre goteros y distancia entre líneas (Skaggs, *et al.*, 2004)

Se han desarrollado varios modelos empíricos, analíticos y numéricos para simular el bulbo húmedo y/o dimensiones del frente de humedad bajo un gotero instalado en superficie o enterrado (Philip, 1968, Warrick, 1974, Schwartzman y Zur, 1986, Chu, 1994, Moncef *et al.*, 2002, Cook *et al.*, 2003). Debido al incremento de la capacidad y velocidad de cálculo de los ordenadores, muchos investigadores se han interesado en el uso de estas herramientas para evaluar el movimiento del agua en el suelo en sistemas de riego por goteo así como un manejo óptimo del sistema (Meshkat *et al.*, 1999, Schmitz *et al.*, 2002, Cote *et al.*, 2003, Skaggs *et al.*, 2004, Provenzano, 2007, Kandelous y Šimůnek, 2010, Samadianfard *et al.*, 2012).

Los modelos numéricos son una herramienta útil para analizar la evolución del bulbo húmedo durante el riego a fin de explorar estrategias de manejo del riego por goteo que determinen el tiempo de riego y optimicen la eficiencia del uso del agua. HYDRUS 2D (Šimůnek *et al.*, 1999) es un modelo que permite simular el movimiento del agua, temperatura y solutos en dos dimensiones en un suelo no saturado. La precisión del modelo para simular el movimiento del agua en el suelo ha sido puesta de manifiesto en varios estudios, por ejemplo Šimůnek *et al.* (2008). Skaggs *et al.* (2004) compararon los datos de tamaño de bulbo húmedo de un riego por goteo obtenidos a partir Hydrus 2D con los datos de campo registrados, observando una relación muy estrecha entre los valores observados y simulados.

Es conocido que el volumen de agua aplicada afecta a las dimensiones de bulbo húmedo, pero los estudios de cómo la frecuencia de riego afecta al movimiento del agua bajo un emisor son poco frecuentes y más aún cuando se considera la extracción de agua por las raíces del cultivo. En esta línea se encuadran los estudios realizados por Cote *et al.* (2003) y Skaggs *et al.* (2004), en los que no se tuvo en cuenta la evapotranspiración del cultivo. Ambos concluyeron que la frecuencia del evento de riego (continuo o por pulsos) tenía un efecto muy reducido sobre el tamaño de bulbo húmedo. Sin embargo, Cote *et al.* (2003) comprobaron que la fracción de drenaje después de 100 horas de redistribución se reducía considerablemente cuando se regaba por pulsos. Mermud *et al.* (2005) analizaron el impacto de diferentes programaciones de riego en el balance de agua de un cultivo de cebollas. El resultado mostró que la programación con dos tratamientos de riego semanales en comparación con un riego diario incrementaba la capacidad de almacenamiento del agua en la zona radical, mejoraba la disponibilidad de agua para el cultivo y tenía mayor producción.

El objetivo de esta capítulo es aplicar el modelo numérico Hydrus 2D para estudiar la dinámica del agua en el cultivo de fresa bajo diferentes estrategias de riego. Para ello se ha calibrado el modelo con datos medidos de bulbo húmedo en una urna en laboratorio. Posteriormente se ha simulado el riego que llevan a cabo los agricultores durante las fases de inicio de campaña (noviembre-enero), mediados de campaña (febrero-abril) y final de campaña (mayo-junio) considerando la aplicación de la ET_c , calculada según la metodología propuesta en el capítulo 2 y 3, y se han comparado con otras estrategias de riego orientadas a la reducción de pérdidas de agua por percolación.

5.2. METODOLOGÍA

Aunque el modelo Hydrus-2D no está especialmente concebido para simular el movimiento de agua en el suelo en riego por goteo, permite definir las condiciones de contorno adecuadas para este caso. Existen numerosos precedentes de la utilización del modelo Hydrus-2D para la simulación del movimiento de agua en el suelo en riego localizado. Entre ellos los trabajos realizados por Assouline (2002), Schmitz *et al.* (2002), Ben-Gal y Dudley (2003), Skaggs *et al.* (2004) o Meshkat *et al.* (1999). Este último compara sus resultados con lo que obtiene experimentalmente mediante un lisímetro de pesada, observándose una buena correlación entre los resultados simulados y los experimentales.

En este trabajo se ha utilizado el modelo numérico Hydrus 2D/3D versión 1.0 para estudiar el movimiento del agua en el suelo bajo los emisores. Este software fue desarrollado por Šimůnek *et al.* (2006), y permite simular el movimiento del agua y solutos en dos o tres dimensiones en un medio no saturado. El software es una actualización y mejora de Hydrus-2D (v 2.0) (Šimůnek *et al.*, 1999) y SWMS 3D, que era un programa bajo el entorno del sistema operativo DOS para la simulación del movimiento del agua y solutos en medios no saturados en tres dimensiones (3D) , desarrollado por Šimůnek *et al.* (1995).

5.2.1. Descripción del movimiento de agua en el suelo en Hydrus 2D

La ecuación que gobierna el movimiento del flujo de agua en un suelo no saturado en el modelo es la ecuación de Richards que incluye el término “sumidero” (S) para considerar la absorción del agua por el sistema radicular en función del estrés hídrico y/o salino. Se introduce mediante este término un modelo de respuesta de la planta a la humedad del suelo (Šimůnek *et al.*, 2006). Esta ecuación puede expresarse en dos dimensiones como se muestra en la ecuación 5.1.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad (5.1)$$

En la que θ representa el contenido volumétrico de agua [L^3L^{-3}], h el potencial de presión [L], t el tiempo [T], x la coordenada horizontal, z la coordenada vertical y K es la conductividad hidráulica [$L \cdot T^{-1}$]. En Hydrus el término S representa el volumen de agua extraído por las raíces en la unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo. Para ello emplea una función compleja propuesta por Feddes *et al.* (1978).

El modelo resuelve la ecuación de Richards mediante la función paramétrica de van Genuchten (1980, 1987) que relaciona la humedad y el potencial del suelo mediante la siguiente ecuación:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \cdot h|^n\right]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5.2)$$

donde θ_s es la humedad en saturación del suelo, θ_r es la humedad residual del suelo, K_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo, y m , n y α son valores empíricos que afectan a la forma de la curva de retención y que como simplificación se asume que $m = 1 - (1/n)$.

La conductividad hidráulica no saturada $K(h)$ está representada por la ecuación (Mualem, 1976) mediante la siguiente expresión:

$$K(h) = K_s \cdot S_e^L \cdot \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^m\right]^2 \quad (5.3)$$

donde

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (5.4)$$

donde el término S_e es el contenido de agua adimensional o también llamado contenido de agua efectivo, K_s es la conductividad hidráulica saturada del suelo y L es un parámetro empírico relacionado con la conectividad entre los poros.

El modelo Hydrus-2D resuelve la ecuación de Richards (ecuaciones 1 y 3) sujeta a determinadas condiciones de contorno aplicando el método de los elementos finitos bajo un esquema de Galerkin. El procedimiento de cálculo está explicado en detalle en Šimůnek et al. (1999)

5.2.2. Parámetros hidráulicos

Los términos θ_r , θ_s , α , n , y L que aparecen en las ecuaciones expuestas son los llamados parámetros hidráulicos, valores que determinan la forma de la curva de retención y la conductividad hidráulica, bases de la ecuación del movimiento del flujo en suelo no saturado de Richards. Estos parámetros tienen un significado físico aunque en muchas ocasiones se utilizan meramente como parámetros de ajuste (Arbat Pujolràs, 2005).

θ_r y θ_s representan los límites de humedad entre los que se encuentra la curva de retención. El contenido de agua a saturación (θ_s) puede obtenerse experimentalmente y en teoría su valor coincide con el de la porosidad, pero en la práctica es inferior debido a la presencia de aire atrapado o disuelto. El contenido de agua residual (θ_r) también se puede obtener experimentalmente a partir de la determinación del contenido de agua de una muestra de suelo secada al aire.

Otro punto característico de la curva de retención es el potencial de entrada de aire, que corresponde al valor límite de succión para el cual los poros de mayor tamaño empiezan a perder agua. El parámetro α de la ecuación de van Genuchten está estrechamente ligado a la inversa del potencial de entrada de aire. Un valor alto de α (por ejemplo en suelos arenosos) implica que los suelos se desecan rápidamente ante

pequeños valores de succión, mientras que un valor bajo (por ejemplo suelos arcillosos) indica una desecación lenta a medida que la succión se incrementa. En Carsel y Parrish (1988) pueden encontrarse tabulados los valores de los parámetros de la ecuación de van Genuchten en función de la textura, obtenidos a partir del promedio de un gran número de muestras.

El parámetro n también viene correlacionado con la textura, aumentado a medida que aumenta el porcentaje de arena. La forma de la curva de retención es afectada por el valor de n , reduciéndose la pendiente en su zona central al aumentar el valor de n (aumentar el contenido de arena) lo que se traduce en que a igual aumento de la succión el contenido de agua se reduce más en un suelo de textura gruesas que en un suelo de textura fina.

El parámetro L está relacionado con la conectividad de los poros. Con el objetivo de simplificar la parametrización, se le atribuye el valor de 0,5 obtenido a partir del promedio de los valores determinados para muchos suelos (Mualem, 1976).

El modelo Hydrus 2D requiere de la introducción de los parámetros hidráulicos del suelo objeto de estudio. La obtención de dichos parámetros experimentalmente en laboratorio es costosa, por lo que generalmente se obtienen a partir de las llamadas funciones de edafotransferencia (FET_s).

5.2.3. Funciones de Edafotransferencia

Las funciones de edafotransferencia (FET) se denominan así porque transforman propiedades de los suelos fácilmente medibles en los parámetros hidráulicos del suelo (Schaap *et al.*, 2001).

Se pueden distinguir dos tipos de FET, las que utilizan técnicas estadísticas de regresión y las que utilizan redes neuronales y tratamiento de bases de datos (Vereecken *et al.*, 2008). En las del primer tipo, los parámetros hidráulicos se determinan mediante ecuaciones de regresión lineal y no lineal que relacionan los datos de textura, densidad aparente y/o contenido de materia orgánica (entre otras posibles variables) con valores

de humedad del suelo cuando el potencial es conocido, es decir, ciertos puntos de la curva de retención.

Las redes neuronales no requieren una ecuación de cálculo previamente establecida sino que utilizan procedimientos de calibración iterativos para relacionar las características de los suelos con las propiedades hidráulicas de sus bases de datos.

El modelo ROSETTA (Schaap *et al.*, 2001) está basado en FET de redes neuronales y es un programa ampliamente utilizado en modelización de los parámetros hidráulicos del suelo. Este software utiliza distintas bases de datos dependiendo del grado de detalle y calidad de los datos de entrada sobre características de suelo. Numerosos autores han utilizado el modelo ROSETTA para la estimación inicial de los parámetros hidráulicos de suelo, como Schott *et al.* (2000), Skaggs *et al.* (2004), Poch *et al.* (2005), Jiang *et al.* (2010), Jiménez-Martínez (2010), Kanzari *et al.*, (2012a) entre otros.

Skaggs *et al.* (2004) midieron la distancia al emisor y profundidad de bulbo húmedo obteniendo los parámetros hidráulicos del suelo mediante “Rosetta completo”, es decir, con todos los datos de entrada que requiere (densidad aparente, porcentajes de arena, limo y arcilla, y el contenido de agua a 33 y 1500 kPa) y comparándolo con los parámetros de suelo obtenidos introduciendo sólo la textura de suelo. Comprobaron que la simulación obtenida por el modelo Hydrus con los parámetros de suelo obtenidos con todos los datos de entrada de Rosetta eran iguales que la simulación obtenida a partir de los datos texturales del suelo.

El modelo Hydrus 2D/3D tiene incorporado el modelo ROSETTA (Lite Versión 1.1) para calcular los parámetros hidráulicos del suelo en función de la clase textural de éste.

5.2.4. Parámetros de absorción de agua

La absorción de agua por las raíces está representada en el término S de la ecuación 5.1, base del modelo Hydrus. Este término depende de la profundidad de las raíces y del potencial de absorción de la planta (ecuación 5.5)

$$S(h) = \alpha(h) \cdot S_p \quad (5.5)$$

En esta ecuación S_p es la absorción máxima o potencial y $\alpha(h)$ es la función de respuesta del cultivo al estrés hídrico ($0 \leq \alpha \leq 1$) que representa la reducción en la absorción cuando la planta se somete a estrés por defecto o exceso de agua en el suelo.

Cuando las condiciones de humedad son óptimas, la absorción de agua por las raíces es máxima ($\alpha = 1$) cuando el suelo se encuentra seco o muy húmedo, las plantas se encuentran bajo estrés y las raíces no pueden absorber suficiente agua ($\alpha < 1$), finalmente, cuando la humedad se encuentra por debajo del punto de marchitez o es excesiva, $\alpha = 0$.

El modelo de Feddes *et al.* (1978) que presenta Hydrus postula que α varía linealmente entre los valores extremos de marchitez permanente o saturación donde $\alpha = 0$ y cuando las condiciones de absorción son óptimas con $\alpha = 1$.

5.2.5. Evaporación y Transpiración

El modelo Hydrus 2D requiere como datos de entrada los valores de transpiración y evaporación potencial horaria. No es fácil obtener ambos parámetros por separado, ya que en agronomía generalmente se trabaja con datos de evapotranspiración en su conjunto.

La evaporación, E_p , se puede calcular mediante la ecuación 5.6, que la relaciona con la evapotranspiración potencial o de referencia ($ET_p(t)$) mediante el coeficiente de extinción de radiación (β) y el índice de área foliar (IAF).

$$E_p(t) = ET_p(t) \cdot e^{-\beta \cdot IAF} \quad (5.6)$$

Según Pachepsky *et al.* (2004) y Jiang *et al.* (2010) el coeficiente β adopta un valor de 0,6; sin embargo Jiménez-Martínez (2010) lo sitúa alrededor de 0,4 y Kroes y van Dam (2003) mencionan que dependiendo del tipo de cultivo, el coeficiente puede variar entre 0,4 y 1,1. Los valores de IAF no son valores fáciles de obtener. En el manual de programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español de la estación experimental “Las Palmerillas” (Fernández *et al.*, 2001) proponen estimar el IAF en cobertura parcial ($IAF < 3$) en función de datos diarios de temperatura máxima y mínima según el modelo propuesto por Ritchie y Johnson (1990). Este modelo se basa en la relación entre la tasa de aparición de hojas y el tiempo térmico, y la dependencia del área foliar del número de hojas emergidas. El área foliar por planta se calcula en función del tiempo térmico acumulado desde emergencia o trasplante utilizando una función Gompertz (Ritchie y Johnson, 1990). Por tanto no es fácil obtener valores con un alto grado de precisión por esta vía.

Jiménez-Martínez (2010) en la investigación desarrollada con cultivos anuales concluye que la evaporación y la evapotranspiración se relacionan de acuerdo al estado de desarrollo de la planta, siendo iguales cuando el suelo no cuenta con cobertura vegetal, en la siembra. Cuando la planta alcanza su máximo desarrollo se atribuye el valor cero a la evaporación y se asume que el 100% de la evapotranspiración corresponde a la transpiración. Debido a que el cultivo de fresa se desarrolla en lomos acolchados y dentro de un macrotúnel, podemos considerar que el término de evaporación es nulo y que toda la evapotranspiración se debe a la transpiración de la planta. Aunque esto es una simplificación del modelo, se puede justificar, ya que el cultivo de fresa es un cultivo de invierno, que se planta a mediados de octubre, y en la fase en la que no presenta cobertura completa es la época de menor demanda evaporativa (octubre-enero). A partir de enero la planta se encuentra en plena madurez, entrando en la fase de fructificación y estando el desarrollo foliar muy cerca del 100%, lo que implica que el 100% de la evapotranspiración corresponde al proceso de transpiración de las plantas, más aun considerando que el lomo se encuentra cubierto por plástico.

5.2.6. Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se ha medido el bulbo húmedo en un ensayo llevado a cabo en laboratorio en una urna de metacrilato. La urna tiene unas dimensiones de 70 cm de largo, 50 cm de alto y 5 cm de ancho (figura 5.1).

Sobre la superficie del suelo que se ensaya en la urna se instala un emisor de 5 l.h⁻¹.m, con 5 goteros de 1 l.h⁻¹ distanciados cada 20 cm. Se ha medido el bulbo húmedo generado por uno de los goteros del emisor, es decir un caudal de 1 l.h⁻¹. El agua se suministra mediante un depósito con bomba y regulador de presión para controlar la presión de trabajo del emisor. Con la misma metodología se ha ensayado un emisor de 3 l.h⁻¹.m, compuesto de cinco goteros de 0,6 l.h⁻¹ cada 20 cm.



Figura 5.1. Urna para la medida de bulbo húmedo y elementos auxiliares para la instalación del gotero

El suelo empleado en la urna proviene de una finca comercial de fresa situada en Almonte-Marismas. Se ha cribado para quitarle restos de materia orgánica seca y se ha introducido en la urna en tongadas de 10 cm de espesor. La textura del suelo se determinó en el correspondiente análisis textural realizado por un laboratorio agronómico comercial resultando un 94% de arena, 4% de limo y 2% de arcilla.

Paralelamente, en el modelo Hydrus se ha modelizado una geometría rectangular idéntica a la urna, de 70 cm de largo por 50 cm de alto para simular el flujo vertical en dos dimensiones en el plano (XZ). El perfil está compuesto de una capa homogénea de suelo arenoso de la misma textura que el ensayado en la urna.

Se ha generado una malla para discretizar la geometría en aproximadamente 7017 nodos. La malla es más densa alrededor del emisor, donde el gradiente hidráulico es mayor, y se va haciendo menos densa a medida que nos alejamos del emisor. Se asume que las características hidráulicas del perfil del suelo son homogéneas e isotrópicas, es decir que son iguales en todas las direcciones. En el ensayo se asume que la conductividad hidráulica es uniforme a través del perfil del suelo y en todas las direcciones debido a que el suelo se ha considerado homogéneo y uniforme, y no se han contemplado distintas capas de suelo o que cambie la estructura de éste.

Se ha asumido que las condiciones iniciales de humedad son homogéneas en el perfil de suelo, expresadas en términos de contenido de humedad en el suelo. Los valores adoptados corresponden a los contenidos de humedad en condiciones de capacidad de campo de un suelo con alto contenido de arena, habiéndose fijado el valor de $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para el suelo del ensayo.

En cuanto a las condiciones de contorno se ha considerado la ausencia de flujo en el límite superior excepto en la superficie de contorno del emisor donde se ha considerado un flujo variable (color púrpura) que representa el flujo de descarga del emisor. Se ha considerado la ausencia de flujo en las paredes laterales de la geometría (color blanco). En el límite inferior se ha considerado que puede drenar libremente (color rojo).

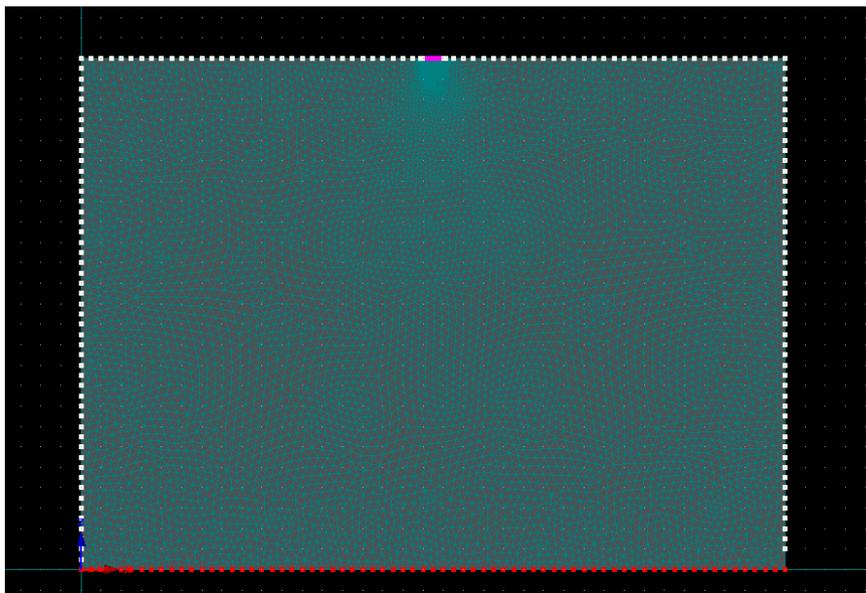


Figura 5.2. Condiciones de contorno y malla generada

Aunque Hydrus-2D/3D v.1 no puede simular flujo superficial procedente de un emisor, debido a que el caudal de descarga excede la capacidad de infiltración del suelo, éste se puede simular aplicando un flujo constante en las condiciones de contorno a una superficie fija que representa el área de infiltración que se consigue en régimen estacionario, una vez que el agua se ha expandido por la superficie del suelo (Böstan, 2011). El radio de esta superficie se calcula considerando que, con un potencial de presión cero, el flujo de agua es igual a la conductividad hidráulica saturada del suelo (ecuaciones de 5.7 a 5.10).

$$q = \frac{Q}{A} \quad (5.7)$$

$$q = K_s \quad (5.8)$$

$$\frac{Q}{L \cdot e} = K_s \quad (5.9)$$

$$L = \frac{Q}{e \cdot K_s} \quad (5.10)$$

donde Q es el caudal (cm³/h), A es la superficie (cm²), K_s es la conductividad hidráulica saturada (cm/día), q es el flujo de agua por unidad de área (cm/día), L es la longitud transversal de infiltración y e, el espaciamiento entre goteros.

5.2.7. Evaluación de la validez del modelo

La validez del modelo se deriva de su capacidad de representar el proceso natural del flujo de agua en el suelo. En este ensayo se han calibrado los resultados obtenidos por el modelo sobre el tamaño de bulbo húmedo que se genera con los registrados en laboratorio.

El modelo Hydrus 2D permite simular el frente húmedo que genera un gotero superficial en una urna. Se ha simulado con el modelo un riego tipo de la zona de 1 hora de duración y se ha registrado el tamaño del bulbo generado cada 5 minutos. En

paralelo, se ha medido en una urna en laboratorio el bulbo que genera el mismo emisor, en el mismo tipo de suelo, a intervalos de 5 minutos hasta una hora. Se ha realizado la comparación de la predicción del modelo (P) y los valores observados (O) mediante diversos índices de la bondad del modelo, que se detallan a continuación.

Fox (1981) y Willmot (1982) recomiendan cuatro expresiones para evaluar la representatividad de un modelo, siendo las más empleadas, el error medio absoluto (MAE, ecuación 5.11) y el error cuadrático medio (RMSE, ecuación 5.12).

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^N |O_i - P_i|}{N} \quad (5.11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N - 1}} \quad (5.12)$$

donde O_i corresponde al dato observado, P_i es el valor de la predicción del modelo y N es el número de datos con que se realiza el cálculo.

Estas dos expresiones, junto al coeficiente de correlación r^2 han sido las más utilizadas por distintos autores para calibrar modelos de simulación del bulbo húmedo Kandelous y Simunek (2010), Samadianfard *et al.* (2012), Skaggs *et al.*, (2004), Bandenay, G. (2013).

En otros autores como McCoy y McCoy (2009), recomiendan además la eficiencia del modelo (E) como medida de la representatividad del modelo (ecuación 13), en la que \bar{O} (con raya) representa la media de las observaciones.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (5.13)$$

5.2.8. Aplicación de las técnicas de simulación para la programación del riego en fresa

Para el riego del cultivo de fresa se utilizan cintas de riego de $5 \text{ l.h}^{-1} \cdot \text{m}$ con 5 emisores de 1 l.h^{-1} distanciados 20 cm. Se dispone de una línea de goteros por cada lomo, que tienen entre 40-50 cm de ancho de coronación. El lomo se encuentra acolchado desde el inicio de la plantación, evitando la evaporación desde la superficie del suelo e impidiendo la infiltración del agua de lluvia en el primer mes de plantación (Octubre), pese a que en las fases iniciales los lomos aún no se encuentran cubiertos por el macrotúnel.

El cultivo se riega y/o fertirriega diariamente desde la plantación hasta final de la campaña, a mediados de mayo o junio. El manejo del riego es muy heterogéneo entre agricultores que realizan pulsos al inicio de la campaña que oscilan entre los 10 minutos y los 40 minutos. El final de campaña estos pulsos de riego oscilan entre los 60 y 180 minutos diarios.

Existe la creencia entre las cadenas de distribución y comercialización de la fresa de Huelva de que se está usando más agua y nutrientes de los que necesita el cultivo, haciendo un uso poco eficiente del recurso y generando un considerable impacto ambiental. En términos generales, a escala de finca el agricultor no dispone de herramientas que permitan hacer una programación del riego adecuada, y en la mayoría de las fincas la programación se hace basada en la experiencia. No es habitual que los encargados del riego consulten la evapotranspiración diaria, para programar el riego a escala diaria, ni que dispongan de herramientas o tecnología para decidir la duración de los pulsos de riego que minimizan las pérdidas por percolación.

Para definir cuál sería el pulso efectivo de riego en cada etapa del cultivo de fresa se ha utilizado el modelo numérico Hydrus 2D.

5.2.9. Simulación numérica con Hydrus.

Para determinar la estrategia de riego óptima para las condiciones de producción de la fresa, se ha simulado el movimiento del agua en un lomo tipo para un periodo de una semana de duración en tres etapas del cultivo claramente diferenciadas, inicio (noviembre-enero), mediados (febrero-marzo) y finales de campaña (abril-junio).

Se ha adoptado una geometría plana, y se ha simulado la mitad de un lomo (figura 5.3). El lomo presenta una profundidad de 50 cm, con una anchura en coronación de 25 cm y de 35 cm en la base. Las condiciones de contorno fijadas han sido flujo variable en una longitud determinada para simular el flujo del emisor (ver apartado 5.2.6), ausencia de flujo en el resto de la geometría, ya que está acolchado con plástico dentro de un túnel y por tanto no influye el agua de lluvia, y drenaje libre en el límite inferior.

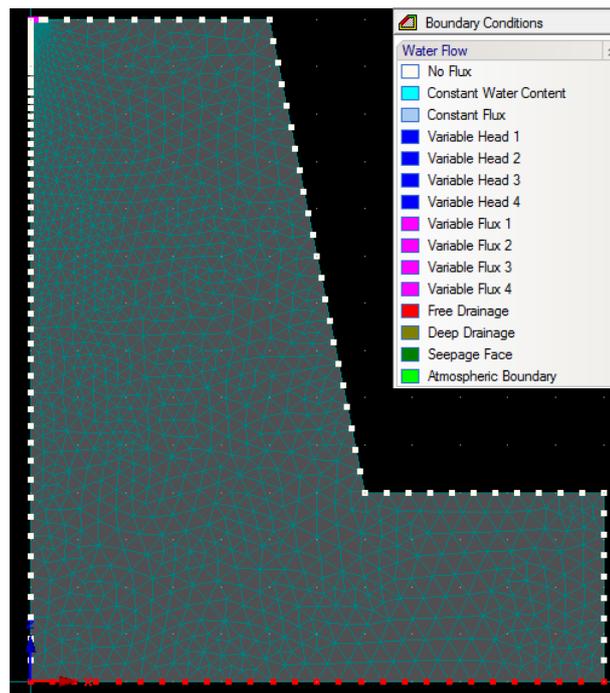


Figura 5.3. Geometría, malla y condiciones de contorno generadas para simulación

Las propiedades hidráulicas de suelo empleadas han sido las mismas que las del suelo utilizado para la calibración del modelo. La textura es 94% arena, 4% limos y 2% arcilla y los principales parámetros hidráulicos son los obtenidos por Rosseta para este tipo de suelo.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

Se ha fijado la profundidad y ancho radicular para cada periodo de cultivo simulado. En la etapa de inicio de campaña se asume que la máxima profundidad radicular se encuentra a 10 cm con la máxima densidad a 5 cm. El ancho máximo de raíces se encuentra a 7 cm con una densidad máxima localizada a 3 cm.

En los meses de mediados de temporada se ha fijado un valor máximo de profundidad radicular de 30 cm con la máxima densidad a 15 cm. El ancho máximo de raíces se encuentra a 15 cm con máxima densidad a 7 cm.

Por último, en los meses de mayor demanda, de abril a junio, se ha fijado la profundidad radicular en 40 cm con la máxima densidad de raíces situada a 20 cm (figura 5.4). El radio máximo de raíces se ha fijado en 20 cm y con la máxima densidad situada a 10 cm. Estos datos están en la línea de los empleados por Gärdenäs *et al.* (2005) para simular el flujo de agua en el cultivo de fresa.

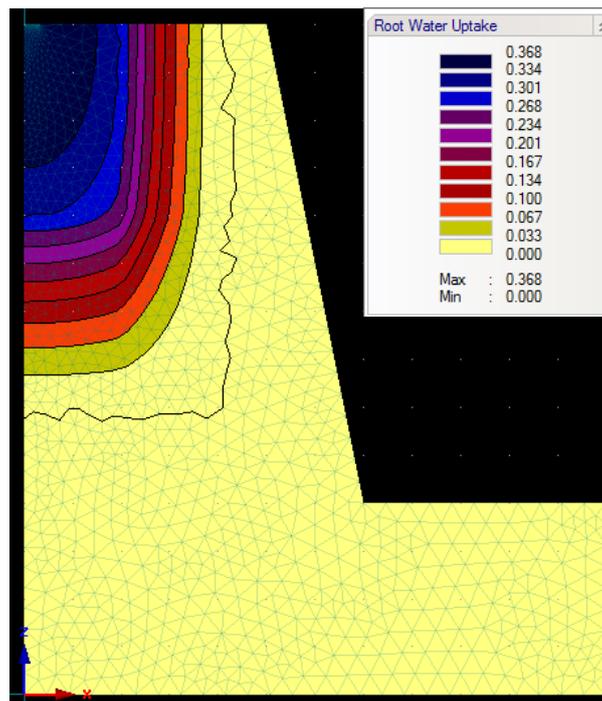


Figura 5.4. Distribución de raíces en el periodo de final de campaña

Hydrus utiliza el modelo de Feddes *et al.* (1978) para simular la absorción del agua por las raíces. El modelo utiliza una base de datos con los parámetros de Feddes para diferentes cultivos, basados en los estudios de Wesseling (1991) y Taylor y

Ashcroft (1972). Estos valores coinciden con los empleados por Gärdenäs *et al.* (2004) para simular el flujo en el cultivo de fresa.

Las necesidades del cultivo se han calculado con la metodología expuesta en el capítulo 3, a partir de los datos climáticos obtenidos en una estación situada en una finca comercial en la zona de estudio. Debido a que el lomo se encuentra acolchado, se ha considerado que toda la evapotranspiración es debida a la transpiración de las plantas (Jiménez-Martínez, 2010). Igualmente no se considera que la lluvia influya en el contenido de humedad del suelo debido a que el cultivo se desarrolla en lomos acolchados bajo túnel.

