



DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO MEDIANTE SENSORES FDR EN VID CV. MOSCATEL DE ALEJANDRÍA REGADA POR GOTEO

Ordenación, restauración y gestión de cuencas

Autor:

BUESA PUEYO, IGNACIO

Directores:

DR. CASTEL SÁNCHEZ, JUAN RAMÓN

DR. GARCÍA PRATS, ALBERTO

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2013



AGRADECIMIENTOS:

La presente TFM se ha realizado disfrutando de una beca pre-doctora FPI-INIA en el IVIA. Por tanto, se agradece a ambas entidades la ayuda prestada.

Agradecer al propietario de la parcela la oportunidad de realizar el estudio en su viñedo.

A Juan Ramón, por su dirección y asesoramiento, su paciencia y dedicación en las correcciones (fines de semana incluidos).

A Alberto, por atenderme con tanta amabilidad y ejercer de codirector del trabajo.

Me gustaría agradecer muy especialmente a mis compañeros de trabajo en las tareas de campo, Javi y Diego. Y por supuesto a Luis, por su inestimable ayuda en el procesado de datos.

Y por último, a mis más allegados; familia, compañeros de piso y amigos en la cercanía y en la lejanía.

¡Gracias a todos!



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma



Título del Trabajo Fin de Máster:
**DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO
MEDIANTE SENSORES FDR EN VID CV. MOSCATEL DE
ALEJANDRÍA REGADA POR GOTEO**

Autor: **BUESA PUEYO, IGNACIO**

Tipo	A <input type="checkbox"/> B <input checked="" type="checkbox"/>	Lugar de Realización	VALENCIA
Director	JUAN R. CASTEL SÁNCHEZ	Fecha de Lectura	Septiembre, 2013
Codirector1	ALBERTO GARCÍA PRATS		
Codirector2			
Tutor			

Resumen:

El uso de sensores capacitivos en la determinación del estado hídrico del suelo para la programación del riego en agricultura está ampliamente extendido. En el cultivo de la vid para vinificación resultan de especial interés para la aplicación de riegos deficitarios controlados que puedan mejorar la calidad de los mostos. No obstante, estas mediciones, especialmente sin una calibración específica para cada suelo, son inexactas y por tanto, se precisa la estimación de su error para el cálculo de balances hídricos (metodología utilizada para la programación del riego).

Este trabajo persigue estudiar la fiabilidad de las medidas de sondas del tipo FDR sin calibración específica del suelo en unas condiciones agronómicas y climatológicas determinadas y además analizar su utilidad como indicadores del estado hídrico de las cepas.

Para ello se monitoreó la humedad del suelo hasta 1,5 m de profundidad en 6 cepas de dos tratamientos de riego de una parcela de la variedad Moscatel de Alejandría regada por goteo y se desarrolló una metodología de cálculo del balance hídrico. También se determinó el estado hídrico del viñedo midiendo el potencial hídrico de tallo a medio día solar.

Los datos del contenido de agua del suelo mostraron una gran variabilidad entre sondas y por ello una baja precisión para el cálculo del balance hídrico. Sin embargo, del análisis de sus tendencias se puede extraer provechosa información para la programación del riego.

De la elevada variabilidad espacial observada en las medidas de potencial hídrico de tallo se advirtió que el riego es solo uno de los factores que influyen sobre el estado hídrico de las cepas, y que su relación con el estado hídrico del suelo es prácticamente inexistente y no significativo.

Abstract:

The use of capacitive sensors on the determination of soil water status for irrigation scheduling in agriculture is widely used. In vineyard for wine-making is particularly interesting for the application of regulated deficit irrigation that can improve the quality of musts. Nevertheless, these measurements, especially without specific calibration for each soil, are inaccurate and therefore its error estimation is required for the calculation of water balances (methodology used for irrigation scheduling).

This work aims to study the reliability of the FDR-probes measurements without soil specific calibration in specific agronomic and climatic conditions, as well as analyze its utility as water status indicators of the grapevines.

To do this, soil moisture was monitored up to 1.5 m depth in 6 vines of two irrigation treatments in a drip irrigated orchard of Muscat of Alexandria variety and a methodology of calculating the water balance was developed. The water status of the vineyard was also determined by measuring the stem water potential at solar noon.