Se ha simulado el flujo en intervalos horarios en periodos de una semana. Se han simulado tres periodos bien definidos en el cultivo de fresa y similares en cuanto a demanda evaporativa. Desde la plantación hasta enero, se produce la formación de botones florales y la floración en una época con valores bajos de ET_c . En febrero y marzo comienza la fase de fructificación con valores de ET_c que van creciendo de manera muy suave hasta marzo. A partir de abril y hasta finales de campaña las necesidades del cultivo aumentan considerablemente.

Hydrus requiere como dato de entrada la transpiración horaria en cm/hora, datos difíciles de medir u obtener experimentalmente. Se ha estimado el valor diario promedio de la ET_c para una semana del mes de diciembre (inicio de campaña), para una semana del mes de marzo (mediados de campaña) y mayo (final de campaña). Para calcular los valores de ET_c horaria, se ha asumido que la evapotranspiración sigue el mismo patrón de distribución que la radiación solar, que se ha registrado con la estación agroclimática situada en campo. El contenido inicial de agua se ha fijado para todo el perfil en $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, cercano a capacidad de campo para un suelo con alto contenido en arena, como puede ser un suelo arenoso, arenoso-franco, o franco-arenoso.

Las características típicas de la humedad volumétrica del suelo que se han considerado, como son capacidad de campo y punto de marchitez permanente, para un suelo con alto contenido en arena son las recogidas en el manual de evapotranspiración de los cultivos, FAO 56. (Allen *et al.*, 2006). Para un suelo arenoso la humedad a capacidad de campo (θ_{cc}) se fija entre $0,7-0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, y la humedad del punto de

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

marchitez permanente (θ_{PMP}) entre $0,02$ y $0,07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Estos intervalos para un suelo arenoso franco son $0,11$ - $0,19 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $0,03$ - $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ respectivamente.

Estos datos de humedad son coherentes con los dados por Charlesworth (2000) en el manual sobre registro de humedad en suelo mediante sensores, en los que fijan para un suelo arenoso las humedades a capacidad de campo en $0,17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y en $0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para marchitez permanente. Se ha considerado un intervalo apropiado de humedad en el suelo de entre $0,15$ y $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para el perfil en el que se desarrollan las raíces.

El bulbo húmedo se genera con el modelo para un determinado evento de riego así como la evolución del frente de humedad con el tiempo, como se observa en la figura 5.5.

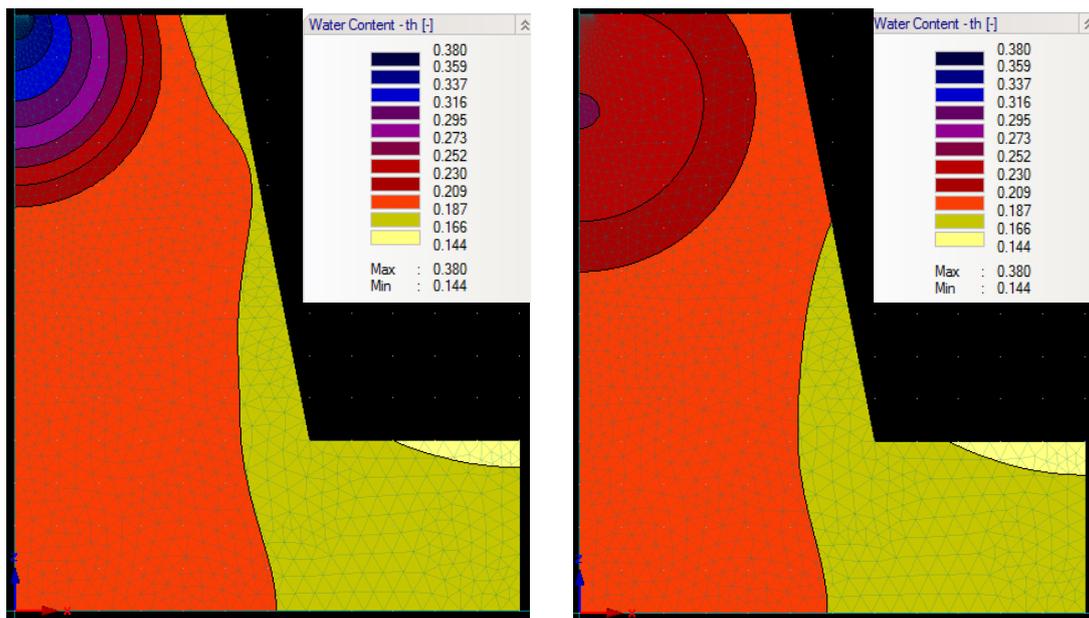


Figura 5.5. Simulación con el modelo de un pulso de riego y de la redistribución de la humedad.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Calibración del modelo mediante medidas del bulbo húmedo en urna

El caudal del emisor más empleado en la zona de 5 l.h⁻¹.m, está compuesto de cinco goteros de 1 l.h⁻¹ cada 20 cm. También es frecuente encontrar emisores de menor caudal, que están en torno a los 3 l.h⁻¹.m, compuestos de cinco goteros de 0,6 l.h⁻¹ espaciados 20 cm.

Para los cálculos se ha utilizado un suelo arenoso que presenta un 94% de arena, un 4% de limos y un 2% de arcilla. Se ha utilizado el modelo Rosseta Lite v. 1.1 (June 2003) incorporado en Hydrus para calcular los parámetros hidráulicos del suelo a partir de la textura del suelo (figura 5.6).

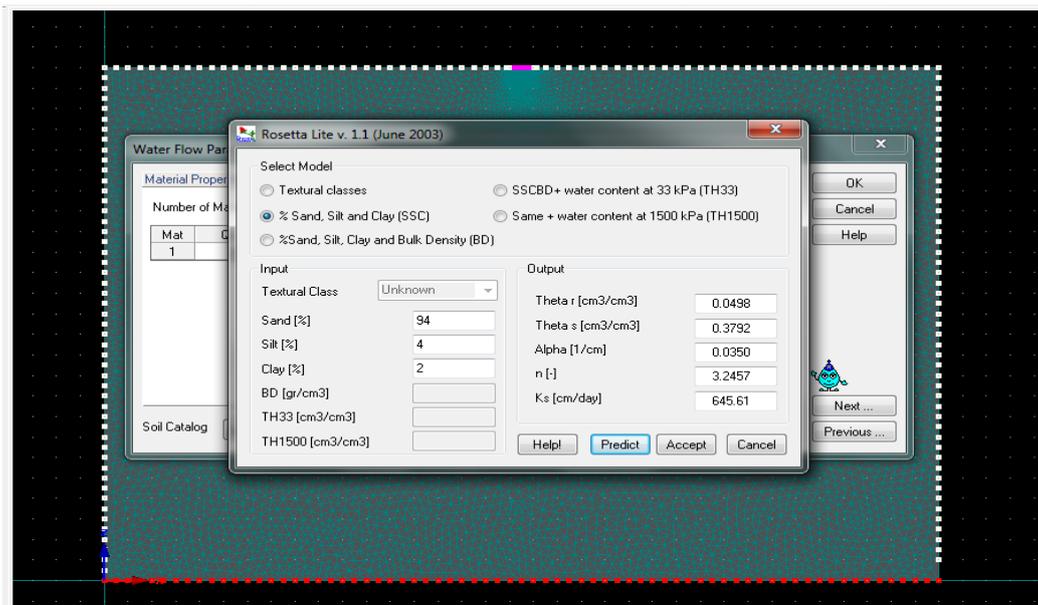


Figura 5.6. Modelo Rosetta Hydrus 2D/3D

Tabla 5.1. Parámetros hidráulicos de suelo

Parámetros hidráulicos del suelo obtenidos con ROSETTA					
θ_r	θ_s	α	η	K_s	L
0,0498	0,3792	0,035	3,2457	0,44834	0,5

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

El valor de la conductividad hidráulica saturada es $K_s = 645,61 \text{ cm/día}$, que equivale a $26,9 \text{ cm/hora}$ ó $0,4483 \text{ cm/min}$. A partir de estos datos y las ecuaciones de 5.7 a 5.10, podemos obtener el flujo y el radio o longitud transversal de infiltración.

Para un caudal de 1 l.h^{-1} ó $1000 \text{ cm}^3/\text{h}$ ó $16,6 \text{ cm}^3/\text{min}$ los valores de K_s y del avance del frente húmedo, L , son:

$$K_s = 645 \frac{\text{cm}}{\text{día}} = 268,75 \frac{\text{mm}}{\text{h}} = 0,448 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (5.14)$$

$$L = \frac{16,6 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{0,448 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \cdot 20\text{cm}} = 1,86\text{cm} \quad (5.15)$$

Para un caudal de $0,6 \text{ l.h}^{-1}$ ó $600 \text{ cm}^3/\text{h}$ ó $10 \text{ cm}^3/\text{min}$ el flujo, los correspondientes valores de K_s y L son:

$$K_s = 645 \frac{\text{cm}}{\text{día}} = 268,75 \frac{\text{mm}}{\text{h}} = 0,448 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (5.16)$$

$$L = \frac{10 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}}{0,448 \frac{\text{cm}}{\text{min}} \cdot 20\text{cm}} = 1,12\text{cm} \quad (5.17)$$

Los resultados del modelo y los obtenidos en la urna para un caudal de 1 l.h^{-1} y $0,6 \text{ l.h}^{-1}$ se muestran en las figuras 5.7 y 5.8 respectivamente.

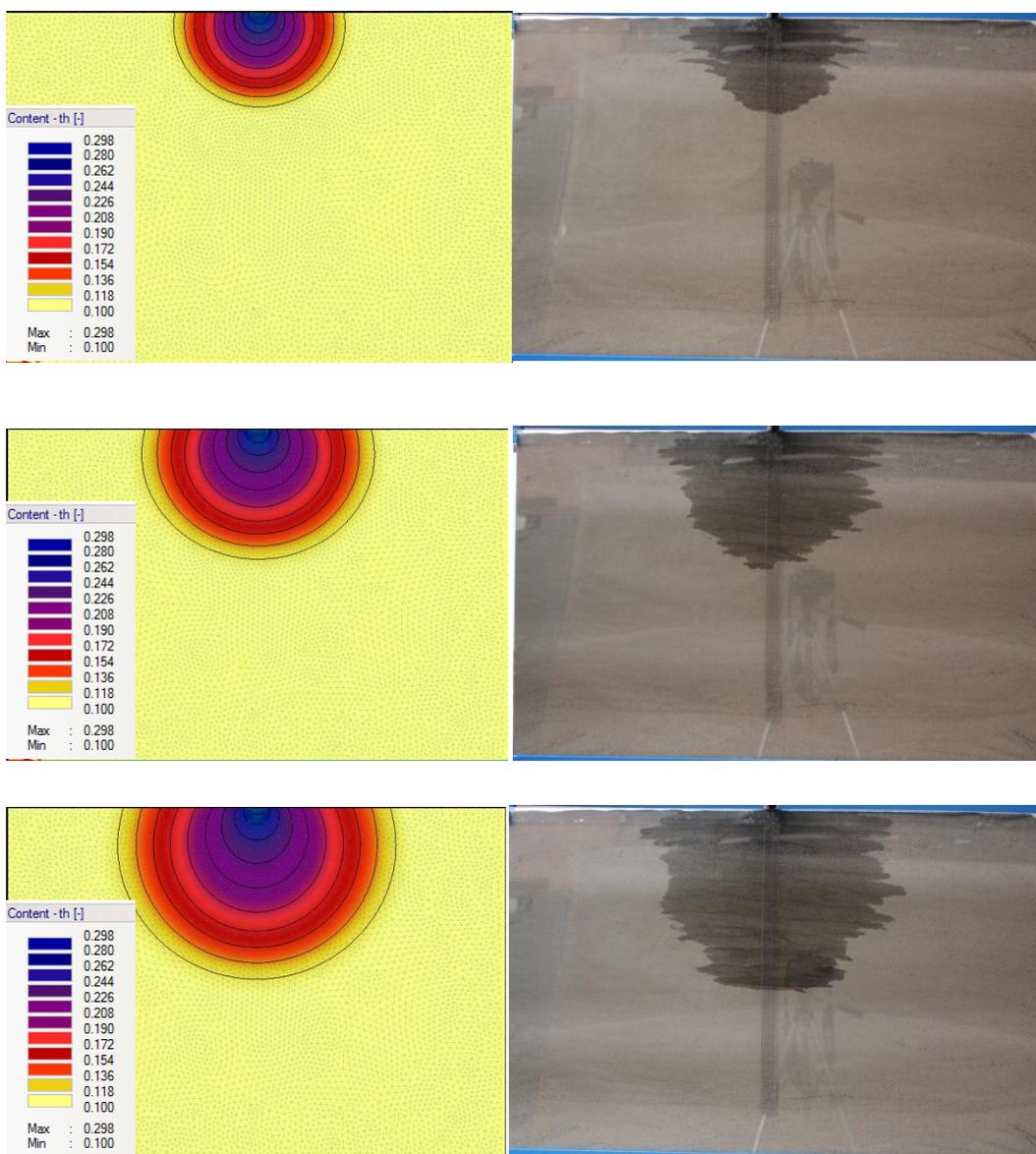


Figura 5.7. Bulbo húmedo generado con gotero de caudal 1 l.h^{-1} obtenido en Hydrus y en urna

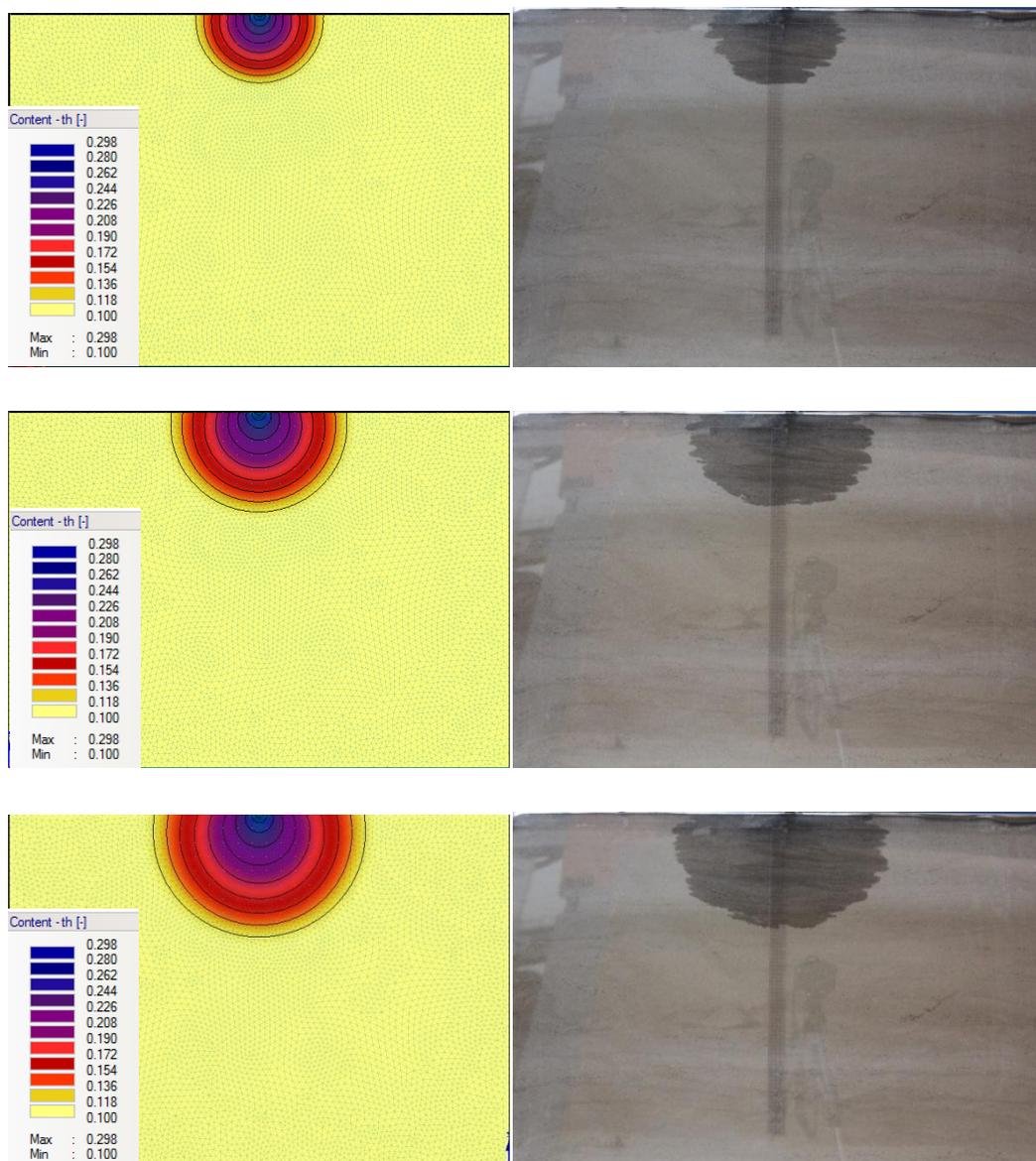


Figura 5.8. Bulbo húmedo generado con gotero de caudal $0,6 \text{ l.h}^{-1}$ obtenido en Hydrus y en urna

5.3.2. Evaluación de la validez del modelo

El ajuste del modelo a las medidas reales de evolución del bulbo húmedo en la fase de calibración se ha calculado utilizando las expresiones citadas en metodología, como son el error medio absoluto (MAE), el error cuadrático medio (RMSE), la eficiencia del modelo (E), y el coeficiente de determinación (r^2).

Tabla 5.2. Índices de eficiencia de la calibración del modelo

	MAE	RMSE	E	r^2
Distancia radial (Emisor 1 l.h ⁻¹)	1,7	2,1	0,88	0,980
Distancia radial (Emisor 0,6 l.h ⁻¹)	0,62	0,86	0,97	0,990
Distancia vertical (Emisor 1 l.h ⁻¹)	0,45	0,62	0,98	0,988
Distancia vertical (Emisor 0,6 l.h ⁻¹)	1,17	1,49	0,98	0,985

Los valores obtenidos son similares a los obtenidos por otros autores. Kandelous *et al.* (2010) presenta valores de RMSE para dimensiones de bulbo húmedo entre 2,1 y 3,87 cm para calibraciones hechas con datos de campo y entre 0,98 y 4,36 cm para calibraciones realizadas con datos medidos en laboratorio. En ambos casos presenta valores de r^2 entre 0,94 y 0,99.

Otros autores como Samadianfard *et al.* (2012), han obtenido valores de error medio cuadrático en la estimación del radio y profundidad de bulbo húmedo de 2,8 y 4,94 respectivamente, obteniéndose valores de r^2 de 0,99.

En la figura 5.9 se muestra gráficamente la relación obtenida entre los valores observados en el ensayo en urna y los valores obtenidos con la simulación del modelo.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

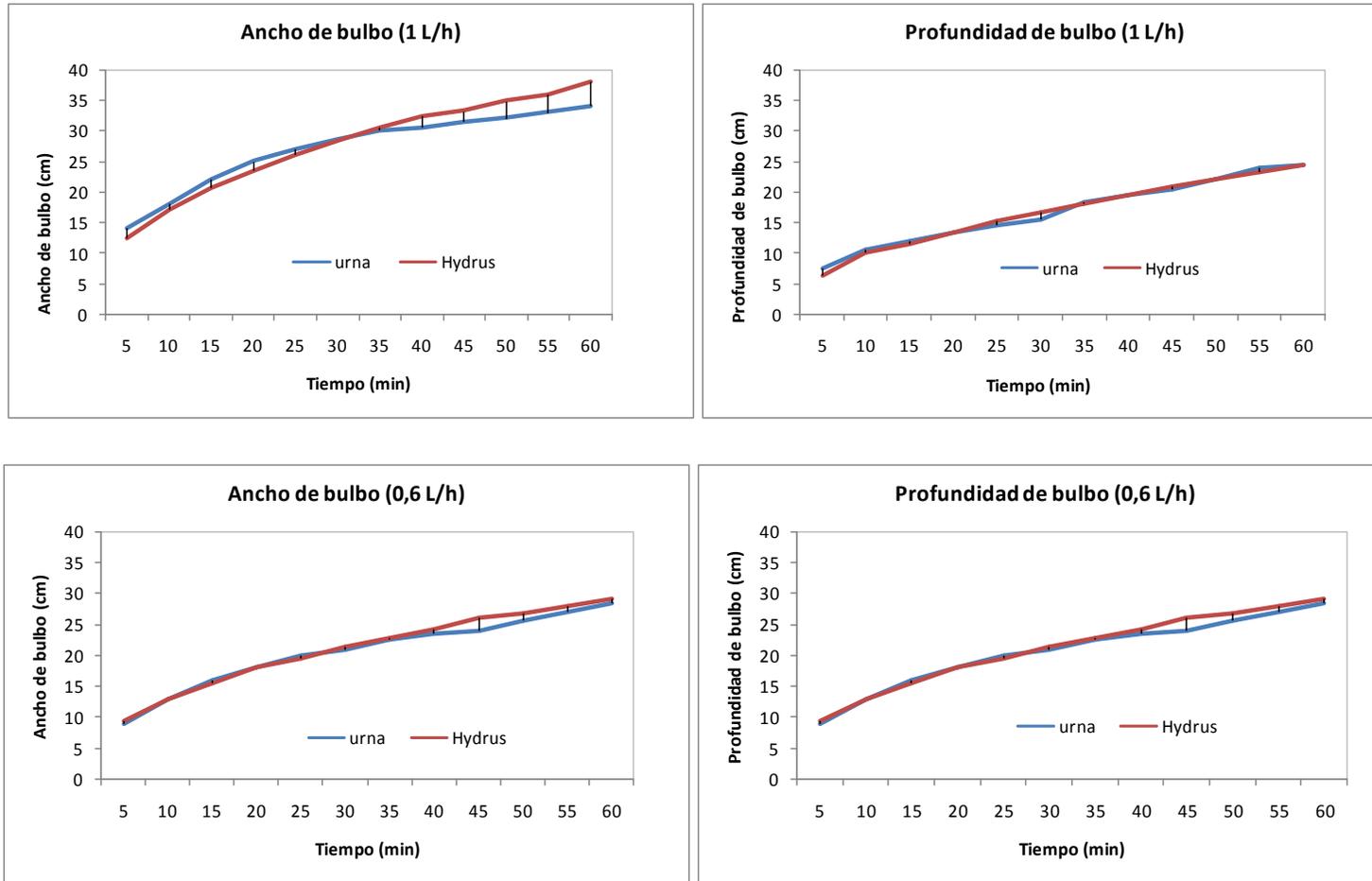


Figura 5.9. Relación entre los valores observados en urna y la predicción del modelo para ancho y profundidad de bulbo en gotero de 1 l.h^{-1} y $0,6 \text{ l.h}^{-1}$

5.3.3. Resultados de las simulaciones

Se han simulado tres etapas o periodos del cultivo claramente diferenciados.

5.3.3.1. Etapa de inicio de campaña

Las necesidades hídricas del cultivo en esta etapa, desde noviembre hasta enero, oscilan en torno a 1 mm/día. Debido a que los valores medios de ET_c en esta etapa son muy bajos y unidos al hecho de que las plántulas en esta fecha tienen muy poco desarrollo vegetativo y radicular, no se ha considerado la ET_c en la evolución de la humedad del suelo.

En esta etapa no se incluye el mes de octubre por diversos motivos. En este mes se realiza la plantación, con fechas de plantación que pueden oscilar a lo largo de todo el mes, y que en términos generales suele ser un mes cálido. Durante la plantación, se realizan riegos de apoyo con microaspersión para mantener la humedad y evitar la deshidratación de la plántula que procede de viveros del norte de España con temperaturas más bajas en esta fecha. Esto implica que el riego por cinta esté condicionado por el riego que se haga en superficie.

El tiempo de riego necesario para satisfacer las necesidades del cultivo oscila entre los 10 y 20 minutos en este periodo para una cinta de riego de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$. De los datos de campo registrados se desprende que hay un número considerable de agricultores que en esta etapa aplican tiempos de riego que oscilan entre los 20 y los 40 minutos de duración con cintas de riego de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$.

Se han simulado con Hydrus dos pulsos de riego para satisfacer las necesidades del cultivo de 10, 20 minutos y un pulso típico registrado en campo de 40 minutos, para conocer el bulbo que se genera (figura 5.10). En esta etapa se han considerado que las raíces alcanzan una profundidad de 10 cm con la máxima densidad radicular a 5 cm, y un ancho radicular de 7 cm con el máximo a 3 cm.

De la figura 5.10 se desprende que el bulbo húmedo que generan tanto el pulso de 10 minutos como el pulso de 20 minutos supera los 10 cm en el perfil del suelo, que es la profundidad máxima de raíces que se ha considerado en esta fase. Además se

observa que se mantiene la humedad en el perfil del suelo por debajo de la zona radicular hasta la base del lomo. En la figura 5.11 también se observa que en los pulsos de 10 y 20 minutos el agua llega claramente a los 12 cm de profundidad que es donde se encuentran las raíces en esta época de la campaña. Del análisis de las oscilaciones en la humedad de agua en el suelo, se observa que en el pulso de 20 minutos el agua alcanza claramente los 25 cm de profundidad, mientras que en el de 10 minutos dichas oscilaciones no son tan acusadas. No se observan cambios en el contenido de humedad a 40 cm en ninguno de estos pulsos, lo que indica que no se está produciendo percolación.

En las gráficas 5.11 se observa que el pulso habitual en la zona de 40 minutos a principio de campaña tiene una duración excesiva, generando un bulbo húmedo cercano a los 20 cm de profundidad, mayor que la profundidad radicular. Se comprueba que el pulso de 40 minutos alcanza claramente los 25 cm de profundidad en el lomo y alcanzando incluso los 40 cm de profundidad, facilitando la acumulación de agua en los perfiles más profundos y la pérdida de agua por percolación.

De este análisis se desprende que el pulso efectivo de riego en esta primera fase de la campaña comienza con un tiempo de 10 minutos y se irá incrementando hasta un máximo de 20 minutos a medida que las plantas se va desarrollando y las raíces van creciendo.

5.3.3.2. *Etapas de mediados de campaña*

Se ha considerado que esta etapa contempla los meses de febrero y marzo en los que la demanda evaporativa va aumentando. El valor de ET_c promedio para las tres campañas de estudio dentro de invernadero, en esta etapa, asciende a 2,5 mm/día. Se ha desagregado este valor diario en valores horarios a partir de la curva de radiación solar para este periodo.

El tiempo de riego óptimo estimado en esta etapa oscila entre los 20-40 minutos diarios para una cinta de riego de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$. Los tiempos de riego empleados por los agricultores en esta época del año se acercan a 1 hora, e incluso superiores, para las cintas de riego típicas de la zona de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

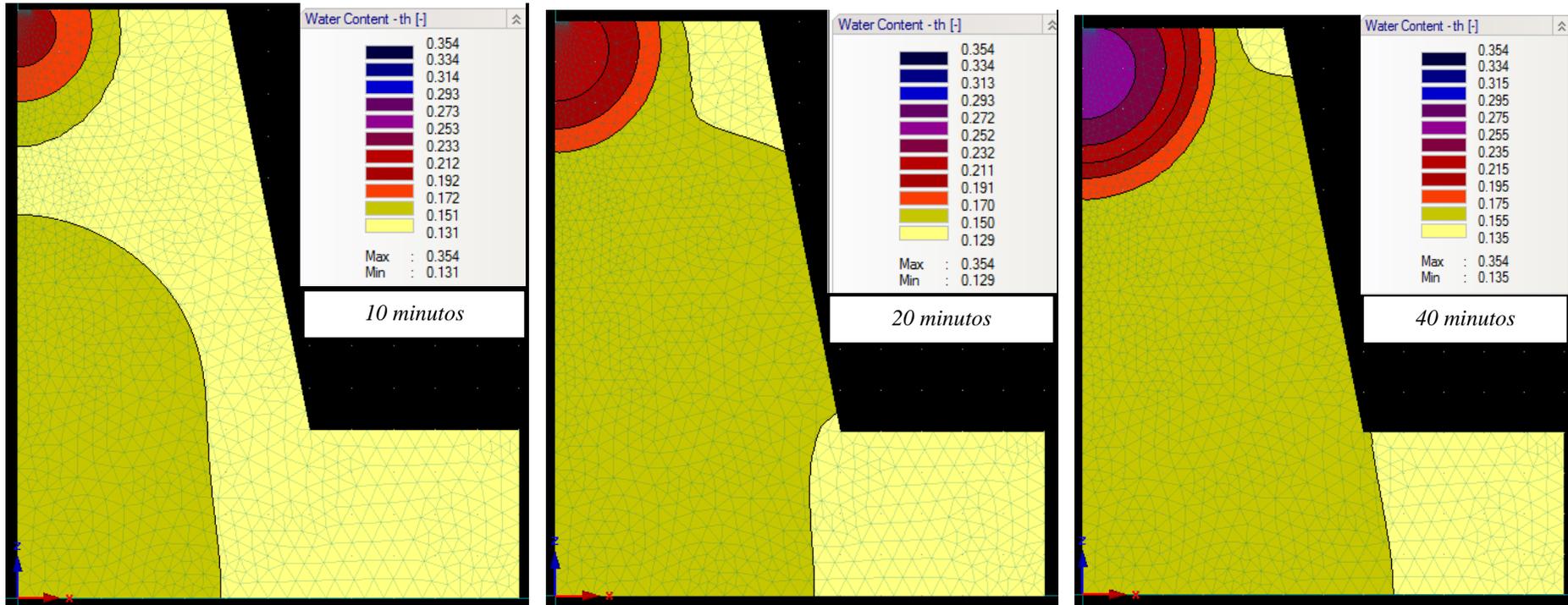


Figura 5.10. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3) al final del último evento de riego para un pulso de 10, 20 y 40 minutos.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

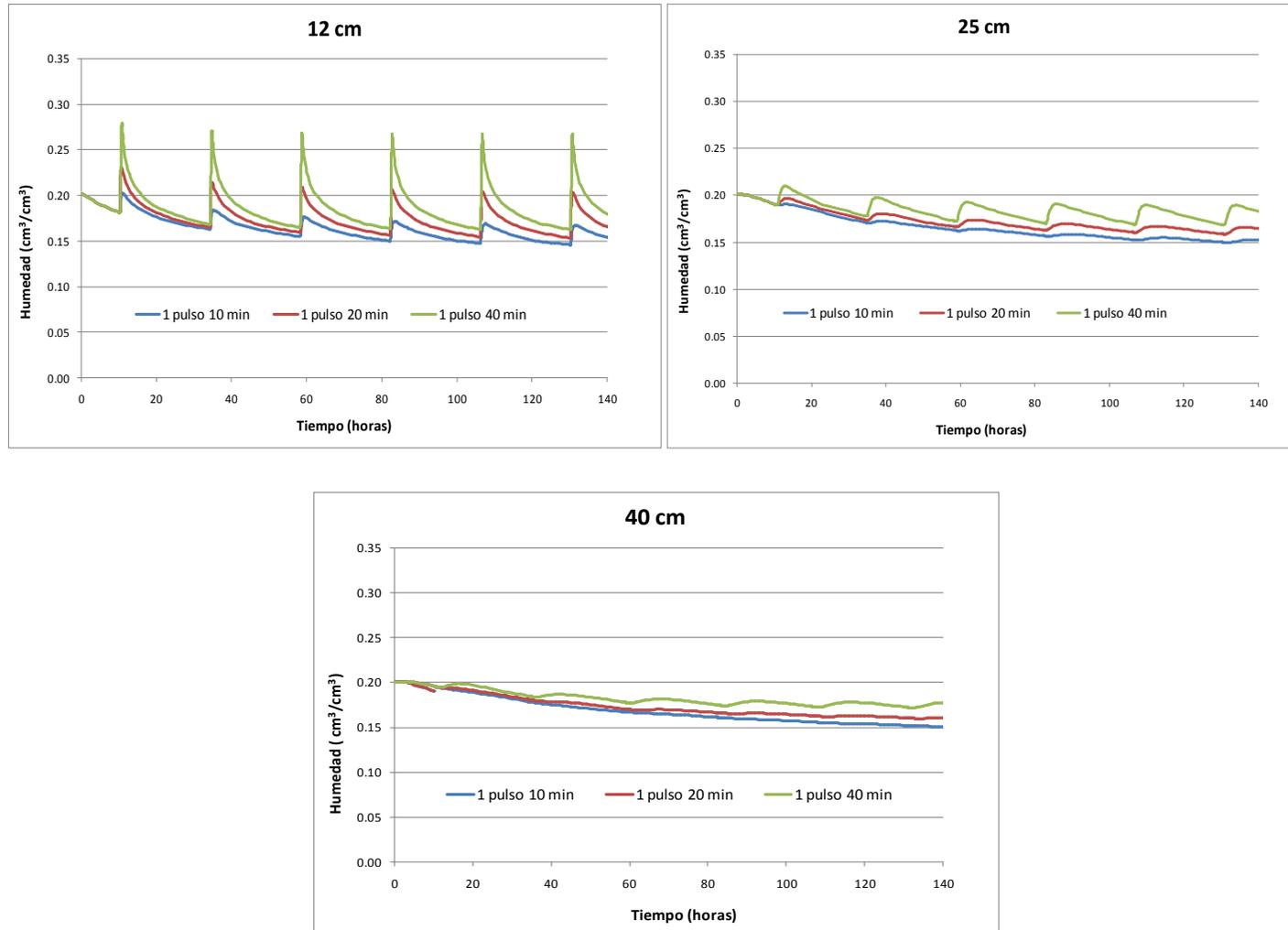


Figura 5.11. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para los pulsos de 10, 20 y 40 minutos de duración

Se han simulado con Hydrus los bulbos que generan y la distribución de la humedad de un pulso de 30 minutos, de dos pulsos de 20 minutos (para aplicar la ET_c) y de un pulso de 1 hora (riego excedentario).

En esta etapa se ha considerado que la máxima profundidad radicular es de 30 cm con su máxima intensidad a 15 cm. El ancho máximo de raíces es de 15 cm con la máxima intensidad a 7 cm. El objetivo en esta etapa es que la humedad se concentre en los primeros 25-30 cm de suelo, y por tanto el pulso de riego debe ser registrado levemente a 25 cm de profundidad y que no se registre a 40 cm. De la figura 5.12 se observa que el pulso de 30 minutos genera un bulbo húmedo que alcanza los 20 cm de profundidad, algo más somero que el riego en dos pulsos de 20 minutos. Tras el evento de riego, tiene lugar un proceso de redistribución de la humedad en el suelo, generándose una continuidad entre la humedad del bulbo y la humedad existente en los estratos más profundos. El riego de una hora de duración genera un bulbo de mayores dimensiones, con humedad en superficie muy por encima de capacidad de campo, facilitando el incremento de humedad en los perfiles más bajos y favoreciendo la pérdida de agua por percolación.

Se observa (figura 5.13) que el pulso de 30 minutos se registra a 25 cm pero de manera liviana, mientras que el riego de 2 pulsos de 20 minutos se registra con mayor claridad a esta profundidad. Sin embargo, estos pulsos no alcanzan los 40 cm de profundidad, donde la humedad permanece constante. El pulso de 1 hora se registra claramente a la profundidad de 40 cm con lo que se está favoreciendo la pérdida de agua por percolación.

En esta etapa el pulso efectivo de riego comienza con tiempos de riego cercanos a los 20-30 minutos que se pueden ir incrementando hasta 40 minutos a medida que aumentan las necesidades hídricas del cultivo y se va desarrollando el cultivo. Ese tiempo de riego se puede aplicar en un pulso, o preferiblemente en varios pulsos ya que de esa forma se mantiene la humedad en torno a un valor más constante en el tiempo en la zona radicular.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

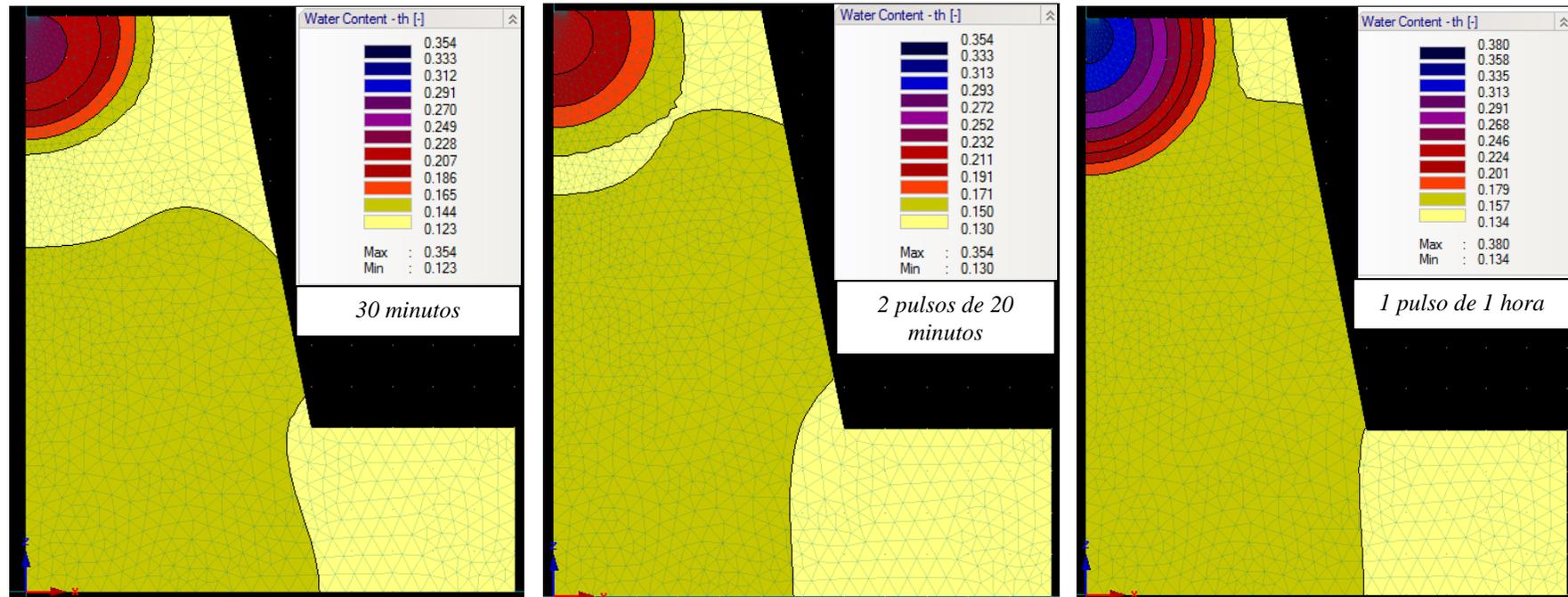


Figura 5.12. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3) al final del último evento de riego para un pulso de 30 minutos, dos pulsos de 20 minutos y un pulso de 1 hora.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

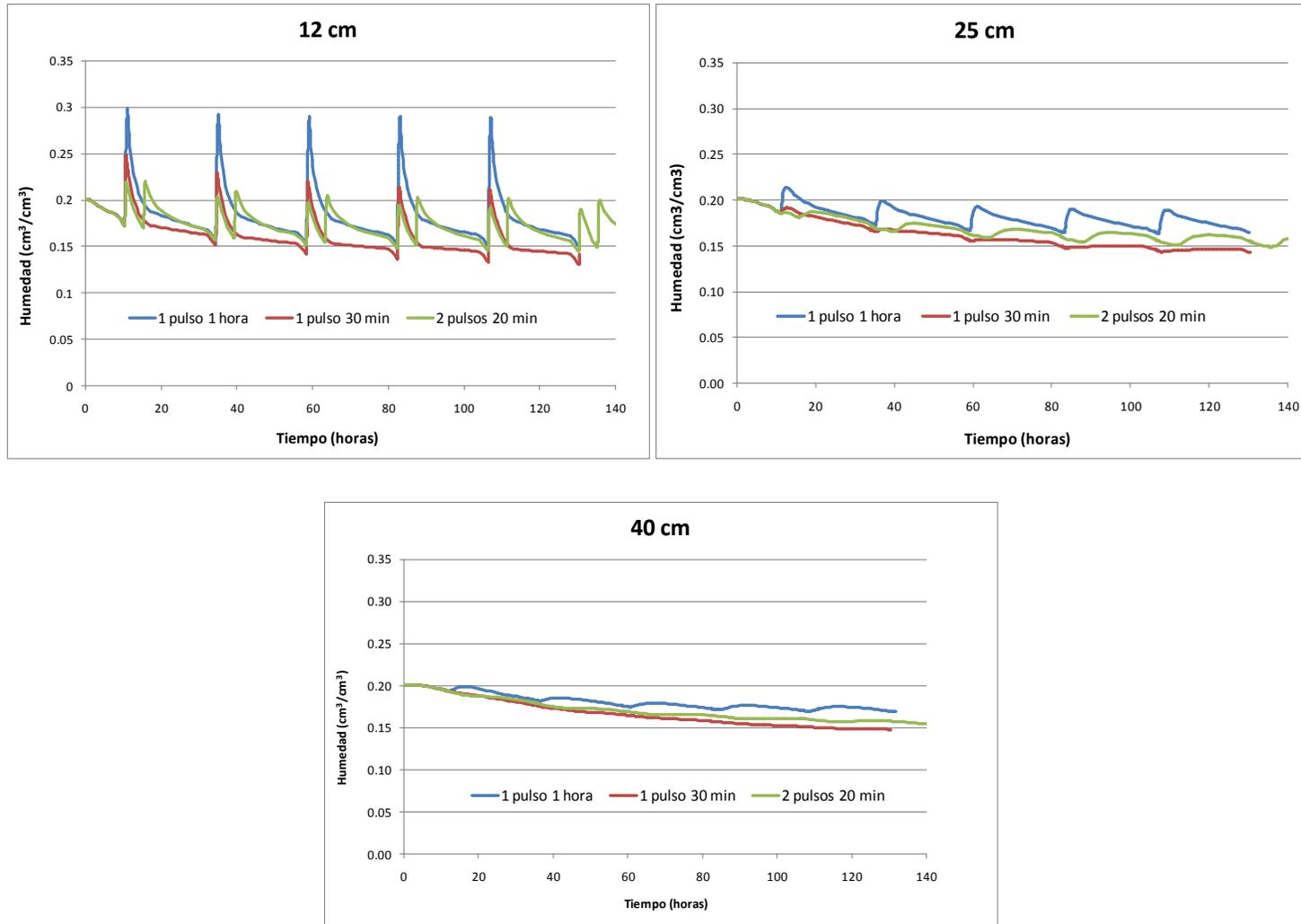


Figura 5.13. Contenido de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para un pulso de 30 minutos, dos pulsos de 20 minutos y un pulso de 1 hora

5.3.3.3. Etapa de final de campaña.

Los requerimientos hídricos del cultivo aumentan considerablemente desde principio de abril hasta mayo-junio en los que la demanda evaporativa se va incrementando de forma significativa. El valor medio de ET_c estimado para las tres campañas de estudio en estos meses asciende a 5 mm/día.

Los tiempos de riego para satisfacer las necesidades del cultivo oscilan entre los 40-60 minutos diarios para una cinta de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$. En esta etapa, los pulsos de riego registrados en campo aumentan considerablemente siendo habitual aplicar pulsos de riego que oscilan entre 90 y 120 minutos, generalmente aplicados en dos pulsos de riego cercanos a una hora.

Se han simulado los pulsos registrados en campo para evaluar el bulbo que generan así cómo la evolución del frente de humedad. También se han simulado distintas estrategias para aplicar el agua usada en ET_c que se corresponde con un tiempo de riego medio cercano a una hora de duración. Se ha simulado la ET_c del periodo con un único pulso de 1 hora de duración, dos pulsos de 30 minutos y 3 pulsos de 20 minutos diarios. En esta época, en la que las temperaturas comienzan a ascender de manera considerable y debido a que la planta se encuentra en plena fase de fructificación, se ha previsto que el riego sea diario. El éxito de la campaña radica en buena medida en la cantidad de fruta cosechada en esta etapa y unido al alto valor del cultivo así como a la fuerte inversión al inicio de cada campaña está justificado que las estrategias de riego se contemplen a escala diaria. Tampoco se ha considerado hacer riegos nocturnos, ya que los agricultores son muy reacios a regar cuando no se encuentran en la explotación.

Se ha considerado que las raíces en esta etapa tienen una profundidad máxima de 40 cm encontrándose la máxima densidad de raíces a 20 cm, y que el radio máximo es de 20 cm, con la máxima densidad de raíces a 10 cm.

Las estrategias de riego que se han llevado a cabo para aplicar la ET_c del cultivo han sido las siguientes (figura 5.14).

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

- Estrategia 1: Se aplica un pulso diario de 1 hora de duración con hora de inicio las 10 de la mañana.
- Estrategia 2: Se aplican dos pulsos diarios de 30 minutos de duración con hora de inicio las 10 de la mañana y las 15 de la tarde.
- Estrategia 3: Se han aplicado tres pulsos diarios de 20 minutos de duración con horas de inicio 10 de la mañana, 15 de la tarde y 18 horas.

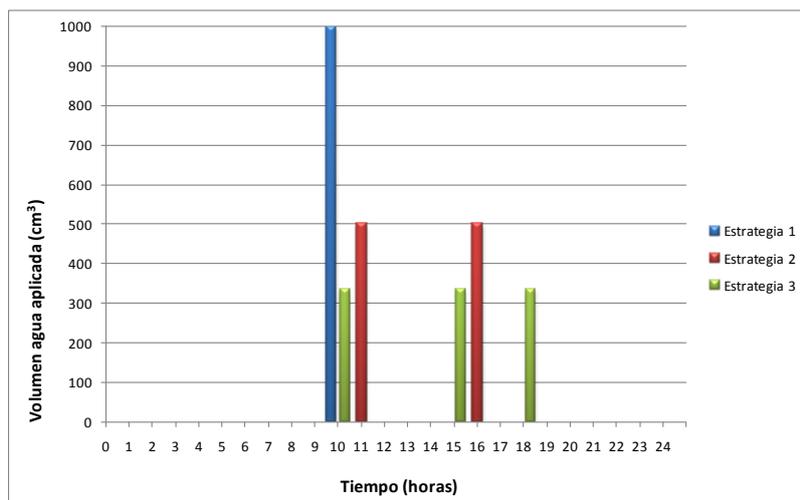


Figura 5.14. Volumen de agua aplicada diaria en las estrategias 1, 2 y 3.

Las estrategias 1, 2 y 3 se han simulado para un periodo de 1 semana promedio del mes de mayo y un volumen de agua aplicado equivalente a la ET_c del cultivo. En todos los casos el volumen total de agua diaria aplicada ha sido de 1 litro diario y 7 litros semanales.

También se han realizado tres simulaciones para reproducir un manejo de riego excedentario, con dosis y diseño de pulsos de riego típicos en esta etapa del cultivo en la zona de estudio (figura 5.14):

- Estrategia 4: Se han aplicado dos pulsos de 1 hora de duración con hora de inicio las 10 de la mañana y las 15 horas.
- Estrategia 5: Se han aplicado dos pulsos de 45 minutos con inicio a las 10 de la mañana y las 15 horas.
- Estrategia 6: Se han aplicado tres pulsos de 30 minutos con horas de inicio a las 10, 15 y 18 horas.

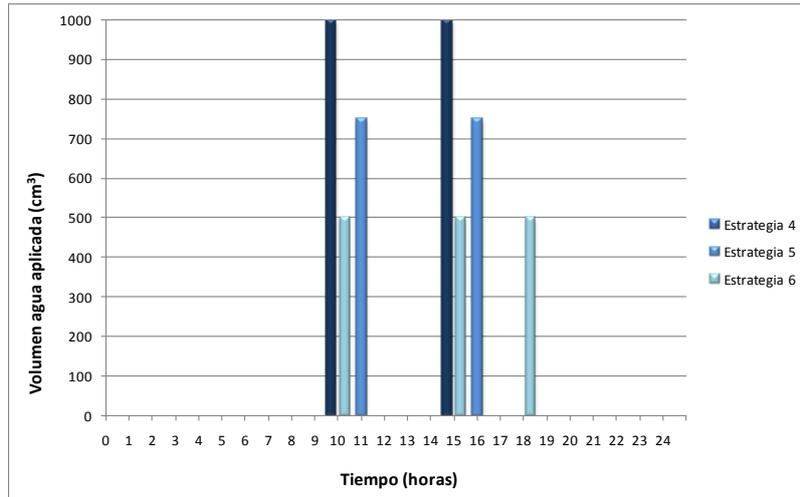


Figura 5.15. Volumen de agua aplicada en las estrategias 3, 4 y 5.

Las estrategias 4, 5 y 6 se han simulado para un periodo de 1 semana del mes de mayo y un volumen de agua aplicado que equivale a $1.5 ET_c$ y 2 veces la ET_c de ese periodo. El volumen de agua aplicado para las estrategias 5 y 6 ha sido de 1,5 litros por emisor y día lo que supone un total de 10,5 litros semanales. En el riego número 4 se han aplicado 2 litros diarios lo que equivale a 14 litros en una semana.

En la figura 5.16 se observa que para las estrategias 1, 2 y 3 el bulbo húmedo que se genera se mantiene en los primeros 20 cm del suelo, aunque si bien después de una semana con dicha estrategia de riego se observa que la humedad se mantiene en gran parte del lomo en los tres tipos de riego. En la fase de redistribución de la humedad en el suelo se observa cómo se conecta la humedad de la parte superficial del lomo con la humedad existente en las capas más profundas.

En la figura 5.17 se puede apreciar que la humedad que se alcanza a los 12 cm es mayor para un pulso de 1 hora (estrategia 1) alcanzando valores de humedad entorno a $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. En la estrategia 2 se registran valores de humedad cercanos a $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ pero durante más tiempo que la estrategia 1. La estrategia 3 mantiene la humedad en valores cercanos a $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ durante más tiempo a lo largo del día que las estrategias 1 y 2. En los tres casos la humedad mínima simulada es similar y alcanza el valor de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

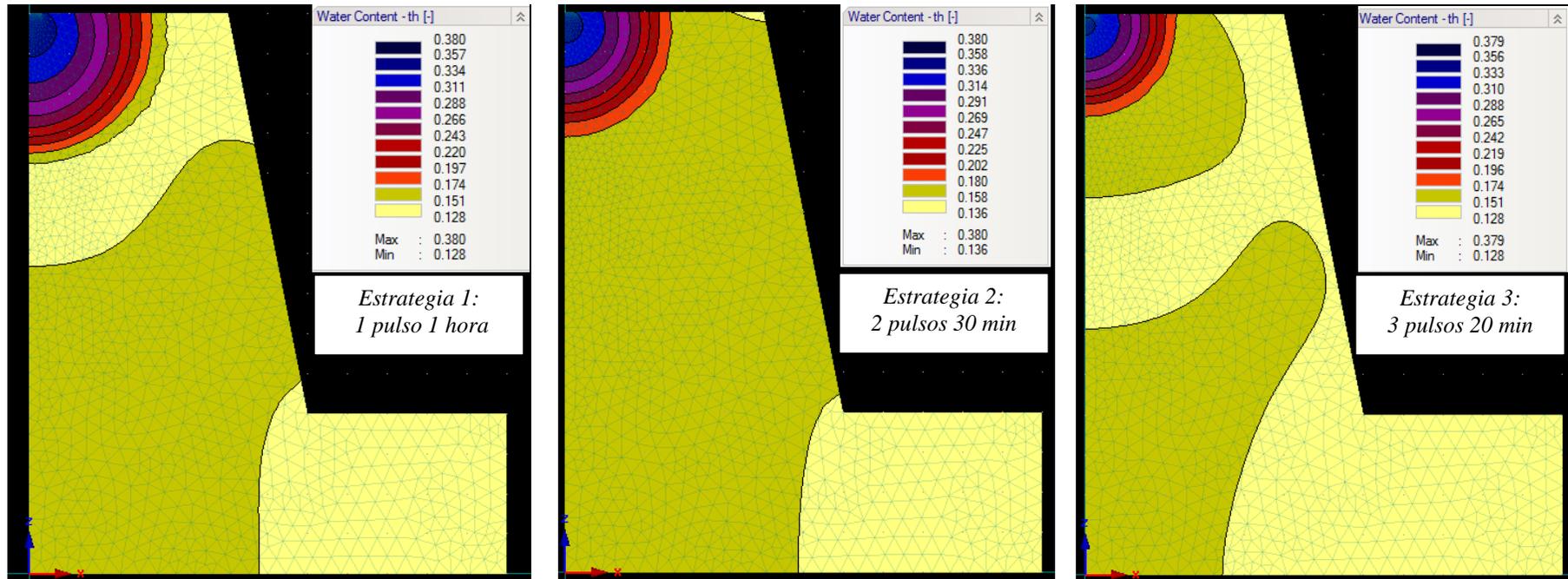


Figura 5.16. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3) al final del último evento de riego para las estrategias 1, 2 y 3

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

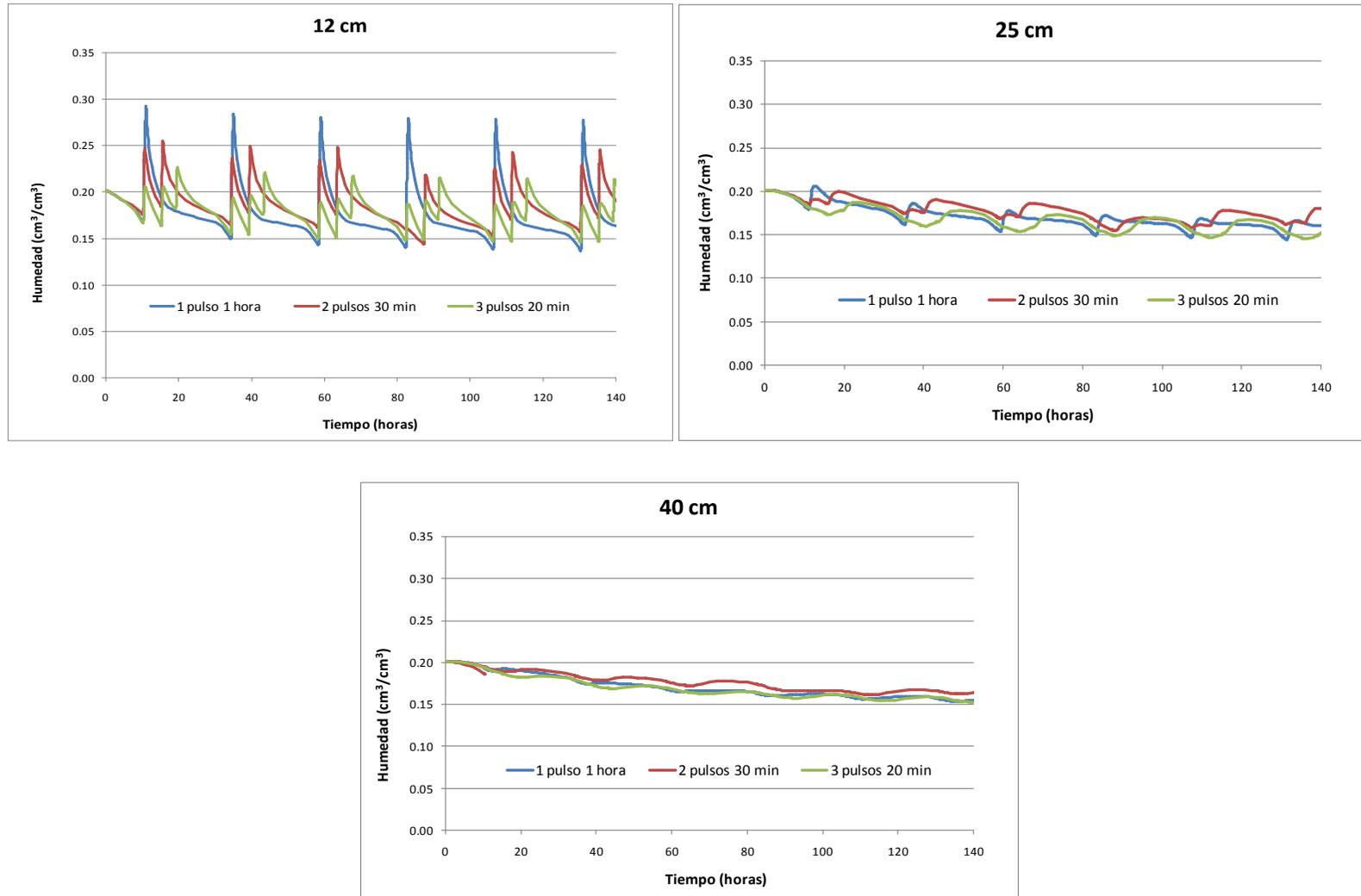


Figura 5.17. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para las estrategias 1, 2 y 3.

La humedad del pulso de riego se registra a los 25 cm de la superficie del lomo para las tres estrategias de riego. En los tres casos la humedad se mantiene en el mismo intervalo de 0,15-0,20 cm^3/cm^3 . A 40 cm de la superficie del lomo los cambios de humedad son muy leves para las tres estrategias, manteniéndose en los tres casos por encima de 0,15 cm^3/cm^3 .

En resumen, el comportamiento de las tres estrategias de riego diseñadas para aplicar la ET_c del cultivo, a 25 cm y 40 cm es similar. La mayor diferencia se encuentra en los primeros 12 cm del perfil. En esa franja la estrategia 3, que aplica 3 pulsos de 20 minutos, presenta la ventaja de que mantiene la humedad cercana a un valor medio de 0,2 cm^3/cm^3 durante más tiempo a lo largo del día, evitando picos acentuados de humedad. Aplicar las necesidades de cultivo en varios pulsos de riego de menor duración es una estrategia muy recomendable especialmente en suelos con poca capacidad de retención de la humedad, como son los suelos destinados al cultivo de fresa en la zona de estudio.

En la figura 5.18, obtenida para las estrategias 4, 5 y 6, que son las habituales en las fincas de la zona, se observa que aunque el bulbo húmedo generado se mantiene dentro de los 40 primeros centímetros de suelo, el agua alcanza los horizontes más profundos, superando la base del lomo, fuera del alcance de las raíces.

Este aspecto se puede apreciar con mayor claridad en la figura 5.19. Se observa que el riego llevado a cabo en las estrategias 4, 5 y 6 alcanza en todo momento la profundidad de 40 cm con respecto a la superficie del suelo. Teniendo en cuenta el fenómeno de redistribución de la humedad que se produce tras el evento de riego, está claro que la humedad alcanzará mayor profundidad, facilitando la pérdida de agua por percolación.

Por tanto es recomendable revisar la programación del riego, adaptando el riego a las necesidades del cultivo, manteniendo la humedad en los primeros 30-40 cm de suelo y evitando así la pérdida de agua por percolación así como la posible contaminación del acuífero por lixiviados.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

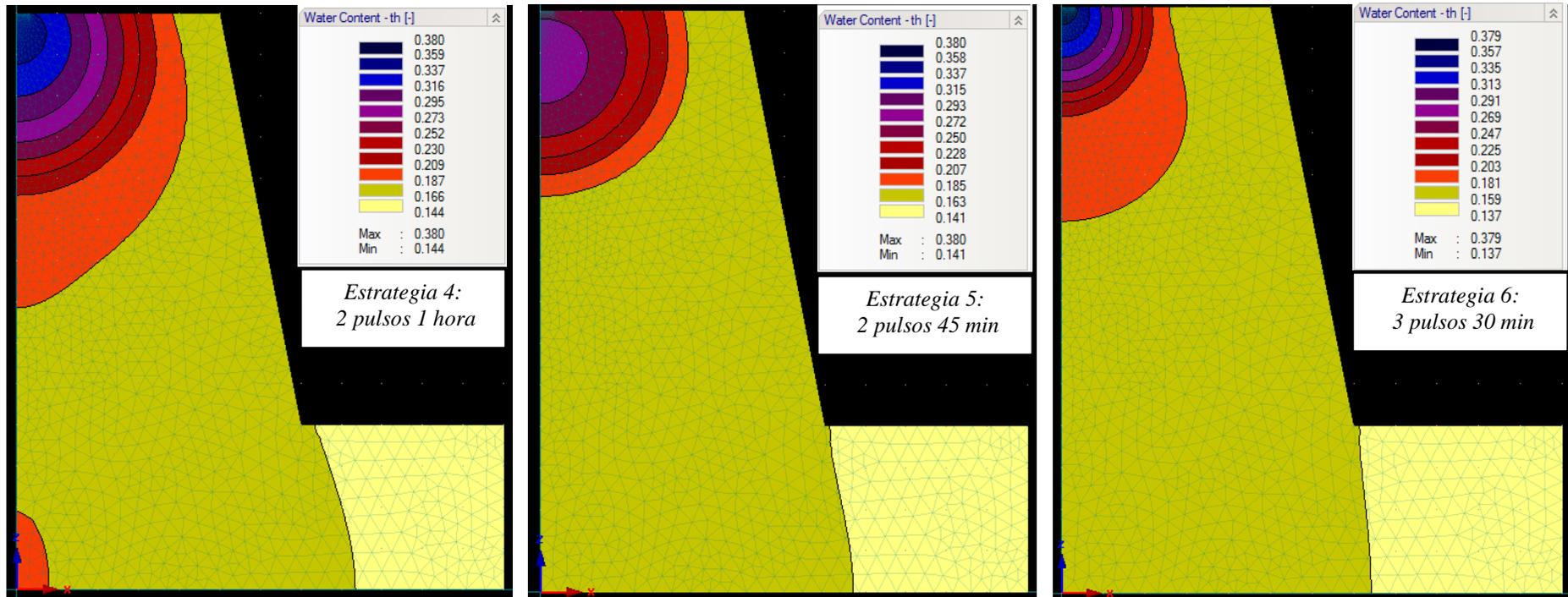


Figura 5.18. Simulación del contenido de agua en el suelo (cm^3/cm^3) a 12, 25 y 40 cm al final del último evento de riego para las estrategias 4, 5 y 6

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

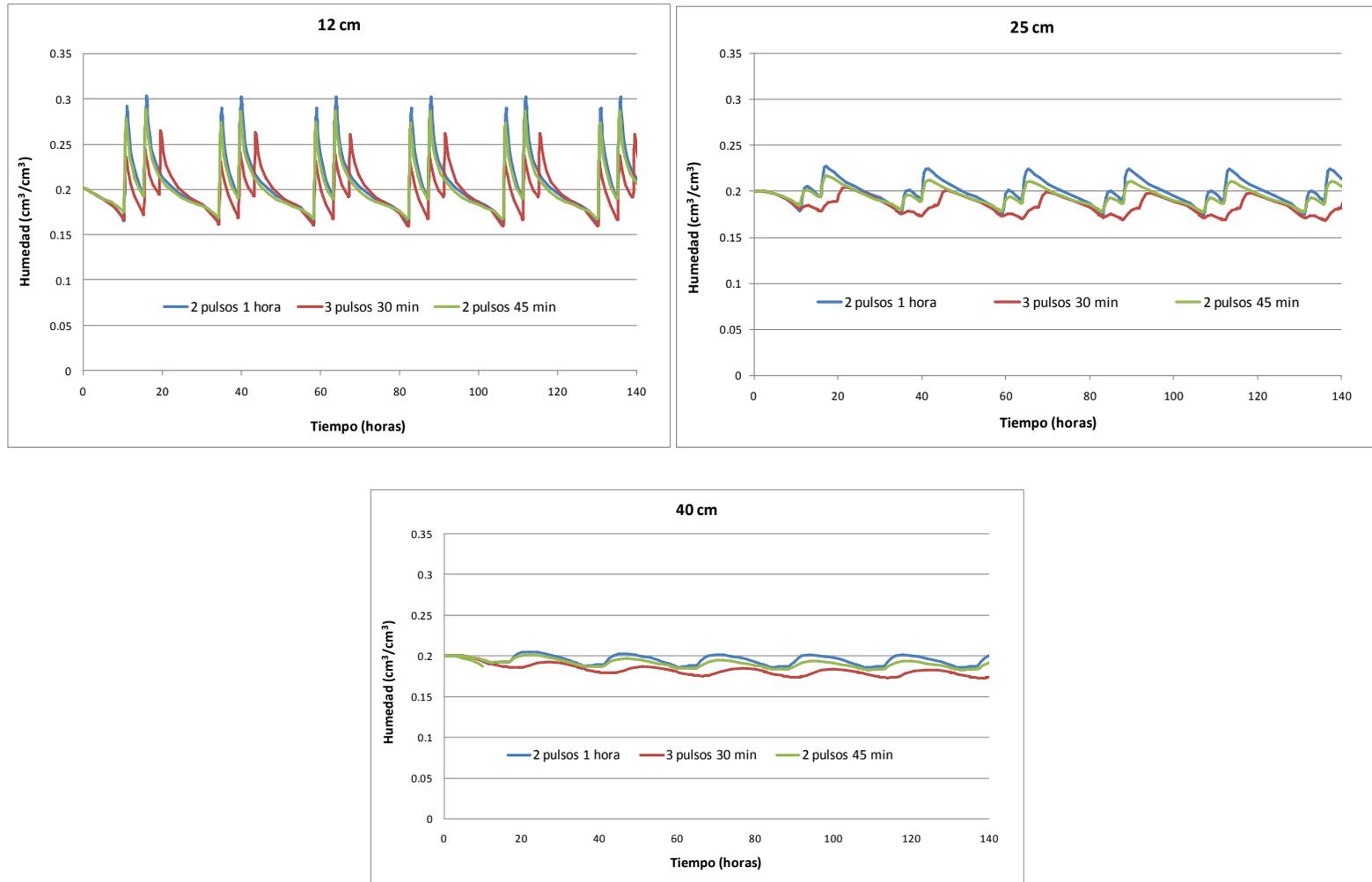


Figura 5.19. Contenido volumétrico de humedad en el suelo (cm³/cm³) a 12, 25 y 40 cm para estrategias 4,5 y 6

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

Las gráficas 5.20 y 5.21 nos muestran las dimensiones del bulbo húmedo en horizontal medida en la superficie del lomo y en vertical, medido bajo el emisor para las seis estrategias de riego de la etapa final del cultivo. Estos valores se obtienen tras el último evento de riego llevado a cabo en la simulación.

De la gráfica 5.20 se observa que el frente húmedo horizontal es similar en todas las estrategias, llegando en todos los casos la humedad al borde del lomo que se encuentra a 25 cm de distancia del emisor y con valores de humedad mínimos de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Lo que varía de una estrategia a otra es el contenido de humedad de dicho frente. Se observa que los riegos de las estrategias 4, 5, y 6 (trazos discontinuos) presentan un mayor contenido de humedad que los riegos diseñados para aplicar la ET_c , que son las estrategias 1, 2 y 3 (trazos continuos). En esta etapa hemos fijado la máxima densidad radicular a 10 cm de distancia del emisor. Si consideramos un intervalo entre 7 y 13 cm (zona sombreada de la gráfica) como la distancia a la que se encuentra la mayor densidad radicular podemos apreciar que la humedad para las estrategias 1, 2 y 3 se encuentra entre $0,17$ y $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, valores que oscilan en torno a $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ fijado como valor de la humedad del suelo a capacidad de campo. Los riegos registrados en campo en el intervalo entre 7 y 13 cm del emisor presentan valores de humedad entre $0,25$ y $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, valores superiores a los establecidos para capacidad de campo.

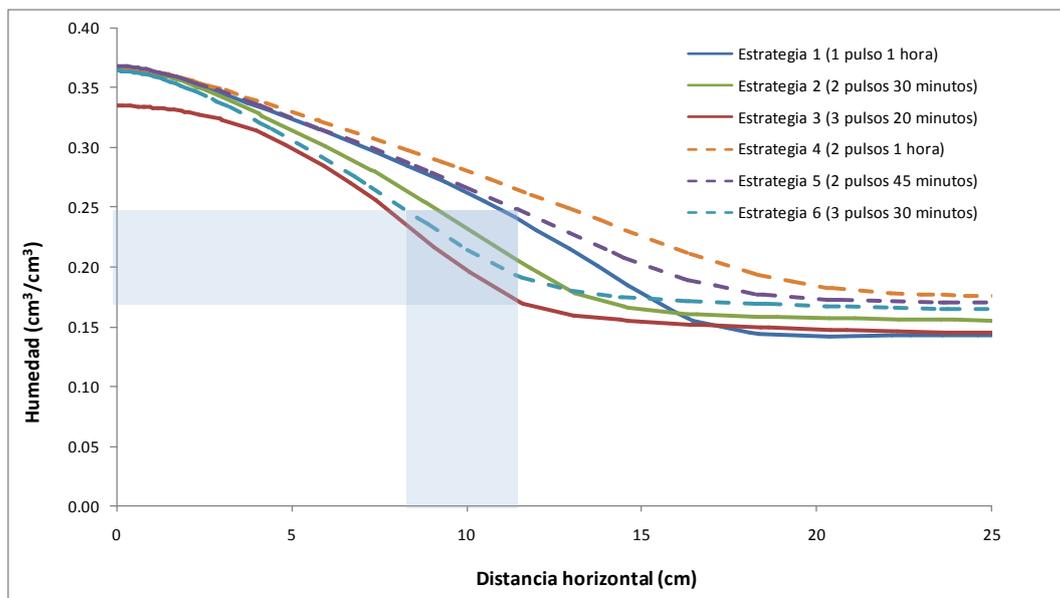


Figura 5.20. Distancia radial de bulbo húmedo para todos los riegos simulados.

5. DESARROLLO DE ESTRATEGIAS PARA LA MEJORA EN EL MANEJO DEL RIEGO

En la gráfica 5.21 se observa que el frente de humedad alcanza los 40 cm de profundidad en todos los riegos analizados, con un valor de humedad que rara vez cae por debajo de los $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. En esta etapa se estimó que la profundidad máxima de raíces se encuentra a 40 cm, presentándose la mayor densidad radicular a una profundidad de 20 cm.

Existen diferencias en el contenido de humedad en el frente para las distintas estrategias. Hasta los 10 cm de profundidad en todos los riegos llevados a cabo la humedad se encuentra por encima de $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Entre 10 y 15 cm para las estrategias 1, 2 y 3 la humedad está entre $0,2$ y $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, mientras que para las estrategias 4, 5 y 6 la humedad se encuentra entre $0,25$ y $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, muy por encima del valor de humedad fijado como capacidad de campo. Si nos centramos en un intervalo cercano a los 20 cm donde se encuentra la mayor densidad radicular (zona sombreada), observamos que para las estrategias 1, 2 y 3 la humedad oscila entre $0,15$ y $0,18 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Para las estrategias 4, 5 y 6 se desprende que la humedad se encuentra entre $0,20$ y $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. A partir de los 25 cm de profundidad todas las estrategias de riego presentan un valor de humedad en el intervalo de $0,15$ a $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

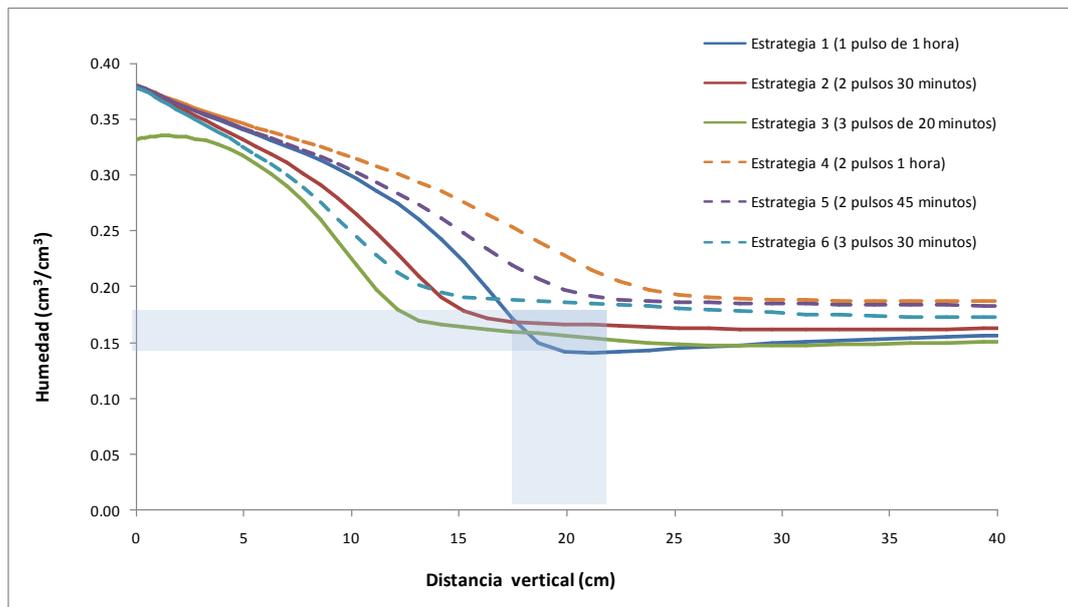


Figura 5.21. Distancia vertical (profundidad) de bulbo húmedo para todos los riegos simulados

Para suelos arenosos o arenoso-francos, los valores de humedad del suelo en el intervalo de 0,15 a 0,20 cm³/cm³ son valores considerados como valores de humedad del suelo a capacidad de campo, con lo que las estrategias de riego 1, 2, y 3 son adecuadas para mantener la humedad del suelo a capacidad de campo en los 40 cm del suelo donde se encuentran las raíces.

5.4. CONCLUSIONES

Se ha comprobado que el modelo Hydrus es una herramienta adecuada para simular el movimiento del agua en el suelo, y por tanto poder definir diferentes estrategias de riego eficientes que eviten las pérdidas de agua por percolación y de nutrientes por lixiviación. En el caso del cultivo de fresa se han simulado diferentes estrategias de riego para aplicar la ET_c del cultivo con emisores de 5 l.h⁻¹.m en tres etapas diferentes del cultivo, inicio, mediados, y final de campaña. En estos tres periodos también se ha simulado el riego habitual en la zona, en el que por término medio se aplica de 1,5 a 2 veces la ET_c del cultivo en ese periodo.

Del análisis llevado a cabo en la etapa inicial del cultivo que va desde noviembre hasta enero, se observa que el pulso de riego debe comenzar en 10 minutos al inicio y deberá ir incrementándose hasta un máximo de 20 minutos en función del crecimiento de las plantas y la demanda evaporativa. En ambos pulsos el agua alcanza los 12 cm de profundidad que es la profundidad máxima a la que se encuentran las raíces en este periodo, detectándose levemente a 25 cm, y siendo prácticamente inapreciable a 40 cm. El riego aplicado mediante un pulso de 40 minutos afecta claramente a 25 y 40 cm de profundidad, con lo que se está favoreciendo la pérdida de agua por percolación.

En la fase a mediados de la campaña, que contempla los meses de febrero y marzo, se ha comprobado que los riegos de un pulso de 30 minutos y dos pulsos de 20 minutos se mantienen en los primeros 25 cm de suelo donde se encuentra la máxima profundidad radicular para este periodo. Las variaciones de humedad en el suelo no se detectan a 40 cm, con lo que se consigue que del agua aplicada contribuya al proceso de evapotranspiración del cultivo. Por tanto estrategias de riego que oscilan entre 30-40 minutos aplicadas en uno o dos pulsos de duración son estrategias eficientes desde el

punto de vista de la conservación del recurso. Cuando se aplica un pulso de 1 hora se observa que el bulbo el frente de humedad alcanza los 40 cm de profundidad, y por tanto se está favoreciendo el proceso de percolación y pérdida de nutrientes por lixiviación.

Al final de campaña, en los meses de abril y mayo (y excepcionalmente junio), los pulsos de riego aumentan considerablemente debido al aumento de las necesidades del cultivo derivadas del incremento de la demanda evaporativa. En esta etapa, se han diseñado tres estrategias de riego que consisten en aplicar la ET_c equivalente aproximadamente a un tiempo de riego de 1 hora de duración, en 1 pulso de una hora, en 2 pulsos de 30 minutos y tres pulsos de 20 minutos. En el análisis de dichas estrategias de riego se comprueba que el frente de humedad se detecta muy claramente a 12 y 25 cm, siendo registrado de manera leve a 40 cm. Con ello se asegura que el agua aplicada se mantenga en los primeros 40 cm del suelo donde se encuentran las raíces. En el riego definido por tres pulsos de 20 minutos el valor de la humedad es más estable en el tiempo, manteniéndose en un valor cercano a $0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ a 12 cm y estando por encima de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ hasta los 40 cm.

También se han reproducido los riegos habituales en la zona, que oscilan entre 1,5 y 2 horas de duración. Se ha comprobado que estos riegos son claramente excedentarios, pues alcanzan claramente a 40 cm de profundidad, generándose en el proceso de redistribución un bulbo continuo desde la superficie hasta las capas más profundas, por debajo de la base del lomo, favoreciendo la pérdida de agua por percolación.

En todas las estrategias de riego definidas para aplicar la ET_c el valor de humedad en el bulbo húmedo generado se encuentra entre $0,15$ y $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, valores de humedad a capacidad de campo para un suelo arenoso típico del cultivo de la fresa en la zona de estudio.



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 6

EL RIEGO DE PRECISIÓN

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

En las numerosas cuencas Europeas donde se concentra la agricultura de regadío, existe una competencia creciente por el uso del agua (Knox *et al.*, 2012). El cambio climático amenaza con agravar dicha situación favoreciendo una disminución en la disponibilidad de recursos hídricos (Fallon y Betts, 2010), e incrementando la demanda de agua para agricultura (Rodríguez Díaz *et al.*, 2007). A pesar de la importancia económica, la sostenibilidad de la agricultura de regadío se encuentra cuestionada y amenazada debido a la creciente la escasez de agua (Fereres *et al.*, 2011) y las preocupaciones derivadas del impacto producido por las extracciones que en ocasiones llevan a una sobreexplotación de los recursos (EEA, 2009).

Bajo un escenario previsible de reducción de la disponibilidad de agua, un incremento de la frecuencia en la aparición de sequías y las incertidumbres asociadas al cambio climático, el sector del regadío en Europa necesita “producir más con menos”, incrementando la productividad del agua (kg/m^3) y mejorando la eficiencia de su uso (Monaghan *et al.*, 2013). Existe un interés científico creciente sobre el potencial del riego de precisión en la mejora de la eficiencia en el uso del agua y la energía en la agricultura de regadío (Daccache *et al.*, 2014).

El cultivo de fresa es un buen ejemplo de un cultivo intensivo que requiere importantes volúmenes de agua, y que es muy demandado en los mercados europeos tanto en fresco, como para su transformación por la agroindustria, dónde reclaman que la fresa se produzca bajo estrictos criterios de eficiencia en el uso de los recursos.

Basándonos en principios del riego de precisión, el proceso del riego en el cultivo de fresa debería ser una actividad que abarcase el cálculo de las necesidades hídricas del cultivo, y la aplicación de ese volumen de agua de la forma más precisa posible, en el momento adecuado y utilizando para ello los elementos hidráulicos disponibles con los mayores rendimientos de aplicación (Smith *et al.*, 2010).

En este sentido, los sistemas de riego por goteo son capaces de aplicar volúmenes de agua de una forma precisa y en pulsos o eventos de duración variable.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Están diseñados para humedecer la zona radical del cultivo, manteniéndola en valores cercanos a un valor óptimo, reduciendo las pérdidas de agua por percolación. Por tanto, estos sistemas tienen un gran potencial para llevar a cabo un riego de precisión, pudiendo ser fácilmente controlados mediante la automatización del sistema (Phene y Howell, 1984; Meron *et al.*, 1996; Dukes y Scholberg, 2004; Wanjura *et al.*, 2004; Evett *et al.*, 2006). Los sistemas de riego de precisión se han desarrollado principalmente para cultivos hortícolas y viticultura (Capraro, *et al.*, 2008a,b) así como frutales (Coates *et al.*, 2004; Adhikari *et al.*, 2008).

La eficiencia de un sistema de riego por goteo se ha fijado en numerosas ocasiones en valores por encima del 90%, como en los Planes Hidrológicos de la Demarcación del Guadalquivir y Tinto, Odiel y Piedras entre otras (PHDHG, 2013; DHDTOP, 2012). Sin embargo, como en otros sistemas de riego, conseguir esos valores tan altos de eficiencia, es más función del manejo que se hace de ellos, que una propiedad intrínseca del sistema (Smith *et al.*, 2010). Por ejemplo, Shannon *et al.* (1996) midieron la eficiencia de aplicación de un sistema de riego por goteo en una plantación de caña de azúcar, registrando valores que oscilaban entre el 30 y 90%, debido principalmente a un riego excedentario que producía pérdidas por percolación.

Las causas dominantes que favorecen una baja eficiencia de aplicación en un sistema de riego por goteo son la variación de la presión a lo largo de la tubería de distribución, la obstrucción de los goteros y tamaño de sectores de riego muy grandes. Hanson *et al.* (1995) llevaron a cabo numerosas evaluaciones en campo de la uniformidad de aplicación de sistemas de riego por goteo en EEUU. Los resultados mostraron que la uniformidad era menor que la deseada, generalmente por debajo del 80%. Este hecho se confirma por otros autores que han registrado valores hasta del 32% en el caso del riego en viñedos (McClymont *et al.*, 2009, Hornbuckle *et al.*, 2009a).

El sistema más utilizado en el cultivo de fresa en Huelva es la cinta de riego generalmente de una campaña de duración. Estos emisores son baratos y fáciles de instalar, ya que la maquinaria y el manejo del cultivo se han adaptado al uso de dichos emisores. A pesar de dichas ventajas, las cintas de riego no parecen ser los emisores más adecuados para el riego por pulsos de corta duración, como se requiere en suelos típicos de la zona con alto porcentaje de arena.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Tras la evaluación de la uniformidad de riego llevado a cabo en las campañas 2011-2012 y 2012-2013, se comprobó que la uniformidad en la distribución bajaba a menos del 50% a final de campaña. Una de las razones para que la uniformidad disminuya a lo largo de la campaña es la obstrucción de los emisores debido al fenómeno de succión que se produce cada vez que la cinta se vacía tras cada evento de riego (García Morillo *et al.*, 2012). Todos los tipos de emisores reducen drásticamente su eficiencia de aplicación incluso sólo con un 5% de emisores obstruidos. El hecho se agrava al ser las cintas de riego emisores no autocompensantes, lo que les convierte en elementos muy sensibles a las variaciones de presión, lo que provoca que los caudales emitidos en ocasiones se encuentren fuera del rango para el que se ha diseñado (García Morillo *et al.*, 2012, González Perea *et al.*, 2014). En casos en los que la presión es mayor que la de trabajo del emisor, los caudales emitidos son mayores que el caudal nominal y viceversa. Por el contrario, en lomos de más de 50 metros de longitud, la presión cae significativamente en la zona final del emisor provocando una disminución del caudal. Este comportamiento es común en la zona de estudio, debido a que no es una práctica habitual controlar la presión de trabajo en los hidrantes, lo que implica que no se conozca de manera precisa el caudal que se está aplicando. En ocasiones, aunque se controle la presión en el hidrante mediante reguladores de presión, los sectores de riego son muy grandes y las diferencias de presión entre las zonas cercanas al punto de suministro y las más alejadas son muy elevadas.

El problema se acentúa cuando se tiene en cuenta el manejo que se hace del riego. Es habitual que el manejo se base en la experiencia del agricultor y/o técnico, no siendo frecuente la programación del riego basadas en el cálculo de las necesidades del cultivo con datos agroclimáticos y de suelo. La fresa es un cultivo con alto valor económico, aunque requiere de una inversión inicial muy alta. Esto favorece que exista una tendencia a emplear más inputs de los necesarios (agua, fertilizantes, agroquímicos, etc) para evitar una merma en la producción, especialmente cuando no hay alguna limitación de tipo económico o normativa. Todas estas ineficiencias detectadas en el proceso de riego, justifican la necesidad de desarrollar un sistema integral de riego de precisión para la producción de fresa.

El principal objetivo de este capítulo es diseñar un sistema integral de riego para el cultivo de fresa en las condiciones particulares de la zona de estudio. Este sistema, se

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

ha diseñado teniendo en cuenta los principios fundamentales del riego de precisión, es decir, aplicar la cantidad exacta de agua, de la manera más precisa posible, en el momento oportuno y con una eficiencia alta en la aplicación del recurso. El sistema debe apoyarse tanto en herramientas tradicionales como nuevas tecnologías que faciliten la interpretación de la información en el proceso de toma de decisiones.

Este capítulo tiene un carácter integrador y de conexión entre los contenidos desarrollados en los capítulos previos de la presente tesis. El sistema de riego de precisión propuesto se basa en un proceso de tres fases o etapas. En la primera etapa se evalúa el riego mediante la aplicación de indicadores de gestión para detectar posibles ineficiencias en el sistema de riego y/o en el manejo. En la segunda etapa, se desarrolla un sistema de riego de precisión apoyado en el uso de nuevas tecnologías. La tercera fase se centra en la programación óptima del riego, basada en una estimación precisa de las necesidades del cultivo, así como definir el pulso de riego óptimo para evitar pérdidas por percolación (García Morillo *et al.*, 2015b).

El riego de precisión no sólo consiste en la instalación de nuevas tecnologías, sino que debe ser considerado con un enfoque holístico o integral donde se detecten las ineficiencias del sistema, se diseñen las mejores prácticas de manejo del recurso y se aplique en campo utilizando la tecnología de riego más apropiadas (figura 6.1)

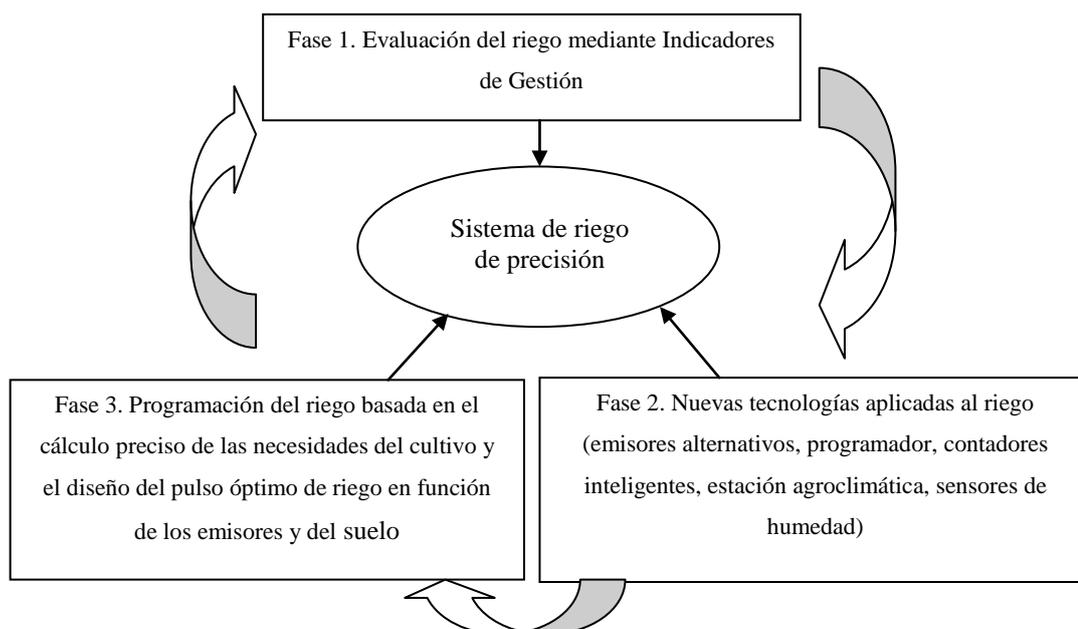


Figura 6.1. Etapas que componen el sistema integral de riego de precisión.

6.2. FASE 1: INDICADORES DE GESTIÓN COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL RIEGO

El primer paso es evaluar el manejo del riego que se lleva a cabo en el cultivo, a nivel de finca mediante indicadores de gestión. Los indicadores de gestión (IGs), ampliamente desarrollados en el capítulo 4, son ratios que relacionan variables de manera que una gran cantidad de información la reducen a un simple número. Comparando el valor de los diferentes indicadores es posible determinar si un agricultor es más o menos eficiente que otro o si se aleja mucho de un valor de referencia, lo que permite llevar a cabo medidas para corregir las deficiencias existentes (Malano y Burton, 2001; Rodríguez Díaz, *et al.*, 2008).

Los IGs seleccionados han sido aplicados a 22 fincas comerciales de fresa durante las campañas 2010-11, 2011-12, 2012-13. De los indicadores definidos y calculados en el capítulo 4, se han seleccionado tres como los más determinantes para evaluar el manejo del riego y el uso del agua. El primer indicador seleccionado es el agua aplicada total azul (AAT_{azul}) porque es un indicador sobre las extracciones de agua y por tanto está relacionado con la dotación de agua asignada al cultivo por los Organismos de Planificación Hidrológica o Administración pública competente. El segundo indicador seleccionado es el suministro relativo de riego (RIS) porque proporciona información acerca del manejo del recurso. Y finalmente, el indicador huella hídrica aplicada ($HH A_{\text{azul}}$) porque relaciona el agua aplicada con la producción del cultivo.

De la aplicación de los tres indicadores propuestos a las 22 fincas de estudio (capítulo 4) se desprende que el valor promedio del volumen total de riego aplicado, AAT_{azul} , presenta valores cercanos a los 7000 m³/ha para las tres campañas estudiadas. La variabilidad del indicador entre distintas fincas es muy elevada, con fincas que aplican volúmenes de agua por encima de los 12000 m³/ha y otras que están próximas a los 4000 m³/ha. Esta elevada heterogeneidad se acentúa en las aplicaciones de agua en las fases previas al cultivo, como son el alomado y plantación, como consecuencia del desconocimiento sobre las necesidades de agua reales en estas etapas, lo que conlleva que cada agricultor aplique más o menos agua según su propia experiencia. El valor más frecuente de AAT_{azul} se encuentra entre los 6200 y 6500 m³/ha para las tres campañas.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Este valor es un 38-45% mayor que la dotación propuesta por la Administración competente de 4500 m³/ha y año (Junta de Andalucía, 2014). Sin embargo cuando se calculan los valores de $HH A_{\text{azul}}$ se obtienen valores cercanos a los 90-100 m³/t, lo que indica una alta eficiencia en el uso del agua en el sistema de producción de fresa de Huelva, si se compara con el mismo cultivo en otros países productores de la UE como Polonia (592 m³/t) (Adams, 2009) u otros cultivos típicos de la zona.

Los valores de RIS medios obtenidos se encuentran en valores ligeramente superiores al rango óptimo de 1-1,2 lo que indica que aunque el riego puede ser considerado como adecuado a escala de campaña, el análisis mensual de dicho indicador proporciona valores más altos en los primeros meses de desarrollo del cultivo, lo que indica que pueden hacerse mejoras en la gestión del riego. El margen de mejora es mucho más amplio en el caso de las fincas que presentan valores de RIS superiores a 1.2, en algunos casos superando RIS de 2, ya que indica que se está aplicando bastante más agua de la estrictamente necesaria por el cultivo. Se deben evitar valores de RIS elevados que indican tanto una extracción excesiva de agua, como un volumen considerable de aguas de retorno que provocan contaminación difusa por el lixiviado de fertilizantes y otros agroquímicos.

6.3. FASE 2. DISEÑO DEL SISTEMA DE RIEGO

El emisor más utilizado para el riego de la fresa es la cinta no autocompensante, sin embargo la alta sensibilidad al atascamiento y la poca o nula adaptación al riego por pulsos hace que sea un sistema muy limitado para la aplicación del agua con precisión a un cultivo de tan alto valor económico. Además la técnica de cultivo habitual en la zona consiste en incorporar los ramales de riego debajo de los plásticos de los lomos con lo que el sistema se convierte prácticamente en un riego enterrado. No obstante, existen modalidades de goteros en el mercado que aplicando bajos caudales, poseen un comportamiento antisucción que los hace muy efectivos para evitar el atascamiento por partículas de suelo y además son antidrenantes por lo que la tubería no se descarga y la homogeneidad de los pulsos de riego es independiente de la ubicación de los emisores (Martín *et al.*, 2013b).

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Este hecho ha propiciado la búsqueda de nuevos emisores alternativos que presenten menor sensibilidad al fenómeno de atascamiento debido a sus características hidráulicas:

- Goteros autocompensantes, de manera que cuando la presión de servicio varía, el caudal de descarga del emisor no varía. Un caudal constante combinado con un tiempo adecuado del evento de riego mejoraría notablemente la precisión del proceso de riego ya que sólo se aplicaría la cantidad de agua requerida por el cultivo. Estos emisores simplificarían el manejo del riego por parte de los agricultores debido a que no tendrían que medir presión de trabajo o caudales, para asegura el correcto funcionamiento del sistema de riego.
- Goteros antidrenantes que permitan que los emisores estén siempre en carga y no necesiten de un tiempo de llenado, lo que es particularmente importante en suelos arenosos donde se quiere aplicar el riego en pulsos de corta duración. Esta característica dificulta el que las partículas puedan entrar en el gotero debido al fenómeno de succión que se produce durante el vaciado de las tuberías al final de cada evento de riego.
- Goteros antisucción que eviten la acumulación de sedimentos y atascamiento, que es uno de los principales factores que afecta la uniformidad y por tanto a la eficiencia del riego (Burt *et al.*, 1997).

El análisis hidráulico de los diferentes emisores ha sido el objeto de un trabajo profesional fin de carrera (Martin Arroyo, 2013a) y la metodología seguida se encuentra ampliamente desarrollada en el mismo. Este análisis consistió, en primer lugar, en determinar la uniformidad de aplicación del agua de riego de un ramal de 80 m de longitud (longitud habitual en los macrotúneles de fresa) a diferentes presiones y varias duraciones del pulso de riego. Por otra parte, se determinaron la curva de gasto y el coeficiente de variación de fabricación del emisor en un banco de ensayos.

Con esta información se analizó el comportamiento hidráulico de sectores de riego de distintos tamaños, típicos del cultivo de fresa, con el simulador hidráulico Epanet (Rossman, 2000), y se comprobó la influencia que la topología del mismo tiene en la distribución de presiones y caudales. A partir de la uniformidad del sector, se calcula el rendimiento de aplicación, R_a , que es la relación entre la lámina neta y la

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

lámina bruta (Losada, 1995), y depende del caudal medio de todos los emisores del sector, de la desviación típica de éstos y de la lámina requerida.

A partir de las necesidades teóricas del cultivo (lámina neta requerida H_n) y del rendimiento de aplicación del sistema, R_a , obtenido para los diferentes tipos de emisores mediante el análisis hidráulico del sector de riego se obtiene la lámina bruta a aplicar, H_b (m^3/ha). Los detalles del cálculo de dichos parámetros se muestran en Martín Arroyo (2013a).

Una vez conocida la lámina bruta a aplicar, el caudal de los emisores y el rendimiento de aplicación, se pueden calcular los tiempos de riego requeridos por el cultivo ($min.día^{-1}$), para cubrir las necesidades hídricas del cultivo a lo largo del periodo productivo.

De los 12 emisores evaluados, cuatro son cintas de riego (T), el resto son emisores autocompensantes (PC), autocompensantes y antisucción (PC-AS) y autocompensantes y antidrenantes (PC-AD). Las características de los emisores se recogen en la tabla 6.1.

El rendimiento de aplicación, R_a , de las cintas de riego que son los emisores más empleados en la zona, es ligeramente inferior que el de los emisores alternativos, presentando un valor medio de 92,3% frente al 95% de los autocompensantes. En condiciones ideales, bajo las cuales se ha realizado el análisis hidráulico las cintas no tienen un comportamiento hidráulico significativamente peor que los otros emisores, con R_a en todos los casos por encima del 90%. Sin embargo, en campo este sistema tiende a obstruirse con gran facilidad debido fundamentalmente a la succión provocada por el vaciado de la cinta en cada evento de riego, lo que influye negativamente en la uniformidad de distribución, situación que se agrava por la sensibilidad de este emisor a la presión ya que el caudal de agua aplicado está directamente relacionado con la presión, la cual varía a lo largo del ramal y del sector de riego.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Tabla 6.1. Características de los emisores evaluados en laboratorio y Rendimiento de aplicación (%) (Martín Arroyo, 2013a)

Emisor	Características hidráulicas	Diámetro interno (mm)	Caudal unitario (l.h⁻¹.m)	Espaciamiento entre emisores (m)	Intervalo presión de trabajo (kPa)	Rendimiento aplicación (R_a %)
Streamline 16080 fl	T	16,2	5,25	0,2	0-100	94,3
Tal Drip	T	16	5	0,2	0-90	92
HiTape	T	16	4,5	0,2	0-100	94,1
Azud Pro	T	13,7	5	0,2	0-250	90
Dripnet PC 12125 1.00 l/h	PC	11,8	5	0,2	40-250	95,5
Dripnet PC 12125 0.60 l/h	PC	11,8	3	0,2	25-210	97,4
Dripnet PC 16200	PC	15,5	3	0,2	40-250	96,2
Uniram As 17012	PC AS	17	5,33	0,3	50-400	96,2
Unitechline 16012	PC AS	16	3	0,33	50-400	96,7
Amnon	PC AD	13,9	3,67	0,3	100-300	92,7
Azud Premier Line	PC AS	13,7	5	0,2	50-400	95,2
Azud Premier Line	PC	13,7	5	0,2	50-400	90,3

T Cinta de riego; PC Autocompensante; PC-AS Autocompensante y antisucción; PC-AD Autocompensante y antidrenante.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Como alternativas existen emisores que presentan un R_a ligeramente superior al de las cintas y que trabajan de forma autocompensante en un amplio rango de presiones según el emisor (25 y 400 kPa). Esto favorece que todos los goteros del sector apliquen el mismo caudal, lo que permite controlar mejor el agua que se aplica al cultivo. Estos emisores instalados en campo bajo las condiciones de manejo del cultivo, presumiblemente mantendrán una mejor uniformidad a lo largo de la campaña.

Debido a sus características hidráulicas, se han seleccionado los emisores autocompensantes en general y los antisucción y antidrenantes en particular, como mejor opción para ser instalados en campo. El funcionamiento de este tipo de emisores no se ve afectado por una posible variación de presión en la tubería o hidrante que lo alimenta, siempre que se encuentre en el intervalo de presión de trabajo adecuado. Esto permite que el caudal entregado por el emisor sea siempre el caudal de diseño y la característica adicional de antisucción o antidrenaje evita o mejora el comportamiento del emisor frente a uno de los principales problemas que afecta a la reducción del R_a y que es el atascamiento.

Además de seguir una programación del riego, se debe llevar un control sobre ésta. Las características del riego localizado permiten la incorporación de nuevas tecnologías aplicadas al riego que nos ayuden a gestionar y controlar el riego, para tener una alta eficiencia en el uso del agua, al mismo tiempo que obtenemos un ahorro en los costes de operación.

Para completar el sistema de riego de precisión se requiere de elementos de control de caudal y presión como son electroválvulas y reguladores de presión, de medición como contadores inteligentes y de automatización como programador de riego y fertirriego, que pueden ser manejados desde una consola, PC o aplicación móvil.

El sistema de riego de precisión se ha diseñado para un sector de riego independiente controlado con una electroválvula en cabecera con piloto de tres vías que permite reducir o mantener/aliviar la presión aguas abajo. El control de la presión en cada sector o unidad de riego es indispensable para conocer como está funcionando el sistema de riego. En el caso de emisores autocompensantes hay que asegurar que la presión se encuentra en todo momento dentro del rango de trabajo óptimo.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Para la automatización del sistema es necesario instalar una electroválvula en cada sector. Las electroválvulas están conectadas a un programador de riego (permite la programación del riego por tiempo o volumen, fertilización, pH, telegestión de datos vía PC o teléfono móvil), para aplicar la dosis de riego establecida. Además el sector dispone de un contador inteligente con sensor electrónico que detecta el giro de la única pieza móvil (turbina) y envía la señal a un microprocesador que interpreta y comunica la información en formato digital, esta información queda almacenada en la memoria del equipo indicando cuándo y cuánta agua se consume en cada evento de riego (figura 6.2).



Figura 6.2. Electrovalvula, contador y programador de riego.

Los distintos elementos de la instalación en campo del sistema de riego de precisión diseñado para el cultivo de fresa se observa en la figura 6.3.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

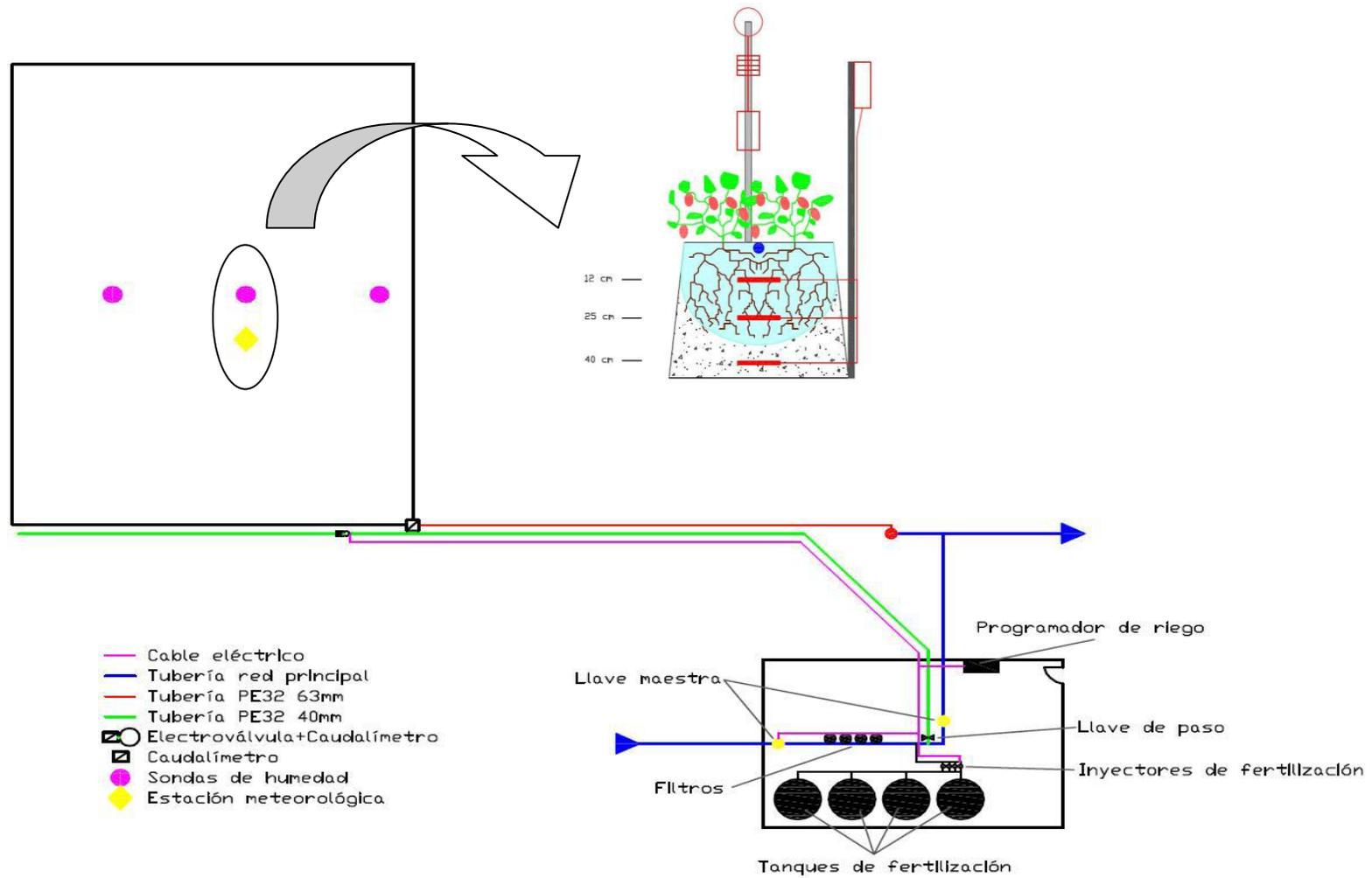


Figura 6.3. Esquema del sistema de riego de precisión (Fuente: Martín Arroyo et al., 2014)

6.4. FASE 3. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Para mejorar el manejo del riego, es necesario conocer las necesidades de agua del cultivo y el movimiento del agua a través del lomo. Los suelos dedicados a la fresa son suelos con más de un 85% de arena lo que dificulta el manejo del riego. Por ello es recomendable que el riego se aplique en pulsos, aunque la duración de los mismos está basada generalmente en la experiencia del agricultor y no obedece a información medible y real. Las simulaciones llevadas a cabo mediante un modelo suelo-planta-agua permiten definir la duración óptima del riego.

El esquema integral de la programación del riego propuesto se muestra en la figura 6.4.

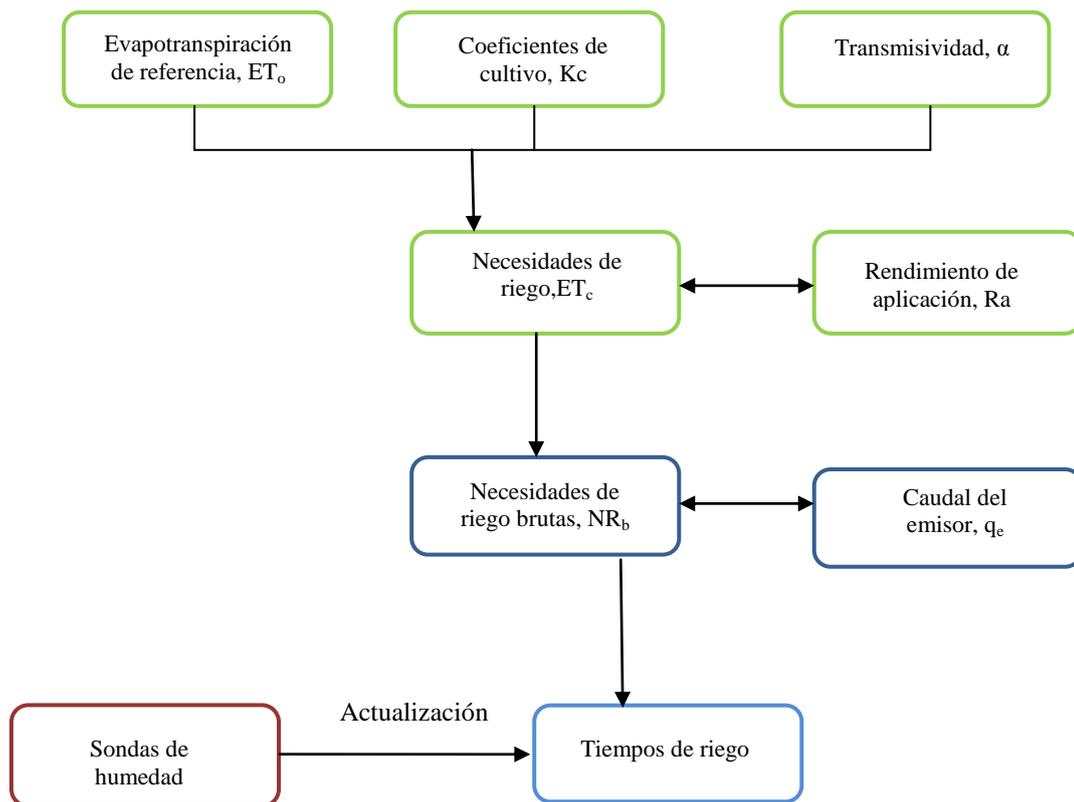


Figura 6.4. Esquema de la metodología para la programación del riego (Fuente: Martín Arroyo, et al., 2014)

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

La programación del riego debe tener en cuenta las necesidades teóricas del cultivo calculadas a escala diaria o semanal, para lo que se requiere datos climáticos de condiciones al aire libre y bajo plástico de una estación cercana o propia (Allen *et al.*, 1998; Fernández *et al.*, 2010).

El valor promedio de las necesidades teóricas netas del cultivo para las tres campañas de estudio calculado en el capítulo 3 asciende a 4591 m³/ha (tabla 3.6). Este valor se ha obtenido a partir de la metodología descrita en Fernández *et al.*, (2010) basada en la ecuación de Hargreaves modificada por al transmisividad del plástico (ecuación 3.2).

Apoyándonos en el R_a de los diferentes emisores se obtiene la lámina bruta a aplicar (ecuación 6.1).

$$H_b = \frac{H_n}{R_a} \quad (6.1)$$

Las necesidades teóricas se tienen que convertir en tiempos de riego diarios (consigna del programador de riego). El tiempo de riego se calcula a partir de las necesidades hídricas del cultivo y el análisis hidráulico del sector, de manera que el tiempo de riego es distinto en cada sector o macrotúnel, en función del caudal del emisor y de su rendimiento de aplicación (R_a). De esta forma obtenemos los tiempos de riego teóricos en minutos/día (ecuación 6.2)

$$T_r = \frac{(ET_c \cdot S)/R_a}{Q} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60s} \quad (6.2)$$

donde ET_c (mm/día) es la evapotranspiración del cultivo, S es la superficie del sector (m²), R_a es el rendimiento de aplicación y Q (l/s) es el caudal del emisor.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Al inicio de campaña se establece un primer calendario con tiempos de riego calculados a partir de las necesidades teóricas de la serie histórica disponible, y se corrige periódicamente (cada 7 ó 10 días según el estado de desarrollo del cultivo) tanto con los datos climáticos registrados para la campaña actual, como con los datos de las sondas de humedad. Las sondas instaladas son sondas capacitivas (FDR) de fácil instalación y mantenimiento. Los sensores de ambos equipos están conectados a un datalogger que registra los datos cada 15 minutos.

Los sensores de humedad se utilizan para controlar la humedad a diferentes profundidades en el perfil del suelo, para confirmar que la humedad no alcanza profundidades más allá de la zona radicular. Dichos sensores son útiles como herramienta de control, ya que informan de la evolución temporal del frente de humedad así como su distribución dentro del lomo (figura 6.5 y 6.6). Sin embargo estos dispositivos no son adecuados para la programación del riego en suelos arenosos, donde la dinámica del agua en el suelo es muy rápida.

Las sondas de humedad se instalan a tres profundidades (12, 25 y 40 cm) para controlar el frente de humedad o bulbo húmedo en el lomo (figura 6.5).



Figura 6.5. Estación climática y sensores de humedad instalados en campo

El pulso óptimo de riego se ha diseñado a partir del tiempo de riego diario (que tiene en cuenta las necesidades del cultivo, el caudal del emisor y el rendimiento de aplicación) y el bulbo húmedo que se genera en los suelos arenosos típicos de la zona

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

que se ha estimado con el modelo Hydrus y se ha desarrollado ampliamente en el capítulo 5.

En dicho capítulo se ha definido el pulso óptimo de riego para un emisor de $5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ durante las tres etapas del cultivo definidas. En la fase inicial, de noviembre a enero, cuando las raíces son muy someras, la estrategia es mantener la humedad en los primeros 12 cm de suelo. Por otro lado, los tiempos de riego necesarios para satisfacer las necesidades del cultivo oscilan entre 10 y 20 minutos. El bulbo húmedo que se genera con estos tiempos de riego concentra la humedad en los 12 primeros centímetros de suelo.

En la etapa de mediados de campaña (febrero-marzo) es recomendable que el bulbo húmedo que se genera no sobrepase los 25 cm de profundidad. Los tiempos de riego necesarios para satisfacer las necesidades del cultivo oscilan entre 20 y 40 minutos para los emisores seleccionados. Estos tiempos de riego generan bulbos húmedos que no superan los 25 cm, por lo que se pueden aplicar en un pulso, aunque es preferible repartirlo en varios pulsos (figura 6.6).

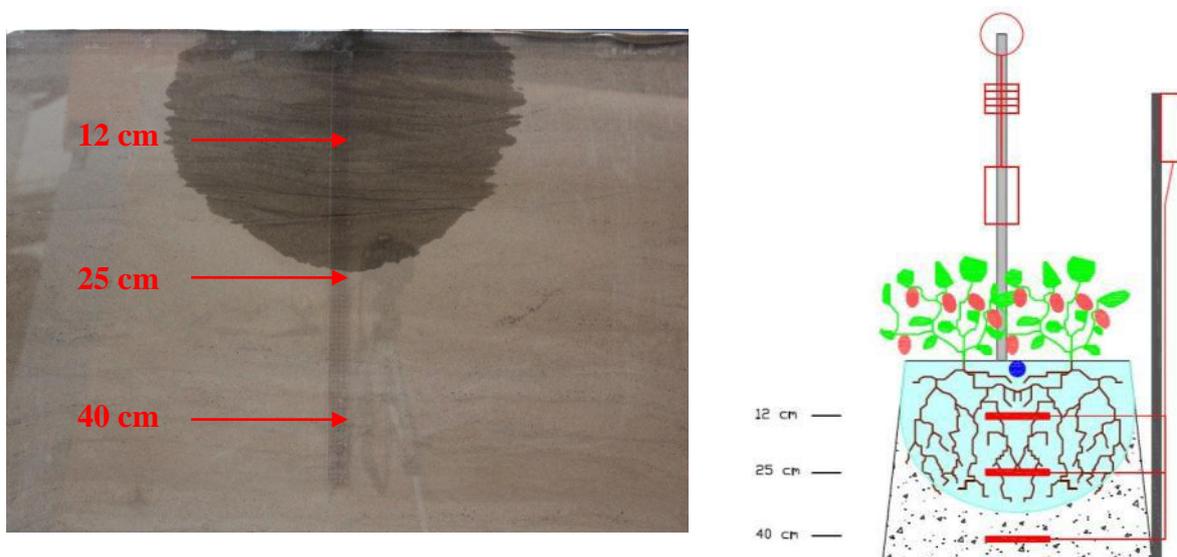


Figura 6.6. Esquema de bulbo húmedo y sensores de humedad instalados en lomo

En la fase de final de campaña (abril-junio) la estrategia es que la humedad o el bulbo húmedo generado no superen los 40 cm de profundidad para evitar pérdidas por percolación. Los tiempos de riego requeridos oscilan entre los 40 y 70 minutos en el mayor de los casos para los emisores seleccionados. Se ha comprobado que pulsos de

hasta una hora de duración generan bulbos que no van más allá de los 40 cm de profundidad y que apenas se registran a esa profundidad en los suelos estudiados. Sin embargo, este tiempo de riego debe aplicarse en dos o tres pulsos para conseguir un valor más estable de humedad en la zona radicular a lo largo del tiempo evitando así picos más acentuados y puntuales de humedad.

6.5. EXPERIENCIA PILOTO DE RIEGO DE PRECISIÓN EN FINCA COMERCIAL

El sistema integral de riego de precisión diseñado se ha instalado en campo en una finca comercial de fresa durante la campaña 2013-2014 y en dos fincas diferentes a la anterior en la campaña 2014-2015. Los resultados de la implantación de este sistema son el objeto de otro trabajo de investigación del que ya se han publicado los resultados obtenidos en la campaña 2013-2014 (Martín Arroyo *et al.*, 2014).

La variedad de fresa de los ensayos ha sido Splendor, con una densidad de plantación de 65000 plantas/ha, presentando una textura del suelo del 92% de arena, 4% de arcilla y 4% de limo, aunque si bien la parcela presenta una capa con alto contenido en arcilla y limo a poca profundidad (60-80 cm). La fecha de plantación fue el 19 de octubre de 2013 y la cubrición con plástico se realizó el 3 de noviembre de 2013. El plástico se retiró el 16 de mayo de 2014 y el final de la campaña fue el 27 de mayo de 2014.

Se instalaron 5 emisores de los evaluados en laboratorio para comprobar su comportamiento en campo. Dos de ellos fueron cintas de riego de medio y bajo caudal (Streamline 16080fl de 5,25 y 3,6 l.h⁻¹.m) por ser los más empleados en la zona. Los tres restantes fueron el autocompensante Dripnet 16200 de 3 l.h⁻¹.m, autocompensante y antidrenante Amnon de caudal 3,67 l.h⁻¹.m y el aucompensante y antisucción de Uniram 5,33 l.h⁻¹.m. Cada emisor se instaló en un macrotúnel, compuesto de cinco lomos y una superficie aproximada de 250 m² y controlado por una electroválvula con regulador de presión, lo que ha permitido trabajar en condiciones controladas de presión. También se monitorizó el riego de un macrotúnel testigo de la misma superficie que los anteriores, con el manejo del agricultor, y cuyo riego se realizó mediante una cinta de exudación.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Durante la campaña se llevaron a cabo varios test de uniformidad del riego (U_s) en cada macrotúnel aplicando la metodología de Bralts y Kesner adaptada por Camacho (2010) y se calculó el rendimiento de aplicación (R_a) para cada emisor (tabla 6.2) excepto en el túnel del agricultor al no poderse aplicar esta metodología a una cinta porosa.

Tabla 6.2. Uniformidad (U_s) y Rendimiento de aplicación (R_a) en (%) de los distintos emisores (Montesinos et al., 2014)

Fecha	Túnel 1		Túnel 2		Túnel 3		Túnel 4		Túnel 5	
	Streamline T 16080 q = 3,6 l/h.m		Streamline T 16080 q = 5,25 l/h.m		Dripnet PC 16200 q = 3 l/h.m		Ammon PC AD q = 3,67 l/h.m		Uniram PC AS 17012 q = 5,33 l/h.m	
	* U_s	R_a	U_s	R_a	U_s	R_a	U_s	R_a	U_s	R_a
14/01/2014	95,8	92,7	95,7	92,6	95,9	92,9	95,5	92,2	88,9	80,4
17/03/2014	90,0	82,7	86,6	76,8	95,1	91,5	96,5	93,9	96,9	94,7
28/04/2014	91,8	85,8	79,5	64,5	89,4	81,7	96,4	93,7	90,5	83,5
26/05/2014	85,2	74,4	76,0	58,4	87,5	78,4	92,1	86,3	89,6	82,0

* U_s y R_a en %.

Todos los emisores sufrieron una reducción de su valor inicial obtenido en laboratorio y condiciones ideales de funcionamiento, debido principalmente a la obturación de los goteros. Esta obturación de emisores se produce de dentro a fuera debido a la aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego y de fuera hacia dentro debido al fenómeno de succión durante el vaciado de los emisores en caso de no ser antidrenantes.

Como era de esperar el comportamiento de los emisores autocompensantes fue mejor que el de las cintas de riego y en particular el emisor autocompensante y antidrenante fue el que mejor comportamiento presentó con valores al final de campaña de U_s de 92,1 y de R_a de 86,3. Es importante señalar que las cintas de riego presentaron los valores más bajos de uniformidad y rendimiento de aplicación. La cinta del túnel 1 presentó un valor de U_s un 7,5% menor que el emisor que mejor comportamiento tuvo

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

en campo y una reducción en R_a de un 13%. La cinta de riego instalada en el túnel 2 de $5,25 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ al final de campaña tuvo un valor de U_s un 17,5% menor y la reducción de R_a fue de un 32,3% con respecto al emisor autocompensante y antidrenante. En concreto la cinta de $5,25 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$ presentó los valores más bajos y por tanto el peor comportamiento hidráulico de los emisores evaluados. Este tipo de emisor y caudal es el más empleado en la zona de estudio para el riego del cultivo de fresa.

Debido a que cada sector de riego (macrotúnel) tiene una superficie reducida (250 m^2) las variaciones en el R_a entre cada periodo que se han medido a lo largo de la campaña son menores que las que cabría esperar en un sector más grande, variable ésta que juega un papel relevante en el tiempo de riego. Es de esperar que si la superficie del sector de riego es mayor, como suele ser en la zona de estudio (entre 1 y 2 hectáreas y lomos entre 70-80 metros de longitud), los valores de U_s y R_a disminuyan de manera más acentuada a lo largo de la campaña y por tanto la lámina bruta a aplicar aumente considerablemente.

Evaluaciones llevadas a cabo con el simulador hidráulico sobre el comportamiento de los diferentes emisores en sectores de riego de diferentes tamaños (de menos de 0,5 ha hasta 2 ha) muestran que los emisores autocompensantes son los menos sensible al tamaño de éstos. Además, en el emisor que mejor comportamiento tuvo, la característica adicional de ser antidrenante, posibilita que el emisor esté en carga en todo momento, con lo que eliminamos el tiempo de llenado del sistema. Desde un punto de vista hidráulico, este emisor es el que mostró mejor comportamiento en campo.

En general los emisores autocompensantes se comportaron mejor que las cintas de riego no autocompensantes y por tanto son los emisores que mejor se adaptan para un sistema de riego de precisión debido a que por sus características hidráulicas no están tan influenciados por la red de riego y mantienen un rendimiento de aplicación alto durante toda la campaña. El caudal de los emisores es el típico de la zona, se ha evitado caudales más pequeños ya que eso implica diámetros menores y mayor probabilidad de obturación.

En cada sector de riego se programó y manejó el riego conforme a lo descrito en el apartado 6.4 de este capítulo y se registró la lámina bruta aplicada (m^3/ha), la relación

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

entre el agua aplicada y las necesidades teóricas del cultivo (RIS), así como la producción obtenida tanto en kg/ha como en g/planta. Esos mismos datos se registraron en el túnel testigo con el sistema de riego y programación habitual llevada a cabo en la finca (cinta de riego).

La lámina bruta aplicada para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo con el sistema de riego de precisión osciló entre los 3344,6 y 3721,5 m³/ha, siendo el mínimo correspondiente al emisor autocompensante y antidrenante, mientras que en el túnel testigo con la programación habitual este valor fue de 6120,5 m³/ha. En los 5 macrotúneles donde se realizó un riego de precisión se consiguió un ahorro medio de agua del 43% respecto al testigo, como consecuencia del manejo y del cambio de emisor.

Si se tienen en cuenta los consumos registrados en la fase de alomado de 657 m³/ha, y los 603 m³/ha en plantación, el volumen total de agua aplicada con el sistema de riego de precisión varió entre 4604,6 (túnel 4) y 4981,5 m³/ha (túnel 3), mientras que este valor fue de 7380,5 m³/ha para el túnel testigo.

El valor de RIS osciló entre 1,09 y 1,22 para los túneles del ensayo de riego de precisión, lo que indica un manejo del riego adecuado. En la parcela testigo el valor de RIS fue de 2, lo que indica que se aplicó más agua de la requerida por el cultivo (figura 6.7)



Figura 6.7. Estado de un túnel con riego de precisión y túnel testigo en enero.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Se observó que las cintas de riego con un manejo adecuado presentaron valores de lámina bruta y RIS similares a los emisores autocompensantes. Esto es debido a que los sectores de riego eran muy pequeños (250 m^2) con lomos de unos 40 metros de longitud y un regulador de presión en la electroválvula que permitió fijar la presión de trabajo a la requerida por el emisor.

El valor promedio de la lámina bruta aplicada en la fase de goteo en los 5 túneles de riego de precisión fue de $3500 \text{ m}^3/\text{ha}$, valor muy similar al de las necesidades netas ya que el R_a en un sector tan pequeño y con todas las variables controladas fue muy alto durante toda la campaña. Este valor ha resultado ser inferior a las necesidades teóricas netas calculadas en el capítulo 4 de este trabajo para las tres campañas de estudio ($4591 \text{ m}^3/\text{ha}$). Esta diferencia aunque importante se puede explicar atendiendo principalmente a dos motivos.

En primer lugar, y como ya se puso de manifiesto en el capítulo 4, el cálculo de las necesidades teóricas tiene mucha incertidumbre ligada tanto al cálculo de la ET_o bajo plástico como a los coeficientes de cultivo empleados. En el cálculo de la ET_o hay muchas variables que intervienen como son la temperatura, velocidad del viento, radiación solar, valores promedios de transmisividad del plástico que pueden ser de una campaña o varias campañas de duración, etc. De igual modo los coeficientes de cultivo empleados en los cálculos son valores genéricos que no tienen en cuenta la variedad, si ésta es más o menos vigorosa, si es temprana o tardía, etc. Todas estas variables introducen una serie de errores acumulados que hacen que las necesidades teóricas deban ser consideradas como un valor de referencia, que es conveniente corregir en cada finca. Para ello es de suma utilidad el uso de sensores de humedad que permiten ajustar las necesidades genéricas a un valor más adaptado a las condiciones particulares de cada sector de riego (definido por la variedad y por el tipo de suelo) a lo largo de la campaña.

En segundo lugar, la duración de la campaña influye mucho en el cálculo de las necesidades teóricas del cultivo. En el capítulo 4, se calculaban las necesidades para una campaña promedio con fecha de inicio el 1 de octubre, cubrición con plástico el 1 de noviembre y finalización de campaña el 31 de mayo. En la finca de los ensayos, la plantación tuvo lugar el 19 de octubre y la campaña acabó el 27 de mayo. Es decir, en el

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

primer caso la campaña es casi un mes más larga, en meses en los que la demanda evaporativa es alta.

Del seguimiento continuo realizado en campo se observa que en los meses donde hay un mayor potencial de ahorro de agua es desde el inicio de temporada hasta febrero, ya que la plántula es muy pequeña, con poco desarrollo radicular y bajo índice de área foliar, lo que limita su capacidad para extraer agua y nutrientes de la solución del suelo. Pero en esta época, tras una importante inversión inicial, el agricultor mantiene una posición conservadora, aplicando más agua de la que necesita el cultivo para evitar cualquier tipo de riesgo para el cultivo. Esta tendencia va disminuyendo desde mediados hasta fin de campaña ya que la planta experimenta en esta época un desarrollo foliar y radicular importante que le permite extraer más agua y nutrientes del suelo lo que conlleva que las diferencias se reduzcan.

Por tanto es vital hacer un seguimiento continuo y pormenorizado en cada caso a lo largo de la campaña, para poder ir adaptando el riego a las necesidades reales del cultivo en campo, en las que intervienen muchos factores como son el clima, el suelo, el desarrollo de la planta e incidencias de plagas y enfermedades entre otros.

Al ser la producción la variable clave para el agricultor, se llevó a cabo un seguimiento semanal de la producción obtenida en fresco (1ª y 2ª categoría) y para industria. No hubo diferencias significativas en la producción registrada entre los distintos túneles y el testigo. Aunque si la producción total se desglosa por meses, se aprecia que la producción registrada en los meses de enero y febrero en los túneles donde se aplicó un riego de precisión es superior a la registrada en el túnel testigo. Este aumento de producción en los primeros meses de campaña es importante debido a que los precios en esta época son más elevados. En el resto de meses la producción fue prácticamente igual para todos los túneles. Esta mayor producción en meses tempranos es debida a que se aplicaron las mismas unidades fertilizantes que el agricultor pero con pulsos de riego de menor duración que mantenían la humedad y nutrientes en la zona radicular evitando su lixiviación. Respecto a la producción por categorías no hubo ninguna diferencia, siendo el porcentaje de fruta destinado a primera, segunda categoría e industria igual en todos los túneles.

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

Además de la producción también se realizó el seguimiento de la calidad de la fruta, midiendo grados Brix, pH, acidez, peso por unidad, forma, decoloración, incidencia de botrytis, sabor y color visual, no existiendo ninguna diferencia apreciable en la calidad de la fruta respecto al testigo.

El factor económico es determinante a la hora de implantar un nuevo sistema en campo. El sistema implantado ha demostrado ser fiable y robusto, y debe considerarse como una inversión más que como un coste. Los elementos más importantes a instalar en campo están disponibles en el mercado y son asequibles y de fácil instalación, entre ellos destacamos:

Los emisores autocompensantes que aunque son más caros, debido a que la vida útil es mayor, el coste por hectárea es igual que el de las cintas de riego de una campaña de duración. El coste aproximado es de entre 350 y 430 euros/ha y año para los cinco emisores ensayados en campo. El coste adicional de los emisores de más de una campaña de duración es la recogida y almacenamiento del emisor que se ha estimado en 98,1 euros/ha.

Los sensores de humedad que son dispositivos muy útiles para reajustar los tiempos de riego y comprobar que no hay pérdidas de agua por percolación. El coste de los sensores que se han instalado en campo es de 800-1000 euros (datalogger con 3 sondas de muestreo). Estos equipos tienen muy poco mantenimiento y su vida útil es larga si se mantienen y conservan bien.

El programador de riego, no es un coste adicional ya que la mayoría de las fincas tienen un programador de riego y fertirriego. Igual ocurre con las electroválvulas, que son elementos muy empleados en sistema de riego, y que deben ir provistas de un regulador de presión que permita limitar ésta a la de trabajo del emisor.

El contador inteligente, que facilita un histograma de caudales con rango de presiones, es recomendable instalarlo en cada hidrante o sector de riego. El contador instalado tiene un coste de entre 200 y 400 euros dependiendo en gran parte del caudal de circulación y del número de contadores que se adquieren.

La estación agroclimática no es imprescindible ya que hay una red de estaciones públicas que registran los datos de ET_0 diarios al aire libre, y en zonas con agricultura

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

bajo plástico están empezando a registrar esos datos también dentro de invernadero. En cualquier caso, el precio de la estación instalada en campo fue de 1500 euros, con un coste de mantenimiento mínimo.

La implementación en campo del sistema integral de riego de precisión ha tenido un coste adicional fijo por hectárea de 98,1 euros de recogida de los emisores autocompensantes. El resto de dispositivos como son los sensores de humedad, contadores, y estación agroclimática es una inversión inicial que se computa al conjunto de la explotación y que tienen un vida útil larga.

El ahorro que se puede obtener derivado de la reducción del volumen de agua bombeado (agua y energía) y de fertilizantes se ha estimado en 864 euros/ha y año. Además este ahorro conlleva un beneficio ambiental importante ya que reduce el volumen de agua extraída para el cultivo, así como los problemas de contaminación difusa producidos por el lavado de fertilizantes.

6.6. CONCLUSIONES

El riego de precisión no consiste únicamente en la instalación de sistemas de riego precisos acompañados de nuevas tecnologías. El riego de precisión implica un enfoque global o integral del manejo del agua combinado con el mejor uso del resto de los recursos. Para ello, se ha propuesto un sistema de riego de precisión que contempla tres etapas para mejorar la eficiencia en el uso del agua en la producción de fresa en el entorno de Doñana.

La primera etapa consiste en la evaluación del manejo del riego llevado a cabo por los agricultores mediante indicadores de gestión. El uso conjunto de los indicadores agua aplicada total, RIS y huella hídrica aplicada, permite evaluar el uso del agua y detectar las posibles ineficiencias y problemas en la gestión.

En la segunda fase, a partir de las ineficiencias detectadas en la fase anterior, se ha diseñado un sistema de riego en parcela basado en la utilización de un emisor autocompensante y antidrenante como más adecuado para el riego por pulsos de corta duración del cultivo de fresa. Este emisor se ha seleccionado tras la correspondiente

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

evaluación en laboratorio, modelización con un simulador hidráulico y ensayo en campo, debido a que no limita o restringe el diseño de la red de riego debido a sus características hidráulicas que mantienen un rendimiento de aplicación alto durante toda la campaña. El sistema de riego diseñado ha sido instalado en campo acompañado de nuevas tecnologías disponibles en el mercado, robustas y simples de instalar, y que ayudan al manejo y control del proceso de riego. El sector está controlado con una electroválvula, un regulador de presión, un programador de riego y un contador inteligente.

En la tercera fase se calculan las necesidades hídricas del cultivo, ofreciendo el tiempo de riego diario y el pulso óptimo atendiendo al bulbo húmedo que se genera en ese tipo de suelo, que se ha estimado utilizando el modelo numérico Hydrus, y que se verifica con las medidas registradas por una sonda de humedad instalada en el lomo. Las necesidades de riego diarias se estiman con datos de series históricas al inicio de la campaña y se actualizan semanalmente con datos registrados en la estación climática más cercana (pública o privada) y de los sensores de humedad.

El sistema de riego de precisión diseñado se ha instalado en una finca comercial de fresa para evaluar su comportamiento. Se ha comprobado que los emisores autocompensantes mantienen un valor más alto de U_s y R_a durante toda la campaña que las cintas de riego lo que les hace más idóneos para un riego por pulsos de corta duración, siendo el más adecuado el emisor autocompensante y antidrenante.

Con el sistema propuesto la lámina bruta aplicada en la fase por goteo y medida con contador ha sido de 3344,6 m³/ha siendo 6120,5 m³/ha en el resto de la finca. El ahorro potencial de agua en la finca del ensayo, en esta fase del cultivo fue del 45%. El volumen total de agua aplicada con el sistema de riego de precisión teniendo en cuenta las fases previas del cultivo fue de 4604,6 m³/ha.

El hecho de que la lámina bruta aplicada haya sido menor que las necesidades teóricas del cultivo calculadas para una campaña promedio en este trabajo (4591 m³/ha) pone de manifiesto la importancia de ajustar la programación inicial del riego a las circunstancias concretas de cada finca, en especial la variedad y el tipo de suelo. En el cálculo de las necesidades teóricas de cultivo se obtienen valores que deben tomarse como valores de referencia pero que deben adaptarse a las condiciones particulares de

6. EL RIEGO DE PRECISIÓN

cada explotación. Se pone de manifiesto la importancia de acometer estos estudios a a escala de finca, para posteriormente poder extrapolar estos datos a una escala regional o de cuenca.

Por lo observado, un sistema de riego preciso y una programación adecuada es crítico para hacer un uso eficiente del recurso y disminuir la demanda de éste en una zona tan sensible como es el entorno de Doñana. El coste de implantación es reducido, y debe considerarse como una inversión más que como un coste. Además del beneficio ambiental producido, también tiene asociado un beneficio económico derivado de la disminución del volumen de agua bombeada para el cultivo y del uso de fertilizantes.

La metodología descrita sería fácilmente implementable en un software de aplicación directa para los agricultores, de forma que les proporcionase el tiempo de riego actualizado semanalmente para que bien sea el propio agricultor el que introduzca la información en el programador de riego o que esta operación se haga incluso de forma remota.



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES

7. CONCLUSIONES

1. La agricultura de regadío actual se encuentra en un momento crítico debido al incremento de costes de producción, estabilización o descenso de los precios de mercado y una creciente presión respecto a los impactos ambientales que producen. Esta situación está obligando a los agricultores a buscar formas de maximizar la rentabilidad de los cultivos y lograr la sostenibilidad integral (socioeconómica y ambiental) de la agricultura de regadío.
2. En esta situación se encuentra el sector de la fresa onubense que es considerado como el cultivo con mayor trascendencia económica y social de la provincia. Sin embargo esta actividad agraria intensiva se considera como una de las actividades que más problemas ambientales genera, siendo especialmente graves los relacionados con el uso del agua dada la cercanía de la zona fresera al Parque Nacional de Doñana.
3. Junto a la existencia de una Normativa en materia de regadío ambigua y compleja ha propiciado que el sector sea acusado con frecuencia de despilfarro de agua y de hacer un uso insostenible del recurso, afectando negativamente a su imagen internacional. No hay datos oficiales de la demanda real del cultivo y los agricultores han puesto de manifiesto que ésta es mayor que la dotación establecida en los Planes Hidrológicos que afectan a la zona así como en el Plan especial de ordenación de la corona norte forestal de Doñana (4500 m³/ha).
4. Se ha llevado a cabo un análisis sobre la demanda real de riego del cultivo, así como de la gestión que se realiza de dicho recurso por los agricultores en una muestra de 22 fincas durante las campañas 2010-2013. Dicho análisis ha permitido identificar las buenas prácticas agrícolas tanto en la gestión como en los sistemas de riego existentes, poniendo de manifiesto las necesidades de mejora en el proceso.

7. CONCLUSIONES

5. Las necesidades brutas totales de riego para una campaña promedio (inicio 1 de octubre y final de campaña 31 de mayo) asciende a valores cercano a 7000 m³/ha incluyendo alomado y plantación. Estos valores se han contrastado con los valores registrados en campo y que arrojan un valor medio de 7066 m³/ha, oscilando el valor más frecuente según campaña entre 6200 y 6500 m³/ha. Se desprende que la demanda real de riego del cultivo de fresa es del orden de un 38-45% mayor que lo que se establece en el Plan especial de ordenación del regadío de la corona norte forestal de Doñana (4500 m³/ha).

6. Se ha llevado a cabo una evaluación conjunta del uso y manejo del agua mediante el análisis combinado del indicador de huella hídrica y el indicador de adecuación del riego RIS. De dicha evaluación se obtiene que la huella hídrica aplicada (HHA_{azul}) proporciona el valor del agua total extraída del medio para obtener una unidad de producto y por tanto es más realista, desde el punto de vista de gestión del recurso a escala de finca, que el concepto de huella hídrica tradicional (HH_c) que se calcula con el valor de agua usada por el cultivo, es decir evapotranspirada. El valor de HHA_{azul} calculado a escala de finca ha oscilado entre 100 y 118 m³/ha y el de HH_c entre 60 y 80 m³/ha, muy lejos de los valores de HH_c calculados por otros autores de 140 m³/t y 173 m³/t, a partir de datos que se obtienen de estadísticas nacionales y bases de datos genéricas.

7. Del análisis del indicador RIS se observa que aunque un número considerable de fincas presentan valores óptimos cercanos a 1,2, hay un conjunto de 6-8 fincas que presentan valores muy cercano o por encima de 1,5 para al menos una de las campañas de estudio. En cuanto al manejo del riego se ha detectado que los pulsos de riego aplicados son muy heterogéneos no habiendo un criterio claro que permita definir el pulso óptimo de riego en función del grado de desarrollo de la planta y el tipo de suelo. De igual modo, se observa que los emisores típicamente empleados en el cultivo de fresa, las cintas de riego no autocompensantes de una campaña de duración no son los emisores más adecuados para llevar a cabo un riego por pulsos de corta duración, como se requiere en los suelos con alto contenido de arena presentes en la zona.

7. CONCLUSIONES

8. Se ha comprobado que el modelo Hydrus es una herramienta adecuada para simular el movimiento del agua en el suelo, y por tanto poder definir diferentes estrategias de riego eficientes que eviten las pérdidas de agua por percolación con las condiciones de manejo típicas del cultivo de fresa. Se ha definido el pulso óptimo de riego en tres etapas diferentes del cultivo para el emisor típico de la zona ($5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$), oscilando éste desde los 10-20 minutos al inicio de la campaña hasta tiempos de riego de 60 minutos que deben aplicarse en pulsos de menor duración para mantener el valor de humedad más estable en la zona radicular.
9. Una vez conocido cuánto y durante cuánto tiempo regar, es crítico poder aplicar el volumen de agua requerido de una forma precisa y uniforme a lo largo de cada sector de riego. Para ello se ha diseñado un sistema de riego de precisión, apoyado en nuevas tecnologías (sensores de humedad, estación climática, electroválvulas, programador de riego, goteros autocompensantes y/o antisucción, reguladores de presión, contadores inteligentes) que ayuden a la toma de decisiones y al manejo del sistema.
10. Un riego de precisión no consiste únicamente en la instalación de sistemas de riego precisos acompañados de nuevas tecnologías. El riego de precisión implica un enfoque global o integral del manejo del agua en combinación con un mejor uso del resto de los recursos. Para ello se ha propuesto una metodología basada en tres etapas, y que hemos denominado sistema integral de riego de precisión. Se ha realizado una experiencia piloto con dicho sistema en una finca comercial de fresa durante la campaña 2013-2014 habiéndose obtenido reducciones en la lámina bruta aplicada de un 45% con respecto a la gestión del riego llevada a cabo por el agricultor, manteniendo la producción y la calidad de la fruta.
11. Por la investigación desarrollada en este trabajo, se desprende que hay posibilidades reales de mejora en el riego del cultivo de fresa. Se debe motivar y potenciar que los agricultores implementen sistemas de riego que les permitan hacer un uso más eficiente del recurso, minimizando el impacto de la actividad sobre los recursos hídricos disponibles en una zona tan sensible como es el entorno de Doñana.

7. CONCLUSIONES

7.1. LÍNEAS DE TRABAJO ACTUALES Y FUTURAS

La investigación desarrollada en esta tesis durante las campañas 2010-2013 se ha continuado mediante un proyecto financiado por la Fundación Coca-Cola y titulado “Reducing the hydrological impact of imported strawberries – Huelva Region of Spain” durante dos campañas más, 2013-2015, cuyos resultados se pueden seguir a través del blog (riegofresacocacola@blogspot.com.es).

Los principales objetivos o líneas de trabajo que se están desarrollando actualmente están encaminadas a implementar medidas de acción que permitan reducir la demanda de agua del cultivo de fresa así como promover un uso y gestión sostenible del recurso. En la campaña pasada se instaló el sistema integral de riego de precisión en una finca con resultados muy satisfactorios. En esta campaña se ha instalado en otras dos fincas con suelos de textura diferente.

Otro aspecto importante es la transferencia de resultados de investigación y comunicación con los agricultores y distintos interlocutores que operan en el sector de la fresa en Huelva. Por este motivo se están desarrollando numerosas jornadas y talleres para promover las buenas prácticas de riego en el cultivo de fresa y mostrar los resultados obtenidos en la campaña.

Con la finalidad de poder llegar a más agricultores se ha desarrollado un programa informático para el cálculo de la dosis y tiempo de riego en el cultivo de fresa con el manejo típico del cultivo de la zona, y que se ha acompañado con el desarrollo de una aplicación móvil denominada “Irrifresa”, libre y disponible para dispositivos Android. En la campaña 2014-2015 se está monitorizando y dando recomendaciones de riego mediante el programa y aplicación móvil a una superficie de aproximadamente 1500 ha sobre un total de unas 6500 ha de fresa en la provincia de Huelva.

En cuanto a posibles líneas futuras de trabajo que se complementan con las ya citadas, habría que ir a maximizar en todo lo posible la eficiencia en el uso de los recursos e inputs empleados en la agricultura de regadío en general. Es particularmente

7. CONCLUSIONES

importante el caso del cultivo de fresa en la zona de estudio. En esta línea se deben fomentar:

1. Reducir la generación de residuos plásticos. Una hectárea de fresa produce un volumen importante de residuos plásticos derivados del acolchado de los lomos, y el plástico del macrotúnel. Una hectárea de fresa tiene entre 8000 y 10000 metros lineales de cinta de riego que se sustituyen cada campaña. En esta línea se puede fomentar el uso de goteros de más de una campaña de duración. En este estudio se ha demostrado que los emisores autocompensantes de más de una campaña de duración son adecuados al riego del cultivo de fresa y económicamente viables.
2. Reducción en el uso de fertilizantes y agroquímicos. Hay una tendencia a aplicar más unidades fertilizantes de las que necesita el cultivo, que unido a un suelo arenoso y riegos abundantes facilita la pérdida de nutrientes por lixiviación y el consiguiente problema ambiental que genera. Es importante definir de manera precisa la dosis de fertilizante que necesita el cultivo en función del desarrollo fenológico de la planta y aportarlo con un manejo adecuado del riego para evitar que se lave.
3. Realizar enmiendas orgánicas de suelo incorporando la biomasa generada por las plantas de fresa al final de cada campaña para mejorar la capacidad de retención de la humedad y de nutrientes en la zona radicular.
4. Potenciar la captación y almacenamiento de aguas pluviales, tal y cómo se recoge en el Plan especial de ordenación. Facilitar la creación de balsas para almacenamiento de aguas pluviales integradas en el medio, y con elementos paisajísticos que permitan el anidamiento de aves acuáticas, aspecto muy importante en la zona de estudio debido a la existencia de espacios catalogados como zonas de especial protección de aves.
5. Estudiar la posibilidad de incorporar la energía solar como fuente de alimentación del sistema de riego, lo que permitirá además disminuir la huella de carbono de la actividad.

7. CONCLUSIONES

7 bis. CONCLUSIONS

1. In recent years, irrigated agriculture has been in a critical situation due to growing production costs, stabilization or reduction of product prices, and rising pressure to minimize environmental impacts. These circumstances are forcing farmers to find new ways of using resources more efficiently in their production processes.
2. The strawberry sector in Huelva region, which is the crop with greater transcendence from a social and economical point of view, is suffering from this situation. Nevertheless the strawberry which is as a water-intensive crop is considered an activity that causes serious environmental impacts and particularly severe those related to the use of water due to the proximity of the production area to the Doñana National Park.
3. Because of the existence of an ambiguous and complex irrigation regulation, the strawberry sector has been frequently accused of wasting water, impacting negatively to the brand value, image and market opportunities. Although there are no official figures about the real crop water demand, farmers have been highlighted that the current water used by the crop is much higher than the water allocation proposed in the different Hydrological Plans affecting to the study area, as well as the “Special Management Plan of Northern Doñana Irrigated Areas”, which proposes a water allowance of 4500 m³/ha.
4. An analysis of the current water use and management within a sample of 22 strawberry commercial farms during the seasons 2010-2013 has been carried out. This analysis has allowed identifying the best agricultural practices, specially related to water use and management and the irrigation systems installed in the field. It shows the needs for improvement in the irrigation process, which promotes a sustainable water use in a cropped area that moves from 6000 to 7000 ha depending on the season.

7. CONCLUSIONS

5. The total crop water requirements estimated for an average season (from 1st October to 31st of May) reach values near to 7000 m³/ha. These values have been tested against the values recorded in the farms which amount to an average value of 7066 m³/ha, with the most frequent value moving from 6200 to 6500 m³/ha depending on the season. It has been reflected that the real crop water demand is about 40% higher than the water allowance fixed in the Special Management Plan already mentioned.
6. It has been developed a joint evaluation of the water use and management through the crop water footprint accounting (HHA_{blue}) and the relative irrigation supply indicators (RIS). The crop water footprint applied (HHA_{blue}) counts all water withdrawals to obtain a unit of product. From a resources management point of view at farm scale, this concept is more realistic than the traditional concept of crop water footprint (HH_c), that considers water consumed (evapotranspired) instead of applied water. The value of HHA_{blue} calculated in this research goes to an average value that moves from 100 to 118 m³/ha. The HH_c average value is within the interval 60-80 m³/ha, which is significant smaller than the values reported by other authors (140 and 173 m³/t). These differences may be due to the fact that real climate and crop data collected at farm level were used instead of public or standard statistics.
7. When the applied water is compared with the irrigation needs, the most frequent value of RIS is 1,1-1,2 which is within the right interval (1-1,2). However, it is important to point out that there are six to eight farms that have RIS values above 1.5 for at least one season. Another important finding is that there is a large variability within the farms, finding that irrigation pulses duration are very heterogeneous within the sample. There is not a clear criterion to define the optimal pulse duration related to the rate of crop development and the soil texture. Similarly, it is observed that the emitters typically used in the strawberry crop, the one season plastic tape not self-compensating are not the most adequate emitter to irrigate in short duration pulses, which is strongly recommended in the typical sandy soils existing in the area.
8. Hydrus model has been proved to be an adequate tool to simulate the water movement in the soil, and therefore it allows us to define different strategies of efficient irrigation that avoid water losses by percolation with the typical crop

7. CONCLUSIONS

management. It has been defined the optimum irrigation pulse duration of three different crop stages for the most frequent emitter used ($5 \text{ l.h}^{-1}.\text{m}$). The pulse duration moves from 10 minutes at the very beginning of the season until irrigation times of 60 minutes which should be apply in shorter pulses to maintain the humidity more constant in the root zone.

9. Once it is known how much water and how long the crop has to be watered, it is essential to apply the volume of water required as efficiently and uniformly as possible along the irrigation sector. To achieve this goal a precision irrigation system has been designed, supported by new technologies (soil sensors, weather station, electro-valves, irrigation controller, self-compensating emitters, pressure regulators, smart flowmeters) that helps with the decision making process and the system management.
10. Precision irrigation is not only the installation of high technology irrigation systems and sensors in the field. Precision irrigation implies an overall understanding of the water management along with a better use of the resources. Thus, a three stages irrigation methodology has been developed and applied at field level to maximize the water use efficiency. The system has been installed in a commercial strawberry farm during the season 2013-2014. Reductions of 45% of the total gross water applied have been achieved in relation to the volume of water applied by the farmer, maintaining the yield and the fruit quality.
11. According to the research carried out in this work, it is appreciated that there are possibilities for improvements in the strawberry irrigation process. The implement of precision irrigation systems should be enhanced and motivated by the Administration. The improvement of the irrigation process will help farmers to use water more efficiently, reducing the crop water abstraction, percolation and groundwater pollution and therefore minimizing the hydrological impact of the strawberry crop in a very sensitive area as Doñana.

7.1. bis. CURRENT AND FUTURE RESEARCH

The research developed in this thesis has been continued within a project funded by The Coca-Cola Foundation and titled “Reducing the hydrological impact of imported strawberries – Huelva Region of Spain”. The project will be carried out during the seasons 2013-2015, and the results are available at: “riegofresacocacola@blogspot.com.es”

The main goals of this project are related to the implementation of positive actions measures designed to achieve a reduction in the strawberry water demand, as well as to promote a sustainable use of water. During the last season the precision irrigation system was installed in a commercial farm with very satisfactory results. In this season, the system has been installed in two farms, with different soil texture.

Another key element to consider is the transfer of the outcomes obtained and the spreading of the results within the farmers and different actors working in the strawberry sector. For this reason, several seminars, workshops and trainings have been developing with the intention to promote good practices in irrigation and show the results.

With the intention of reaching a great number of farmers, a software has been developed to calculate the water needs and the irrigation time. Also a mobile application called “Irrifresa” has been developed and available for Android devices. During season 2014-2015 a surface of 1000 ha over a total strawberry area of 6500 ha in Huelva region have been receiving irrigation recommendation through the software and the app.

In relation to future work lines, these should be oriented to do everything possible to maximize the efficiency in the resources and inputs used in the irrigated agriculture in general. It is particularly important the case of the strawberry crop in the study area. In regarding with this topic it should be promoted:

7. CONCLUSIONS

1. The reduction of plastic wastes. One strawberry hectare generates an important volume of plastic wastes derived from the beds covering and the polytunnels. Furthermore, one strawberry hectare has between 8000 and 10000 meters of irrigation plastic tapes that are removed every season. In this aspect, the use of irrigation emitter with longer duration should be promoted.
2. The reduction in the use of fertilizers and chemicals. There is a tendency to apply more unit values than those required by the crop, that linked to a sandy soil and large irrigation pulses facilitate the nutrient losses by lixiviation with the attendant risk of groundwater contamination. It is important to define the accurate rate of fertilizer required by the crop in relation to its growth and apply it with a right irrigation management to avoid losses by percolation.
3. Improving the water and nutrient retention capacity in the root zone by soil organic amendments. It should be taken into account the incorporation of the crop biomass at the end of the season.
4. Encouraging the rainfall water catchment and the storage, as it is proposed in the special irrigation Plan. To facilitate the creation of water reservoir integrated in the environment, with landscape elements that allow the aquatic bird's nesting. This is crucial in the study area due to the existence of a large surface designated as Special Protection Area for birds.
5. Considering the possibility of involving solar energy as a power source of the irrigation system. This allows farmers to diminish the carbon footprint of their activity.

7. CONCLUSIONS



UNIVERSIDAD DE CORDOBA

eidA3

escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 8

BIBLIOGRAFÍA

8. BIBLIOGRAFÍA

- Adams, L., 2009. Water Footprinting. Kingston University. UK.
- Adhikari, D.D., Goorahoo, D., Cassel, F., Zodolske, D., 2008. Smart irrigation as a method of Freeze Prevention: A Proposed Model. 2008 ASABE Annual International Meeting. Providence, Rhode Island, Paper No. 085189.
- Adesva, Centro Tecnológico de la Agroindustria, 2010. Análisis de la campaña hortofrutícola de Huelva. Campaña 2009/2010.
- Agenda del Regadío Andaluz Horizonte 2015. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía. 2011.
- Aldaya, M. M., García-Novo, F., Llamas, M.R., 2010. Incorporating the water footprint and environmental water requirements into policy: reflections from the Doñana Region (Spain). Papeles de Agua Virtual. Número 5. Fundación Marcelino Botín.
- Allan, J.A. 1998. Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *Ground Water* 1998, 36, 545-546.
- Allen, R. G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998 & 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO, riego y drenaje, nº 56. Roma.
- Alliance for Water Stewardship, 2012. International Water Stewardship Standard. First Draft for Stakeholder Input. Version 03.13.2012. Disponible en: www.allianceforwaterstewardship.org/assets/documents/AWS_Standar_First_Draft_v_03_13_2012.pdf.
- Arbat Pujolràs, G., 2005. Desarrollo y validación de un modelo de simulación de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño agronómico y al manejo en riego localizado. Tesis Doctoral, Universidad de Lleida.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ASAE standard ASAE S526.3 September 2007. Soil and water terminology. American Society of Agricultural and Biological engineers (ASABE), St. Joseph, Michigan, 22 p.
- Assouline, S., 2002. The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 1630-1636.
- Atlas Hidrogeológico de Andalucía., 1998. Acuíferos de Almonte-Marismas y suroeste de la provincia de Sevilla. Instituto Tecnológico Geominero de España. IGME.
- Bandenay Egoávil, G.L., 2013. Caracterización del flujo hídrico y la dinámica salina en un green experimental con diferentes sustratos. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I de Catellón.
- Bayart, J.B., Bulle, C., Deschênes, L., Margni, M., Pfister, S., Vince, F., Koehler, A. 2010. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 15 (5), 439-453.
- Ben-Gal, A., Ducley, L.M., 2003. Phosphorus availability under continuous point source irrigation. *Soil Sci. Soc. Am.* 67, 1449-1456.
- Berger, M., Finkbeiner, M., 2010. Water footprinting: how to address water use in life cycle assessment? *Sustainability* 2, 919-944.
- Bøstán, N., 2011. Modelling and analysis of soil wetting patterns under surface drip irrigation. School of Applied Sciences. MSc by Research, October, 2011. Cranfield University.
- Burt C.M., Clemmens A.J., Strelkoff T.S., Solomon K.H., Bliesner R.D., Howell T.A., Eisenhauer D.E., 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Div., ASCE*, 123 (6), 423-442.
- Camacho Poyato, E., 2010. Evaluación de unidades de riego localizado. ETSIAM. Universidad de Córdoba.
- Camacho Poyato, E., González Perea, R., García Morillo, J., Montesinos Barrios, P., Rodríguez Díaz, J.A., 2013. Eficiencia en la aplicación de agua a

8. BIBLIOGRAFÍA

- través del sistema de riego en el cultivo de la fresa. Informe confidencial realizado por encargo de FERAGUA. Universidad de Córdoba.
- Capraro, F., Patino, D., Tosetti, S., Achugurenky, C., 2008a. Neural network-based irrigation control for precisión agriculture. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Sanya, China, April 6-8. Pp357-362.
 - Capraro, F., Schugurenky, C., Vita, F., Tosetti, S., Lage, A., Patiño, D., 2008 b. Intelligent irrigation in grapevines: a way to obtain different wine characteristics. Proceedings of the 17th World Congress of the International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea.
 - Carsel, R. and Parrish, R., 1998. Developing joint probability of soil water retention characteristics. *Water Resources Research*, 24 (5), 755-769.
 - CEOWM, 2012. Water Assessment Methods. Available at: ceowatermandate.org/water-assessment-tools-methods/.
 - Chapagain, A. K., and Orr, S., 2009. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case of Spanish tomatoes, *Journal of Environmental Management* 90: 1219-1228.
 - Charlesworth, P., 2000. Soil Water Monitoring. CSIRO Land and Water. National Program for Irrigation Research and Development. Irrigation Insights No.1.
 - Chu, S.T., 1994. Green-Ampt analysis of wetting patterns for surface emitters. *Journal of Irrig. Drain. Eng.* ASCE 120 (2), 414-421.
 - Chico, D., Aldaya, M., Garrido, A., 2013. A water footprint assessment of a pair of jeans. *Journal of Cleaner Production*. 57: 238-248.
 - Coates, R., Delwiche, M., Brown, P., 2004. Design of a system for individual microsprinkler control. *Trans ASABE*, 49(6):1963-1970.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Cook, F. J., Thorburn, P.J., Fitch, P., Bristow, K.L., 2003. WetUp: a software tool to display approximate wetting pattern from drippers. *Irrig. Sci.* 22, 129-134.
- Cote, C.M., Bristow, K.L., Charlesworth, P.B., Cook, F.J., Thorburn, P.J., 2003. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrig. Sci.* 22, 143-156.
- Daccache, A., Knox, J.W., Weatherhead, E.K., Daneshkhah, A., Hess, T.M., 2014. Implementing precision irrigation in a humid climate – Recent experiences and on-going challenges. *Agricultural Water Management*, [dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.018](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.05.018).
- Directiva de Aguas Europea, 2000. Directive 2000/60/CE of the European Parliament and of the Council. *Off. J. Eur. Commun.* (22/12/2000) L 327, 1-72.
- Doorembos J., Pruitt W. O. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO.
- Dukes, M.D., Scholberg, J.M. 2004. Automated subsurface drip irrigation based on soil moisture. ASAE Paper No. 052188.
- EEA, European Environment Agency., 2009. Water resources across Europe: confronting water scarcity and drought. EEA Report No. 2/2009. Copenhagen.
- eideA3, Escuela Internacional de Doctorado en Agroalimentación. Programas de Doctorado RD 1393/2007. Universidad de Córdoba.
<http://www.uco.es/estudios/idep/doctorado/progamas/eida3/rd1393-2007>.
- Ene, A.S., Teodosiu, C., Robu, b., Volf, I., 2013. Water footprint assessment in the winemaking industry: a case study of office paper. *Journal of Cleaner Production.* 24, 30-35.
- Estrategía Nacional de Regadíos., 2015. Evaluación Ambiental Estratégica de la Estrategia nacional para la Modernización Sostenible de los Regadíos. Horizonte 2015. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Evett, S.R., Peters, R.T. Howell, T.A., 2006. Controlling water use efficiency with irrigation automation: cases from drip and center pivot irrigation of corn and soybean. Southern Conservation Systems Conference. Amarillo TX.
- Fallon, P., Betts, R., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation: the importance of an integrated approach. *Science of Total Environment* 408:5667-5678.
- FAO, 2010b. "CROPWAT 8.0 model", FAO, Rome.
- Feddes, R. A., Kowalik, P.J., Zaradny, H., 1978. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*, John Wiley & Sons, New York, NY.
- Fereres, E., Orgaz, F., Gonzalez –Dugo, V., 2011. Reflections on food security under water scarcity. *J Exp Bot* 62:4079-4086.
- Fernández, M^a. D., Orgaz, F., Fereres, E., López, J.C., Céspedes, A., Pérez, J., Bonachela, S., Gallardo, M., 2001. Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Estación experimental "Las Palmerillas" Edita CAJAMAR (Caja Rural de Almería y Málaga).
- Fernández, M. D., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R., López, J. C., Granados M. R., Gallardo, M., Fereres, E., 2010. Measurements and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science*. 28(6): 497-509.
- Fox, D., 1981. Judging air quality model performance: A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. *Bull Am. Meteorol. Soc.*, 62, 599-609.
- Fundación Doñana 21., 2006. Manual de Buenas Prácticas Agrarias Sostenibles. "De la Agricultura al desarrollo Rural Sostenible". Available at: <http://www.donana.es/wp-content/uploads/2013/01/Manual-Buenas-practicas-agrarias-sostenibles.pdf>.
- García Morillo, J., Rodríguez Díaz J.A., Camacho, E., Montesinos, P., 2015. Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops. *Journal of Cleaner Production* 87. 594-602

8. BIBLIOGRAFÍA

- García Morillo, J., Martín, M., Camacho, E., Rodríguez Díaz, J.A., Montesinos, P., 2015b. Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. *Agricultural Water Management*:doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.021.
- García Morillo, J., Montesinos, P, Rodríguez Díaz, JA, Camacho, E., y Hess, T., 2012. Hacia la sostenibilidad del cultivo de la fresa: demanda real de riego y posibilidades de mejora. *Actas del XXX congreso nacional de riegos*, D-1, 149-150.
- Gärdenäs, A.I., Hopmans, J.W., Hanson, B.R., Šimůnek, J., 2005. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management* 7, 219.242.
- Gavilán P., Lozano D., Ruiz N., Molina F. 2014. El riego de la fresa en el entorno de Doñana. Evapotranspiración, coeficientes de cultivo y eficiencia del riego. *Acta XXXII Congreso Nacional de Riegos*. Madrid 2014.
- González Perea, R., Camacho, E., Montesinos, P., Rodríguez Díaz, J.A. 2014. Critical points: interactions between on-farm irrigation systems and water distribution network. *Irrigation Science*, 32: 255-265.
- Hanson, B.R., Bowers, W., Davidoff, B., Kasapligil, D., Carvajal, A., Bendixen, W., 1995. Field performance of micro-irrigation systems. *Proc 5th In Microirrigation Conf, ASAE, St Joseph, MI*, p769-774.
- Hanson B., Bendixen W., 2004. Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. *California Agriculture*. Vol 58, number 1.
- Hargreaves G.H., Samani Z.A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1(2): 96-99.
- Hoekstra, A. Y., 2003. Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade, Delft, The Netherlands. *Value of Water Research Report Series N° 12, UNESCO-IHE, Delft, The Netherlands*.
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2009. *Water Footpring Manual*. Enschede, Netherlands.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. Earthscan London.
- Hornbuckle, J.W., Car, N.J., Destombes, J., Smith, D.J., Dhristen, E.W., Goodwin, I., McClymont, L., 2009a. Measuring, mapping and communicating the effects of poor drip irrigation distribution uniformity with satellite remote sensing and web based reporting tools. Presented at the Irrigation and Drainage Conference 2009, Irrigation Australis Ltd, Swan Hill, Vic, Australis, 18-21 Oct.
- Hubacek, K., Guan, D., Barrett, J., Wiedmann, T., 2009. Environmental implications of urbanization and lifestyle change in China: ecological and water footprints. *Journal of Cleaner Production*, 17 (14), 1241-1248.
- Hunt, C. E. 2004. *Thirsty Planet – strategies for sustainable water management*. Zed Books, New York.
- INE. 2008. Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadística. Estadísticas e Indicadores de Agua. Datos correspondientes a 2005.
- Instrucción de planificación hidrológica (IPH), 2011. ARM/1195/2011. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. BOE, Gobierno de España.
- ISO 14046., 2013. Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jefferies, D., Muñoz, I., Hoedges, J., King, V.J., Aldaya, M.M., Ercin, A.E., Milà I Canals, LL., Hoekstra, A.Y., 2012. Water footprint and life cycle assessment as approaches to assess potential impacts of products on water consumption. Key learning points from pilot studies on tea and margarine. *Journal of Cleaner Production*, 155-166.
- Jiang, S., Pang, L., Buchan, G., Šimůnek, J., Noonan, M., Close, M. 2010. Modelling water flow and bacterial transport in undisturbed lysimeters under

8. BIBLIOGRAFÍA

- irrigations of dairy shed effluent and water using Hydrus-1D. *Water Research* 44, 1050-1061.
- Jiménez-Martínez, J. 2010. Aquifer recharge from intensively irrigated farmland. Several approaches. PhD Thesis, Technical University of Catalonia.
 - Junta de Andalucía. 2009. II Plan de Desarrollo Sostenible. Doñana. Memoria Informativa. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Octubre 2009.
 - Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Vivienda. 2011. Plan Especial de ordenación de las zonas de regadío ubicadas al noroeste de la corona forestal de Doñana, en los términos municipales de Almonte, Bonares, Lucena del Puerto, Moguer y Rociana del Condado (Huelva).
 - Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. 2014. Plan Especial de ordenación de las zonas de regadío ubicadas al noroeste de la corona forestal de Doñana.
 - Kandelous, M.M., Šimůnek, J., 2010. Comparison of numerical, analytical and empirical models to estimate wetting pattern for surface and subsurface drip irrigation. *Irrig. Sci.*
 - Kanzari, S., Hachicha, M., Bouhlila, R., Battle-Sales, J., 2012a. Characterization and modeling of water movement and salts transfer in a semi-arid region of Tunisia (Bou Hajla, Kairouan)–Salinization risks of soils and aquifers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 86, 34-42.
 - Knox, J.W., Kay, M.G., Weatherhead, E.K., 2012. Water regulation, crop production and agricultural water management: understanding farmer perspectives on irrigation efficiency. *AWM* 108:3-8.
 - Kroes, J., van Dam, J., 2003. Reference manual SWAP: Version 3.0.3. Rep. 773. Alterra Green World Res., Wageningen, the Netherlands.
 - Levine, G., 1982. Relative water supply: an explanatory variable for irrigation systems. Technical Report No. 6, Cornell University, Ithaca, New York, USA.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ley de Aguas Española, 2001. Ley de Aguas, Texto refundido de la ley de aguas 2001, RDL 1/2001 de 20 de Julio.
- Losada A. 1995. El Riego: Fundamentos Hidráulicos. Mundi-Prensa, Córdoba.
- MAARM. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente., 2006. Hechos y cifras de la agricultura, la pesca y la alimentación en España. Gobierno de España.
- Malano H., Burton, M., 2001. Guidelines for benchmarking performance in the irrigation and drainage sector. IPTRID. Rome. Italy.
- Martín Arroyo, M. 2013a. Trabajo profesional fin de carrera titulado Influencia del riego en la sostenibilidad del uso del agua en el cultivo de la fresa en el entorno del parque natural de Doñana. Universidad de Córdoba.
- Martín Arroyo M., Montesinos P., García Morillo J., Rodríguez J.A., y Camacho, E. 2013b. Influencia de los emisores de riego en la sostenibilidad del uso del agua en el entorno del parque natural de Doñana. Actas del XXXI congreso nacional de riegos, C -1, 120-131.
- Martín Arroyo M., Montesinos, P., Fernández, I., González, R., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J.A., Berbel, J., Camacho, E. 2014. Fundamentos del Riego de la Fresa en el Entorno de Doñana. www.riegofresacocacola.blogspot.com.es
- Mazzi, A., Manzardo, A., Scipioni, A. 2014. Water footprint to support environmental management: an overview. In: Salomone, R., Saije, G. (Eds.), Pathways to Environmental Sustainability: Methodologies and Experiences. Springer International Publishing AG, Cham Dordrecht, The Netherlands, ISBN 978-3-319-03825-4.
- McClymont, L., Goodwin, I, O'Connell, M., Whitfield, D., 2009. Optimising water use efficiency – a decision framework for on-farm improvements. Irrigation and Drainage Conference 2009, Irrigation Australia Ltd, Swan Hill, Vic, 18-21 Oct.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Mcoy, E., McCoy K.R., 2009. Simulation of putting-green soil water dynamics: implications for turfgrass water use. *Agricultural Water Management* 96, 405-414.
- Meron, M.R., Hallel, R., Shay, G. Feuer, R., 1996. Soil-sensor actuated automatic drip irrigation of cotton. *Proceedings International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, San Antonio, Tx, November, pp. 886-892.
- Meshkat, M., Warner, R.C., Workman, S.R., 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 125 (6), 315-323.
- Monaghan, J.M., Daccache, A., Vickers, L.H., Hess, T.M., Weatherhead, E.K., Grove, I.G., Knox, J.W., 2013. More 'crop per drop': constraint and opportunities for precision irrigation in European agriculture. *J Sci Food Agric.* 95(3):977-980.
- Moncef, H., Heidi, D., Jelloul, B., Mohamed, M., 2002. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irri. Drain.* 51, 347-360.
- Montesinos, P., Camacho, E., Campos, B., Rodríguez-Díaz, J.A., 2011. Analysis of Virtual Irrigation Water. Application to Water Resources Management in a Mediterranean River Basin. *Water Resour. Manage.* 25:1635–1651.
- Montesinos, P., Martín Arroyo, M., González, R., Fernández, I., Berbel, J., García Morillo, J., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho, E., 2014. First year report: Reducing the hydrological impact of imported strawberries – Huelva Region of Spain. Informe confidencial encargado por Fundación Coca-Cola e Innocent Drinks.
- Mualem, Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.* 12: 513-522
- Pachepsky, Y., Smettem, K., Vanderborght, J., Herbst, M., Verreecken, H., Wösten, J. 2004. Reality and fiction of models and data in soil hydrology. In:

8. BIBLIOGRAFÍA

- R.A. Feddes (Ed.) et al., *Unsaturated-Zone Modeling*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands.
- PHDHG. 2013. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (RD 355/2013).
 - PHDTOP. 2012. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Tinto, Odiel y Piedras. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (RD 1329/2012).
 - Phene, C.J., Howell, T.A., 1984. Soil sensor control of high-frequency irrigation systems. *Trans ASAE*, 27(2):392-396.
 - Philip, J.R., 1968. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. *Water Resour. Res.* 4. 1039-1047.
 - Plan Nacional de Regadíos, Horizonte 2008. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Gobierno de España.
 - Poch, R. Mailhol, J., Candela, L., Ramírez de Cartagena, F. 2005. Estimación de los riesgos de lixiviación de nitratos en suelos agrícolas: ¿Enfoque numérico o funcional? In: Samper, F., Paz, A. (Eds). *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, Vol. VII.
 - POTAD de Doñana, 2003. Plan de Ordenación del Territorio del Ámbito de Doñana. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía, Diciembre 2003.
 - Provenzano, G., 2007. Using Hydrus-2D simulation model to evaluate wetted soil volumen in subsurface drip irrigation systems. *Journal Irrig. Drain. Eng.* 133 (4), 342-349.
 - Richards, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, 318-333.
 - Ritchie, J.T., Jhonson, B.S., 1990. Soil and plant factors affecting evaporation. In B.A. Stewart and D.R. Nielsen (Eds) *Irrigation of Agricultural crops*. *Agronomy Monograph n° 30*, 363-390.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez Díaz, J.A., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Camacho, E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Reg Environ Change* 7:149-159.
- Rodríguez Díaz, J.A., Camacho, E., López, R., Pérez, L., 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: An application in Spain. *Agricultural system* 96: 250-259.
- Rodríguez Díaz, J.A., Camacho, E., Blanco, M., 2011. Evaluation of Water and Energy Use in Pressurized Irrigation Networks in Southern Spanish *Journal of irrigation and drainage engineering*.137 (10): 644-650.
- Rodríguez Díaz, J.A., Pérez, L., Camacho, E., Montesinos, P., 2012. Modernizing water distribution networks. Lessons from the Bembézar MD irrigation district, Spain. *Outlook on AGRICULTURE*. 41(4): 229-236.
- Rossman L.A. 2000. EPANET 2. User Manual. US Environmental Protection Agency (EPA), USA.
- Salmoral, G., Aldaya, M.M., Chico, D., Garrido, A., Llamas, M. R., 2010. The water footprint of olive oil in Spain. *Papeles de agua virtual*, 7. Fundación Botín. Spain.
- Salmoral, G., Dumont, A., Aldaya, M.M., Rodríguez-Casado, R., Garrido, A., Llamas, M.R., 2011. Análisis de la huella hídrica extendida de la cuenca del Guadalquivir. Fundación Botín.
- Samadanfiard, S., Sadraddini, A.A., Nazemi, A. H., Provenzano, G., Kisi, Ö., 2012. Estimating soil wetting patterns for drip irrigation using genetic programming. *Spanish Journal of Agricultural Research* 10 (4), 1155-1166.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., 2000. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. *Soil Sci. Soc. Ame. J.* 64, nº 3, 843-851.
- Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, T., 2001. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *Journal of Hydrology*, 251, 163-176.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Schwartzman, M., Zur, B. 1986. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. *Journal Irrig. Drain. Eng.* 112 (3), 242-253.
- Scott, R., Shuttleworth, W., Keefer, T., Warrick, A. 2000. Modeling multiyear observations of soil moisture recharge in the semiarid American Southwest. *Water Res. Research*, 36, nº 8, 2233-2247.
- Shannon, E.L., McDougall, A., Kelsey, K. and Hussey, B., 1996. Watercheck – a coordinated extension program for improving irrigation efficiency on Australian cane farms. *Proc Aust Soc of Sugar Cane Tech*, 18:113-118.
- Šimůnek, J., Šejna, M., van Genuchten, M. Th., 1999. The Hydrus-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2.0. Rep. IGCWMC-TPS-53, Int. Ground Water Model. Cen., Colo. Sch. Of Mines, Golden ,CO, p.251.
- Šimůnek J., Jacques D., van Genuchten M. Th., and Mallants D., 2006. Multicomponent geochemical transport modeling using the HYDRUS computer software packages, *J. Am. Water Resour. Assoc.* 42(6): 1537-1547.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2006. The Hydrus software package for simulating two and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Technical manual, Vers. 1.0. PC Progress, Prague, Czech Republic.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M., 2008. Development and applications of the Hydrus and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone, J.* 7 (2), 587-600.
- Šimůnek, J., van Genuchten, M. Th., Šejna, M., 2011. The Hydrus software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media: Technical manual, Ver. 2.0. PC Progress, Prague, Czech Republic, 258 p.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J., Shouse, P.J. 2004. Comparison of Hydrus-2D Simulations of Drip irrigation with Experimental Observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 130:4 (304).

8. BIBLIOGRAFÍA

- Smichtz, G.H. Schutze, N., Petersohn, U. 2002. New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 128 (5), 287-297.
- Smith, R.J., Baillie, J.N., McCarthy, A.C., Raine, S.R., Baillie, C.P. 2010. Review of Precision Irrigation Technologies and their Application. National Centre of engineering in Agriculture University of Southern Queensland Toowoomba. NCEA Publication 1003017/1.
- Taylor, S.A., Ashcroft, G.M. *Physical Edaphology*, Freeman and Co., San Francisco, California, p. 434-435, 1972. Cited in Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Šejna, M. 2011.
- UNEP, 2011. *Water Footprint and Corporate Water Accounting for Resource Efficiency*. Kulper, D., Zarate, E., Aldaya, M.M., Morriso, J., Schulte, P., Shneck R. Publications from Sustainable consumption and Production Branch. Available at: www.unep.fr/scp/publications/details.asp?id=DTI/1411/PA.
- UNESCO, 2006. *The 2nd UN World Water Development Report: "Water, a shared responsibility"*.
- UNESCO, 2009. *The United Nations World Water Development Report 3- Water in a Changing World*. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization. Earthscan, Paris, France, p. 429.
- van Genuchten, M. Th., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
- van Genuchten, M. Th., 1987. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Res. Rep. 121. U.S. Salinity Lab., Riverside, C.A.
- vanOel, P.R., Hoekstra, A.Y., 2012. Towards quantification of the water footprint of paper: a first estimate of its consumptive component. *Water Resources Management* 26 (3), 733-749.
- Verdier, M., 1987. *Cultivo del fresón en climas templados*. Ediciones Agrarias, Caja Rural Provincial de Huelva.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Vereecken, H., Huisman, J., Bogen, H., Vanderborght, J., Vrugt, J., Hopmans, J. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*, 44, W00D06.
- Wanjura, D.F., Upchurch, D.R., Mahan, J.R. 2004. Establishing differential irrigation levels using temperature-time thresholds. *Applied Engineering in Agriculture*, 20(2):201-206.
- Warrick, A.W. 1974. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 383-386.
- Wesseling, J.G., Elbers, J.A., Kabat, P. van den Broek, B. J. 1991. SWATRE: instruction for input, Internal Note, Winand Staring Centre, Wageningen, the Netherlands.
- WBCSD, World Business Council for Sustainable Development, 2006. Business in the world of water: WBCSD Water Scenarios to 2025. Available from: <http://www.wbcd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=132&NoSearchContextKey=true>.
- WWF, 2009. Manual de buenas prácticas de riego. Propuestas de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura. Viñedo, Olivar, Cítricos y Fresa. 2009. Madrid.

8. BIBLIOGRAFÍA



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

eidA3

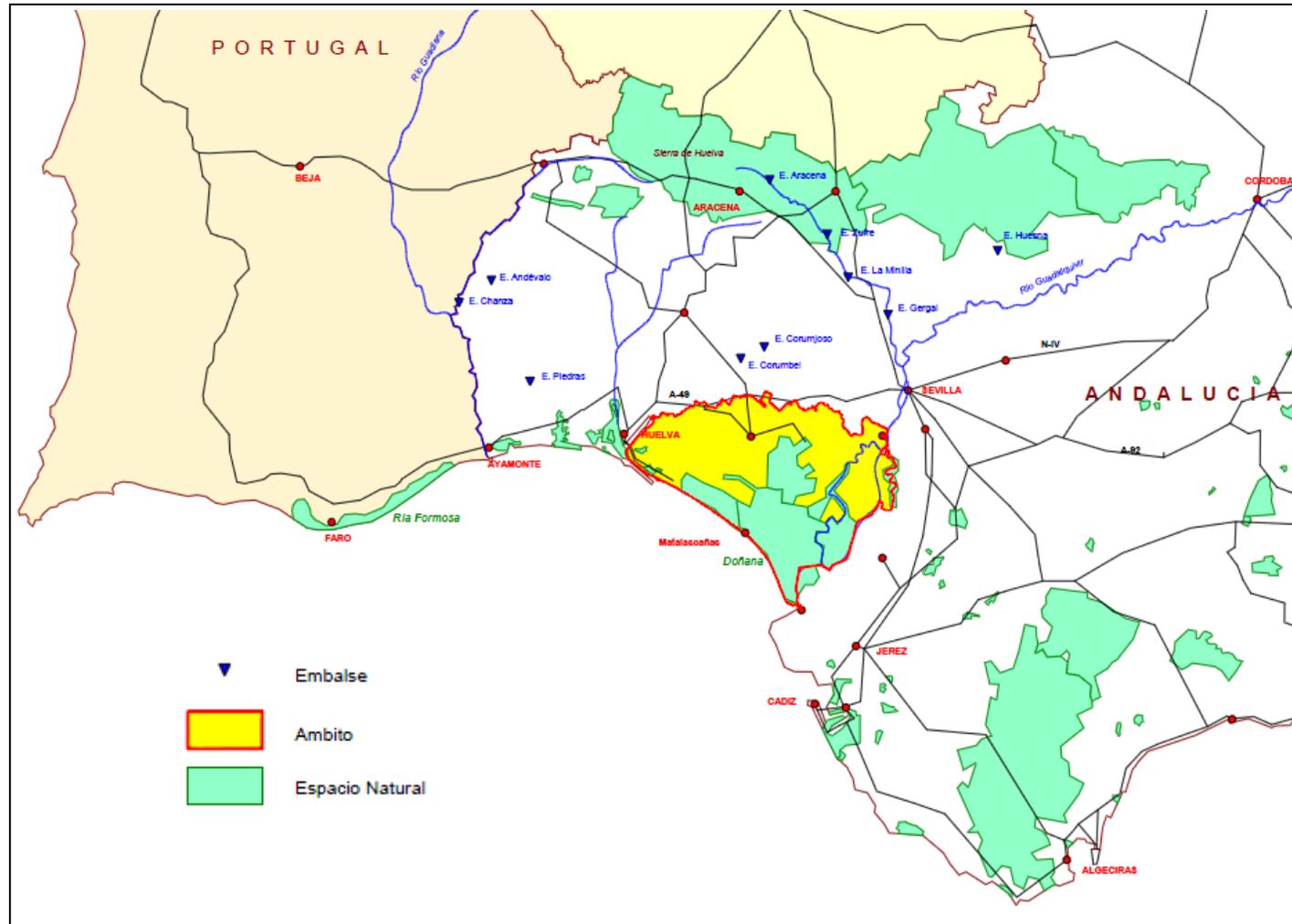
escuela internacional de doctorado en
agroalimentación

CAPÍTULO 9

ANEJOS

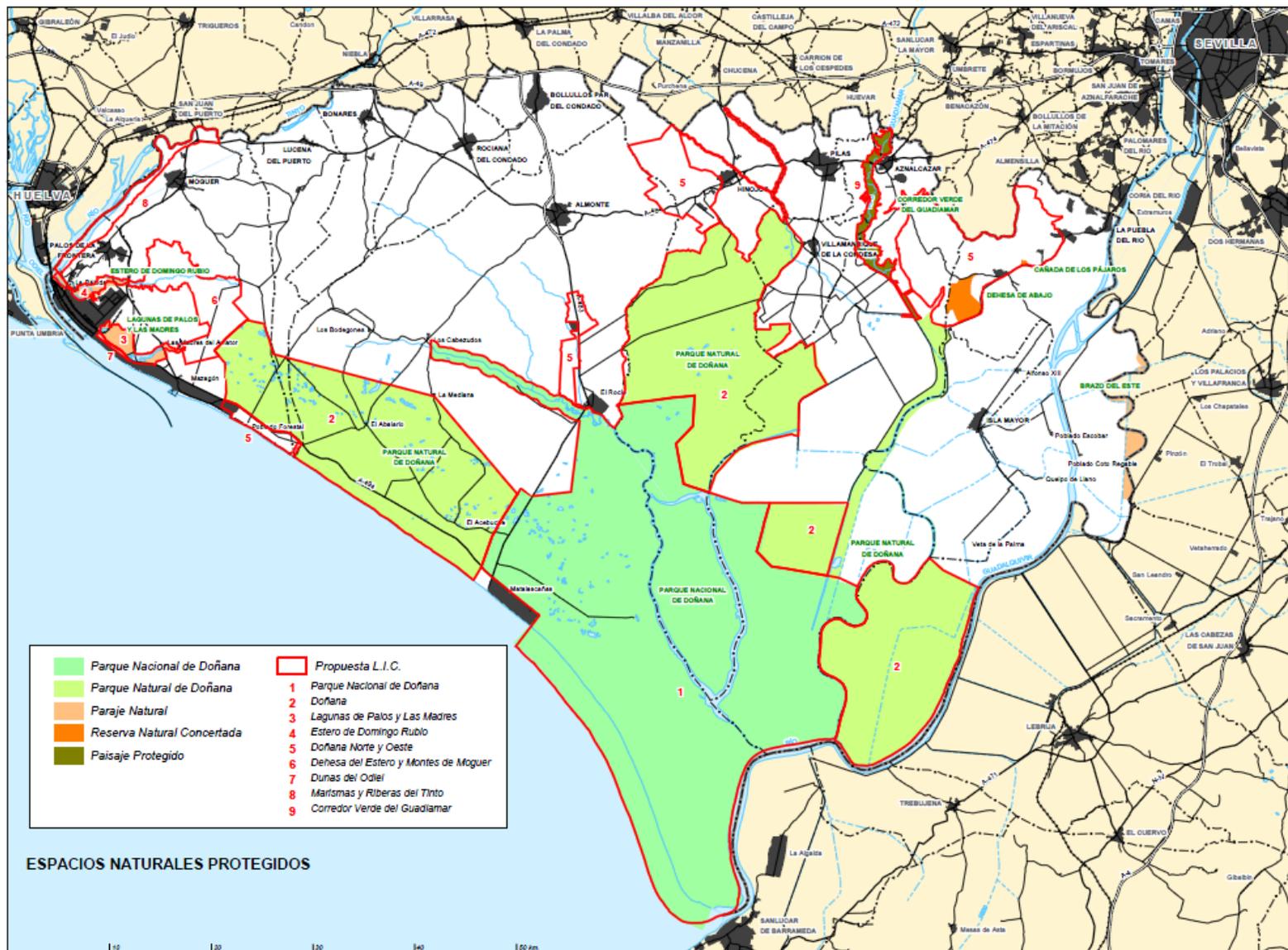
9. ANEJOS

Anejo 9.1. Encuadre general del Ámbito de Doñana (POTAD de Doñana, 2003)



9. ANEJOS

Anejo 9.2. Límites del Territorio del Ámbito de Doñana y espacios naturales protegidos (POTAD de Doñana, 2003)



Anejo 9.3. Nota de prensa acusando al sector fresero onubense de "despilfarro de agua" (El País, 2010)

Inicio Internacional Política España Deportes **Economía** Tecnología Cultura Gente y TV Sociedad Opinión Blogs SModa In English

Bolsas | Fondos | Negocios
RSS

ELPAIS.com > Economía

Campaña en Suiza contra la fresa española

Los grupos de protesta critican las "insostenibles" condiciones laborales en Huelva, el uso de pesticidas y el "derroche" de agua

EFE - Ginebra - 13/04/2010

Vota ☆☆☆☆☆ | Resultado ★★★★★ 254 votos

Comentarios - 165
 🖨️
✉️
🔗
📌
🔍

Twitter 0
 Recomendar 126

Varios partidos y organizaciones, entre ellos la Plataforma por una Agricultura Socialmente Duradera, denunciaron el martes en Suiza la importación de fruta fuera de temporada, entre ella la fresa española. Los convocantes, reunidos bajo el lema "no es la temporada de la fresa", han organizado acciones delante de supermercados y grandes superficies en ciudades como Ginebra, Lausana o Delemont, para denunciar la importación de esta fruta fuera de temporada, que se vende a precios muy bajos pero que "esconde otros costes sociales y ecológicos", según explicó Philippe Sauvain, de la plataforma.

Sauvain criticó las condiciones "insostenibles" de los trabajadores de la recogida de fresa en Huelva, así como el despilfarro de agua y el empleo de pesticidas, e hizo un llamamiento a que se consuman "frutas y verduras de temporada, producidos

La noticia en otros webs

- webs en español
- en otros idiomas

publicidad



Porque ahora tu tranquilidad pasa a llamarse Allianz Global Assistance.

Fuente: http://economia.elpais.com/economia/2010/04/13/actualidad/1271143981_850215.html

Anejo 9.4. Nota de prensa en medio Británico acusando a la fresa de Huelva de secar el acuífero de Doñana(The Independent, 2012)

Monday 11 June 2012 iJobs Dating Property Shop



NEWS OPINION SPORT EURO 2012 LIFE & STYLE ARTS & ENTS TRAVEL MONEY INDYBEST BLOGS STUDENT

UK World Business People Science Environment Media Education Olympics Obituaries Diary Corrections Newsletter sign-up

Hot Topics [Greece](#) [Syria](#) [George Osborne](#) [Spain](#)

News > Environment > Nature

Strawberry farms suck Spain dry

Decades of legal and illegal agricultural exploitation have brought western Europe's most important wetland to crisis point

ALASDAIR FOTHERINGHAM + | MADRID | SUNDAY 10 JUNE 2012

Send Recommend 69 Share 14 10

[PRINT](#) | [EMAIL](#) | [A A A](#)

Latest in Nature

- [Attenborough issues plea to 'save our seas'](#)
- [Rescuers pluck 150 people from floods as Welsh river bursts banks](#)
- [European Commission hails fish stocks revival boost](#)
- [France bans bee-killing pesticide but it's still rife here](#)
- [Sydney tries to evict troublesome fruit bats with aural onslaught](#)
- [Tesco sold beef farmed in Amazon](#)



Search The Independent

[Advanced Search](#) [Day in a page](#) [Article archive](#)

Most Viewed [Most Shared](#) [Most Commented](#)

[How I built my house for £4,000](#)

[Clash of the fiercest predators as shark eats polar bear](#)

[The 10 best cycle helmets](#)

[Strawberry farms suck Spain dry](#)

[Attenborough issues plea to 'save our seas'](#)

[The 10 best folding bikes](#)

[Rachel Carson: The green revolutionary](#)

[Rescuers pluck 150 people from floods as Welsh river bursts banks](#)

[The world's rubbish dump: a tip that stretches from Hawaii to Japan](#)

[10 best hiking boots](#)

INDEPENDENT PARTNERS

[Sending money back to the UK?](#)
Save time and money on foreign exchange with HIFX
Market leading rates | No



Fuente: <http://www.independent.co.uk/environment/nature/strawberry-farms-suck-spain-dry-7834233.html>

9. ANEJOS

Anejo 9.5. Hoja de cálculo para el registro y estimación del volumen de agua aplicado al cultivo (hoja 1)

REGISTRO CONSUMO DE AGUA DE RIEGO EN FRESA										
Finca:		22								
caudal de cinta de riego (l/hora·m lin.)		3,8 (LOMO VIEJO) -5 (LOMO NUEVO)								
Número de plantas por sector								TOTAL plantas		
S1-S4	S2-S5	S10-11-12-16	S13-14-15	S8	S7	S6	S3			
309,000	393,400	320,300	316,700	283,000	159,200	160,000	174,000		2,115,600	
LOMO NUEVO	LOMO NUEVO	LOMO VIEJO	LOMO VIEJO	LOMO NUEVO	LOMO NUEVO	LOMO VIEJO	LOMO NUEVO			
Superficie efectiva por sector (ha)								TOTAL (ha)	LOMO NUEVO TOTAL	LOMO VIEJO TOTAL
S1-S4	S2-S5	S10-11-12-16	S13-14-15	S8	S7	S6	S3			
4.41	5.62	4.58	4.52	4.04	2.27	2.29	2.49		30.22	18.84 / 11.39
Densidad de plantación (plantas/ha)								Densidad Promedio		
S1-S4	S2-S5	S10-11-12-16	S13-14-15	S8	S7	S6	S3			
70000	70000.0	70000.0	70000.0	70000.0	70000.0	70000.0	70000.0		70,000	
marco (largo x ancho x distancia al borde)										
24 cm x 23 cm x 12 cm										
Gasto de calado del terreno. (Aspersión)										
m ³ totales		21918.4								
m ³ /ha		1064								
↓										
Gasto de riego de plantación. (Microaspersión)										
m ³ totales		0.00								
m ³ /ha		0								
↓										
Consumo de agua con cinta (m ³ ; m ³ /ha)				Consumo anual cinta de riego				Consumo anual TOTAL		
octubre	noviembre	diciembre	enero	m ³	166,911.91			m ³	188,830.31	
19,803.25	14,095.42	18,195.02	22,029.68	m ³ /ha	5523.2			m ³ /ha	6587.2	
655.3	466.43	602.09	728.98							
febrero	marzo	abril	mayo							
26,100.72	25,816.21	26,542.66	14,328.95							
863.69	854.28	878.31	474.15							
→										
→										
→										
→										

9. ANEJOS

Anejo 9.6. Hoja de cálculo para el registro de datos de campo de riego (hoja 2)

FINCA:	MES: ENERO																	
CONTROL DIARIO TIEMPO DE RIEGO															TOTAL			
N° PARCELA RIEGO	S1-S4	S2-S5	S10-11-12-16	S13-14-15	S8	S7	S6	S3										
VARIEDAD	CANDONGA	BENICIA	CANDONGA	SABRINA-CANDONGA	BENICIA	BENICIA	BENICIA	BENICIA										
FECHA PLANTAC.	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct	7-28 Oct										
FECHA CUBRICION	15-30 Nov																	
SUPERFICIE SECTOR	4,41	5,62	4,58	4,52	4,04	2,27	2,29	2,49										
CAUDAL CINTA RIEGO	5	5	3,8	3,8	5	5	3,8	5										
N° PLANTAS POR SECTOR	309,000	393,400	320,300	316,700	283,000	159,200	160,000	174,000										
MARCO PLANTACIÓN (m)	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24										
DENSIDAD PLANTACIÓN	70,068	70,000	69,934	70,066	70,050	70,132	69,869	69,880										
Metros lineales cinta riego por ha	9090																	
Metros lineales cinta riego por sector	40,086.90	51,085.80	41,632.20	41,086.80	36,723.60	20,634.30	20,816.10	22,634.10										
DIA	TIEMPO DE RIEGO DIARIO EN CADA SECTOR (minutos)															m³ diarios	m³ diarios/ha	
7	20		30		40		40		30		30		50		20		651.12	21.55
8	20		30		40		40		30	15	30	15	50		20		722.61	23.92
9	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
10	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
11	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
12	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
13	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
14	20	10	30	15	30	20	30	20	30	20	30	20	40	20	20	10	928.41	30.72
15																	0.00	0.00
16	20		30		30		30		30		30		40		20		585.54	19.38
17																	0.00	0.00
18																	0.00	0.00
19	20		30		30		30		30		30		40		20		585.54	19.38
20		30		40		40		40		40		40	60		30		806.94	26.70
21	20	30	20	40	25	40	25	40	20	40	20	40	25	50	20	30	1,242.96	41.13
22	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
23	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
24	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
25	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
26		30		35		40		40		40		40		50		30	772.47	25.56
27		30		35		40		40		40		40		50		30	772.47	25.56
28	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
29	30		35		40		40		40		40		50		30		772.47	25.56
30		30		35		40		40		40		40		50		30	772.47	25.56
31	20	20	25	20	30	20	30	20	40		40		40	25	20	20	939.47	31.09
TOTAL (m³) por sector	1737.1	835.14	3,001.29	1,383.57	2,148.92	1,001.95	1,600.33	988.82	2,172.81	1,239.42	1,220.86	696.41	1,417.23	613.03	980.81	471.54	22,029.68	728.98
TOTAL (m³) por sector	2572.24		4384.86		3150.86		2589.15		3412.23		1917.27		2030.26		1452.35			
TOTAL (m³/ha) por sector	583.28		780.23		687.96		572.82		844.61		844.61		886.58		583.28			

9. ANEJOS

Tabla 9.7. Variedades por finca y campaña. Fechas promedio de plantación, cobertura con plástica y fin de campaña (hoja 1)

Fincas	Variedades			Fecha promedio plantación			Fecha promedio cobertura			Fecha promedio fin campaña		
	2010-11	2011-12	2012-13	10-11	11-12	12-13	10-11	11-12	12-13	10-11	11-12	12-13
1	Candongga, Camarosa, Splendor, Magdalena	Magdalena, Candonga, Lusa, Benicia	Magdalena, Candonga, Lusa, Delicia	19-oct	15-oct	15-oct	14-dic	15-nov	15-nov	31-may	29-may	10-jun
2	Candongga, Splendor	Fortuna, Splendor, Candonga	Fortuna, Sabrina, Benicia	30-oct	15-oct	15-oct	30-nov	15-nov	15-nov	05-jun	04-jun	10-jun
3	Candongga, Splendor, Fortuna, Sabrina, San Andrea	Candongga, Splendor, Fortuna, Sabrina, Andrea	Candongga, Splendor, Sabrina, Andrea, Primoris	10-oct	10-oct	10-oct	10-nov	10-nov	01-nov	14-jun	03-jun	24-may
4	Camarosa, Candonga, Splendor, Fortuna	Camarosa, Splendor, Fortuna, Andrea, Antilla	Camarosa, Splendor, Fortuna, Andrea, Sabrina, Amiga	19-oct	10-oct	19-oct	19-nov	25-nov	25-nov	14-jun	25-mar	31-may
5	Camarosa, Splendor, Fortuna	Camarosa, Splendor, Fortuna, Antilla	Camarosa, Splendor, Fortuna, Sabrina	18-oct	15-oct	20-oct	18-nov	25-nov	25-nov	14-jun	31-may	31-may
6	Camarosa, Candonga	Camarosa, Splendor, Candonga, Niebla-Rania	Splendor, Sabrina, Andrea	18-oct	15-oct	15-oct	18-nov	25-nov	22-nov	28-jun	30-jun	31-may
7	Camarosa, Candonga, Splendor, Fortuna	Candongga, Splendor, Fortuna, Benicia, Amiga, Sabrina, Antilla	Candongga, Splendor, Fortuna, Benicia, Amiga, Sabrina, San Andrea, Nabila	18-oct	15-oct	15-oct	18-nov	25-nov	25-nov	14-jun	07-jun	14-jun
8	Camarosa, Splendor, Fortuna, Sabrina, Antilla	Camarosa, Splendor, Fortuna, Sabrina	Splendor, Fortuna, Sabrina	18-oct	18-oct	20-oct	18-nov	25-nov	25-nov	21-jun	31-may	14-jun
9	Camarosa, Splendor, San Andrea	Camarosa, Splendor, Fortuna, Andrea	Camarosa, Splendor, Fortuna, Andrea, Benicia, Antilla, Amiga, Primoris	18-oct	18-oct	18-oct	18-nov	25-nov	25-nov	14-jun	07-jun	14-jun
10	Splendor, Fortuna, Andrea	Splendor, Fortuna, Andrea, Benicia, Antilla	Splendor, Fortuna, Sabrina, Antilla	18-oct	15-oct	22-oct	18-nov	25-nov	25-nov	21-jun	07-jun	07-jun
11	Camarosa	Camarosa, Sabrina	Sabrina	18-oct	25-oct	20-oct	18-nov	25-nov	25-nov	21-jun	31-may	31-may

9. ANEJOS

Anejo 9.8. Variedades por finca y campaña. Fechas promedio de plantación, cobertura con plástica y fin de campaña (hoja 2)

Finca	Variedades			Fecha promedio plantación			Fecha promedio cobertura			Fecha promedio fin campaña		
	2010-11	2011-12	2012-13	10-11	11-12	12-13	10-11	11-12	12-13	10-11	11-12	12-13
12	Camarosa, Candonga, Splendor, Fortuna	Camarosa, Candonga, Splendor, Fortuna, Benicia, Fuentepina, Antilla	Camarosa, Candonga, Splendor, Fortuna, Sabrina, Antilla	21-oct	18-oct	20-oct	21-nov	25-nov	25-nov	14-jun	31-may	31-may
13	Candonga, Camarosa, Fortuna, Splendor	Camarosa, Fortuna, Splendor, Antilla, Sabrina	Sabrina, Fortuna, Splendor	18-oct	18-oct	22-oct	18-nov	25-nov	25-nov	21-jun	31-may	31-may
14	Candonga, Camarosa, Fortuna, Splendor	Candonga, Camarosa, Fortuna, Splendor, Antilla, Sabrina.	Candonga, Fortuna, Splendor, Sabrina, Antilla	18-oct	18-oct	22-oct	18-nov	25-nov	25-nov	21-jun	31-may	31-may
15	Candonga, Camarosa, Fortuna, Splendor	Candonga, Camarosa, Splendor, Fortuna, Antilla	Candonga, Camarosa, Splendor, Fortuna, Sabrina, S. Andrea	18-oct	15-oct	10-oct	18-nov	25-nov	22-nov	28-jun	30-jun	07-jun
16	Camarosa, Splendor, Primoris, San Andrea, Antilla	Camarosa, Splendor, San Andrea, Sabrina, Fuentepina	Splendor, S. Andrea, Fortuna, Sabrina	18-oct	15-oct	10-oct	18-nov	25-nov	22-nov	14-jun	31-may	31-may
17	Camarosa, Fortuna	Camarosa, Fortuna	Sabrina, Fortuna	21-oct	21-oct	22-oct	21-nov	25-nov	25-nov	21-jun	31-may	31-may
18	Splendor, Candonga	Candonga, Splendor	Candonga, Splendor	15-oct	10-oct	10-oct	8-nov	10-nov	10-nov	19-jun	15-jun	31-jun
19	Camarosa	Splendor	Splendor	24-oct	05-oct	15-oct	24-nov	05-nov	15-nov	6-jun	31-may	31-may
20	Splendor, Primoris, Fortuna	Fortuna, Sabrina, Primoris, Splendor	Fortuna, Sabrina, Splendor	15-oct	13-oct	10-oct	14-nov	10-nov	10-nov	22-jun	20-jun	15-jun
21	Splendor, Camarosa	Camarosa, Splendor	Splendor	17-oct	20-oct	21-oct	28-nov	20-nov	21-nov	26-may	31-may	15-ma
22	Camarosa, Candonga	Candonga, Benicia, Sabrina	Benicia	26-oct	18-oct	15-oct	8-nov	20-nov	10-nov	6-jun	15-may	31-may

9. ANEJOS

Anejo 9.9. Caudal emisores de riego, densidad de plantación y producción por finca para cada campaña de estudio

Finca	Caudal cinta riego (L/h·m)			Densidad plantas (plantas/ha)			Producción total (t/ha)			Producción total (g/plant)			% Producción para industria		
	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13	10/11	11/12	12/13
1	5	5	5	68846	68000	67485	54,4	64,2	60,8	790,6	945	901,8	20,0	19,9	11,9
2	5	5	5	65207	63293	63800	45,7	72,9	75,0	702,1	1153,2	1167,2	18,9	28,8	22,4
3	5	5	5	81802	88609	87863	45,3	72,3	65,7	554,9	816,4	748,2	13,6	14,1	28,2
4	3,8	3,8	3,8	70846	70857	82537	52,7	78,0	71,6	744,0	1102,1	868,5	28,6	33,3	28,2
5	4,8	3,8	3,8	81404	83767	84598	62,5	74,2	75,2	768,4	886,9	889,8	23,0	29,9	41,8
6	5	5	5	59070	58196	82836	78,6	67,5	58,0	1330,8	1159,9	700,2	26,5	36,9	32,2
7	5	5	5	74014	75094	74829	61,8	86,0	67,4	836,2	1145,6	901,5	17,7	29,2	37,8
8	4,5	4,5	4,5	59945	81967	77745	62,3	70,7	66,2	1040,4	863,4	851,4	23,1	34,5	33,4
9	4,8	4,8	5	81753	87129	73853	61,0	72,6	82,3	746,6	834,1	1114,4	33,3	30,6	39,5
10	5	5	3,8	105208	87755	123085	70,3	68,4	76,1	668,7	780	618,4	25,5	22,1	22,2
11	3,8	3,8	3,8	81100	84775	69156	78,8	92,6	82,3	972,3	1093,1	1191,2	37,3	34,9	34,4
12	4,8	3,8	3,8	71504	94090	87104	76,0	82,1	75,6	1063,1	873,0	868,4	30,7	35,3	37,3
13	4,8	5	3,8	44992	71514	75032	69,9	87,8	71,5	1555,7	1228,0	953,3	26,3	29,5	33,8
14	4,8	5	5	70992	67980	67483	63,1	74,5	71,5	890,0	1096,4	1060,0	26,0	30,6	33,8
15	4,8	4,8	5	57321	57188	58146	61,0	65,6	62,1	1065,6	1148,3	1068,2	29,9	29,0	32,5
16	5	3,8	5	70304	71005	80801	61,2	63,8	65,0	870,7	899,4	804,6	26,8	24,7	31,6
17	4,8	5	5	83575	98492	88582	67,2	98,3	79,2	804,6	998,1	894,6	4,7	36,7	33,5
18	6,9	6,9	5	65000	65000	64250	81,4	68,4	66,9	1252,5	1105,9	1046,0	22,0	6,2	10,1
19	5	5	5	67000	64800	63700	58,7	74,5	72,6	876,5	1150,3	1140,5	22,0	19,0	19,3
20	5,1	5,1	5,1	47652	51000	50000	46	47,9	50,4	964,5	1032,2	1008	12,0	18,0	15,0
21	5	5	5	70119	68194	70000	50,9	51,5	51,2	725,4	754,3	731,4	7,0	9,3	8,0
22	3,8	3,8-5	5	72231	70000	70000	69,6	76,7	73,4	963,6	1020,5	1048,5	14,0	12,8	12,0
MEDIA	-	-	-	70449	73987	75586	63	73	69	887	1004	935	22	26	27

9. ANEJOS

Anejo 9.10. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2010-2011.

Fincas	Alomado m³/ha	Plantación m³/ha	Desarrollo m³/ha	RIS	AAT_{azul} m³/ha	AU_{azul} m³/ha	HH_{azul} m³/t	HH_c m³/t	Prod t/ha
1	-	2667	12548	3,0	15214	4124	280	75,8	60,8
2	-	2667	9062	2,1	11728	4323	256	94,4	75,0
3	414	1716	4764	1,2	6894	4114	149	90,6	65,7
4	469	235	5430	1,1	6134	4822	85	91,5	71,7
5	249	909	5713	1,2	6871	4830	110	77,2	75,3
6	241	845	5066	0,9	6152	5584	78	71,0	58,0
7	399	599	5359	1,1	6357	4830	103	78,0	67,5
8	400	400	4917	0,9	5717	5218	92	83,7	66,2
9	399	747	5493	1,1	6639	4830	109	79,1	82,3
10	99	49	4075	0,8	4223	5218	60	74,2	76,1
11	400	600	6415	1,2	7415	5218	94	66,2	82,4
12	400	1200	5001	1,0	6601	4786	87	63,0	75,6
13	240	480	4730	0,9	5450	5218	78	74,6	71,5
14	160	240	5895	1,1	6295	5218	100	82,6	71,5
15	10	36	4319	0,8	4365	5584	71	91,4	62,1
16	79	300	5803	1,2	6182	4830	101	78,9	65,0
17	360	600	6559	1,3	7519	5175	112	77,0	79,3
18	56	558	6654	1,3	7269	5153	115	63,3	67,0
19	355	804	8783	2,0	9942	4447	220	75,7	72,7
20	660	345	3066	0,6	4071	5311	89	115,6	50,4
21	355	804	4435	1,1	5595	4060	111	79,8	51,2
22	798	480	5891	1,3	7168	4388	103	63,0	73,4
MEDIA	327,2	785,5	5908,1	1,24	6991,0	4876,4	118,2	79,4	69,1

9. ANEJOS

Anejo 9.11. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2011-2012.

Fincas	Alomado m³/ha	Plantación m³/ha	Desarrollo m³/ha	RIS	AAT_{azul} m³/ha	AU_{azul} m³/ha	HH_A_{azul} m³/t	HH_c m³/t	Prod t/ha
1	640	2286	11249	2,5	14175	4475	221	70	64,3
2	640	2667	9956	2,1	13263	4647	182	64	73,0
3	538	1442	4574	1,0	6555	4654	91	64	72,3
4	397	199	3575	1,6	4171	2245	53	29	78,1
5	440	800	5217	1,1	6457	4566	87	61	74,3
6	241	845	5066	0,8	6152	5977	91	89	67,5
7	363	544	4220	0,9	5127	4822	60	56	86,0
8	400	1200	4900	1,1	6500	4512	92	64	70,8
9	402	754	4728	1,0	5884	4768	81	66	72,7
10	91	46	4118	0,9	4255	4822	62	70	68,4
11	700	300	7595	1,7	8595	4406	93	48	92,7
12	200	800	4877	1,1	5877	4512	72	55	82,1
13	1262	811	5072	1,1	7145	4512	81	51	87,8
14	800	200	5902	1,3	6902	4512	93	61	74,5
15	236	1180	5068	0,8	6484	5977	99	91	65,7
16	200	800	3242	0,7	4242	4555	66	71	63,9
17	1260	600	7926	1,8	9786	4469	100	46	98,2
18	31	525	6687	1,3	7245	5317	106	78	68,4
19	2045	1869	10086	0,2	14000	4745	188	64	74,5
20	385	361	4027	0,7	4774	5500	100	115	47,9
21	640	915	3171	0,9	4727	3491	92	68	51,6
22	1064	0	5523	1,4	6587	3816	86	50	76,8
MEDIA	589,8	870,2	5762,6	1,28	7222,8	4604,6	99,7	64,9	73,2

9. ANEJOS

Anejo 9.12. Volumen de agua aplicada en alomado, plantación y desarrollo del cultivo e Indicadores en la campaña 2012-2013.

Fincas	Alomado m³/ha	Plantación m³/ha	Desarrollo m³/ha	RIS	AAT_{azul} m³/ha	AU_{azul} m³/ha	HHA_{azul} m³/t	HH_c m³/t	Prod t/ha
1	433	2373	8977	2,1	11783	4321	194	71	60,8
2	433	2673	7976	1,8	11082	4321	148	58	75,0
3	414	1192	3128	0,8	4734	3783	72	58	65,7
4	284	710	3678	0,9	4672	3989	65	56	71,7
5	439	799	5568	1,4	6806	3979	90	53	75,3
6	174	600	10205	2,5	10979	4071	189	70	58,0
7	400	200	4759	1,1	5359	4495	79	67	67,5
8	400	400	5929	1,3	6729	4429	102	67	66,2
9	400	600	5411	1,2	6411	4444	78	54	82,3
10	281	400	4954	1,1	5635	4411	74	58	76,1
11	400	600	4983	1,2	5983	4104	73	50	82,4
12	173	800	3562	0,9	4535	3979	60	53	75,6
13	1120	720	3887	1,0	5727	3961	80	55	71,5
14	800	200	5381	1,4	6381	3961	89	55	71,5
15	397	476	5736	1,4	6609	4247	106	68	62,1
16	200	800	4299	1,1	5299	4041	82	62	65,0
17	600	240	8430	2,1	9270	3961	117	50	79,3
18	55	414	5252	1,0	5721	5225	85	78	67,0
19	2622	1013	9105	2,3	12740	4028	175	55	72,7
20	423	350	3540	0,7	4313	5278	86	105	50,4
21	567	759	3860	1,1	5186	3484	101	68	51,2
22	1197	0	6524	1,6	7721	3975	105	54	73,4
MEDIA	555,1	741,8	5688,3	1,36	6985,2	4203,9	102,3	62,0	69,1



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Cleaner Production

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jclepro

Linking water footprint accounting with irrigation management in high value crops



Jorge García Morillo*, Juan Antonio Rodríguez Díaz, Emilio Camacho, Pilar Montesinos

Department of Agronomy, University of Córdoba, International Campus of Excellence ceiA3, 14071 Córdoba, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 March 2014
Received in revised form
26 August 2014
Accepted 11 September 2014
Available online 11 October 2014

Keywords:

Water footprint accounting
Efficient water use
Irrigation management
Strawberry crop

ABSTRACT

In recent years, irrigated agriculture has been in a critical situation due to rising production costs, the stabilization or reduction of product prices, and growing pressure to minimize environmental impacts. These circumstances are forcing farmers to find new ways to use resources more efficiently in their production processes.

The volume of water used during the crop growing season is linked to production; the final goal of all agricultural activity. Water footprint accounting is a suitable procedure to assess the relationship between water use and crop yield. However, it does not provide information about irrigation management. For this reason, information on water excess, deficit irrigation, or water needed for cropping practices must be incorporated into the crop water footprint analysis at farm scale.

In this paper, a joint evaluation of crop water footprint accounting and irrigation management indicators is proposed as a diagnostic tool to identify the hotspots of irrigated agricultural systems. Based on this analysis, specific actions can be defined to improve water use efficiency, reduce water abstractions and polluted water returns, and maintain production rates. The methodology has been applied to intensive strawberry production in Southwest Spain, specifically in the vicinity of Doñana National Park; a highly sensitive environmental area located in the province of Huelva. Actions to ameliorate the current situation are proposed.

© 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Freshwater is becoming an increasingly large and complex global challenge (Hunt, 2004). Freshwater scarcity has been recognized as one of the most crucial environmental concerns (UNESCO, 2006). Nowadays, one-third of the world's population lives in regions affected by water scarcity (UNESCO, 2009), a figure that is expected to reach over two-thirds by 2025. Freshwater availability is affected by several factors, such as world population growth, climate change, and industrial processes. Improving the management of this resource is therefore a major challenge that affects users, water authorities and business (WBCSD, 2006).

Many companies are concerned about this situation and are undertaking initiatives to gain a better understanding of water-related risks along their value chains. Several tools have been

recently developed to facilitate water use accounting, the impact of water consumption, or promote a deeper engagement in resource management (Alliance for Water Stewardship, 2012). A reference to most of these tools can be found on the website of the CEO Water Mandate (CEOWM, 2012). All these initiatives have strengths and weakness (UNEP, 2011) and many are still under development (Bayart et al., 2010) or have been recently approved, such as the ISO international standard to assess water use (ISO, 2013).

At the global scale, most water use occurs in agricultural production, which is strongly related with specific activities such as irrigation. Irrigated agriculture is recognized as a water intensive sector due to the high dependency of agriculture on water resource use and management. It is therefore essential that the farming sector take a responsible approach towards the sustainable use and conservation of freshwater.

One of the most frequently used tools to implement such an approach is water footprint accounting; a concept that was first introduced by Hoekstra (2003), and more recently developed within the life cycle assessment framework (Mazzi et al., 2014; Berger and Finkbeiner, 2010; Bayart et al., 2010) and the ISO international standard (ISO, 2013). As an indicator, the water footprint measures the appropriation of water resources by human

* Corresponding author. Campus Rabanales, Edif. Da Vinci, Department of Agronomy, University of Córdoba, 14071 Córdoba, Spain.

E-mail addresses: g62gamoj@uco.es, jorgegarciamorillo@hotmail.com (J. García Morillo), jarodriguez@uco.es (J.A. Rodríguez Díaz), ecamacho@uco.es (E. Camacho), pmontesinos@uco.es (P. Montesinos).



Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation

J. García Morillo*, M. Martín, E. Camacho, J.A. Rodríguez Díaz, P. Montesinos

Department of Agronomy, University of Córdoba, International Campus of Excellence cetA3, 14071 Córdoba, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 May 2014
Received in revised form
17 September 2014
Accepted 23 September 2014
Available online xxx

Keywords:

Irrigation technology
Drip irrigation
Irrigation scheduling
Performance indicators
Strawberry production
Doñana

ABSTRACT

The Doñana area in Southwestern Spain has the largest concentration of strawberry producers in Europe. The annual yield, close to 300,000 t, is mainly devoted to the international markets (more than 90%). Due to the high water demand of strawberries and to the environmental concerns of the destination countries, the maximization of water use efficiency is critical for the strawberry sector.

Aiming at the efficient water use in the strawberry production, a comprehensive drip irrigation system has been designed, according to precision irrigation principles. The system has been developed based on a three stages methodology. First, the irrigation process carried out by farmers has been assessed to identify inefficiencies in the irrigation system and management. Their performances have been evaluated using indicators such as the Relative Irrigation Supply (RIS), Strawberry Irrigation Water Applied (SWA) and Strawberry Water Footprint Applied (SWFA). The second phase is focused in an accurate irrigation scheduling based in precise crop water requirements estimation and the optimum irrigation pulse design. Finally, the irrigation system has been designed with the prevailing wisdom of meets the needs of the crop in a timely manner and as efficiently and as spatially uniformly as possible. The most appropriate drip irrigation emitters for the particular conditions of the strawberry production in the study area have been selected. The rest of the on-farm irrigation technologies required to control the system have been integrated, including soil water sensors, smart water meters, programmers, electrovalves and weather station. This precision irrigation system has been installed in a commercial strawberry farm during the irrigation season 2013–2014.

Also, an application for PC, mobiles and tablets has been developed to provide farmers practical information (e.g. irrigation times) for optimal irrigation scheduling.

© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In many European basins where irrigated agriculture is concentrated, there is an increasing competition for water (Knox et al., 2012). Climate change threatens to exacerbate the situation with a reduction in water resources availability (Fallon and Betts, 2010), and an increase in agricultural water demand (Rodríguez Díaz et al., 2007). Despite its economic importance, the sustainability of irrigated agriculture is under threat due to increasing water scarcity (Ferrer et al., 2011) and concerns regarding the impact of over-abstraction on the environment (EEA, 2009).

Under a scenario of reduced water availability, increasing drought frequency and uncertainties associated with a changing climate, the European irrigation sector needs to do more with less,

increasing water productivity (t/ha) by improving water efficiency and producing more “crop per drop” (Monaghan et al., 2013).

Strawberries are a good example of water intensive crop that is highly demanded by both the European fresh market and the food industry. The largest concentration of strawberry production in Europe and the second in the world is located in the Southwestern region of Spain (Huelva). The destination of more than 90% of the Spanish strawberry production is the international market which demands high quality strawberries, produced under sustainable conditions (Fundación Doñana 21, 2006).

The intensive cultivation of strawberries, carried out on beds covered by black plastic underneath polytunnels, demands large amounts of freshwater to satisfy the crop water requirement as well as other agronomic practices such as soil preparation and plantation.

The strawberry cultivation returns huge economic and social benefits to the region becoming in a strategic sector that generates more than 700 work days per ha and year and the annual creation of more than 55,000 jobs (Fundación Doñana 21, 2006). Despite the strawberry farming generates wealth in the region, it is identified

* Corresponding author. Tel.: +34 957212243.

E-mail addresses: g62gamoj@uco.es, jorgegarciamorillo@hotmail.com (J.G. Morillo), o02maarm@uco.es (M. Martín), ecamacho@uco.es (E. Camacho), jarodriguez@uco.es (J.A.R. Díaz), pmontesinos@uco.es (P. Montesinos).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.021>

0378-3774/© 2014 Elsevier B.V. All rights reserved.

Please cite this article in press as: Morillo, J.G., et al., Toward precision irrigation for intensive strawberry cultivation. *Agric. Water Manage.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.09.021>