Soil water content data showed a large variability between probes and therefore low accuracy for the calculation of the water balance. However, the analysis of its trends could be very useful for irrigation scheduling.

From the high spatial variability observed in the measurements of stem water potential was noted that irrigation is only one of the factors influencing the water status of the vines, and its relationship with soil water status is almost nonexistent and not significant.

Resum:

La utilització de sensors capacitius en la determinació de l'estat hídric del sòl per a la programació del reg en agricultura és una pràctica molt habitual. En el cas del cultiu de la vinya per a vinificació resulta d'especial interès per a l'aplicació de regs deficitaris controlats que puguen millorar la qualitat dels sucus de raïm. Aquestes mesures, especialment sense un calibratge específic per a cada sòl, son inexactes i es precisa d'una estimació de l'error per al càlcul de balanços hídrics (metodologia utilitzada per a la programació del reg).

Aquest treball tracta d'estudiar la fiabilitat de les mesures de sondes del tipus FDR sense calibració específica del sòl en unes condicions agronòmiques i climatològiques determinades, a més d'analitzar la seua utilitat com a indicadors de l'estat hídric dels ceps.

Amb aquest fi es va monitorar la humitat del sòl fins a 1,5 m de profunditat en 6 ceps de dos tractaments de reg d'una parcel·la de la varietat Moscatel d'Alexandria regada per goteig, i es va desenvolupar una metodologia de càlcul del balanç hídric. A més es va determinar l'estat hídric dels vinyers mesurant el potencial hídric de tija a mig dia solar.

Les dades del contingut d'aigua del sòl mostràren una gran variabilitat entre sondes i, per tant, una baixa precisió per al càlcul del balanç hídric. No obstant, de l'anàlisi de les tendències es pot extraure informació molt profitosa per a la programació del reg.

Tenint em compte l'elevada variabilitat espacial observada en les mesures de potencial hídric de tija, es va advertir que el reg no es més que un dels factors que influeixen sobre l'estat hídric dels ceps, i que la seua relació am l'estat hídric del sòl és pràcticament inexistent i no significativa.

Palabras clave:

Sensores FDR, Balance hídrico, Programación del riego, Vid, Potencial hídrico

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	9
1.1. MARCO DEL TRABAJO	10
1.2. ANTECEDENTES	12
1.2.1. UTILIZACIÓN DE SENSORES FDR EN VITICULTURA	12
1.2.2. IMPORTANCIA DEL CULTIVO DE LA VID EN ESPAÑA Y EN LA COMUNIDAD VALENCIANA	14
1.3. LA VID	14
1.3.1. SISTEMA RADICULAR	15
1.3.2. TRONCO, BRAZOS, SARMIENTOS, HOJAS Y ZARCILLOS	15
1.3.3. FLORES, BAYAS Y RACIMOS	15
1.3.4. CICLO ANUAL DE LA VID	16
1.3.5. CV. MOSCATEL DE ALEJANDRÍA	16
1.3.6. PORTAINJERTO	16
1.4. EL RIEGO DE LA VID	17
1.4.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN	17
1.4.2. POTENCIAL HÍDRICO	18
1.4.3. ANTECEDENTES DE LOS EFECTOS DEL RIEGO DEFICITARIO	20
1.5. OBJETIVOS	20
MATERIAL Y MÉTODOS	21
2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PARCELA DE ENSAYO	22

2.2. TRATAMIENTOS DE RIEGO Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO CON SONDAS FDR COMO APOYO	25
2.3.- DISEÑO EXPERIMENTAL	27
2.4. DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO	29
2.5. DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA	32
2.6 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN UN SUELO DE VIÑEDO	33
2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS SUMINISTRADOS POR LOS SENSORES	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1. CLIMATOLOGÍA Y VOLUMEN DE AGUA APLICADA	46
3.2. LECTURAS DE LAS SONDAS CAPACITIVAS	48
3.3. INTERPRETACIÓN DE LOS GRÁFICOS DE HUMEDAD DEL SUELO	49
3.4. BALANCE HÍDRICO	52
3.5. ESTADO HÍDRICO DE LAS CEPAS Y CORRELACIÓN CON LOS DATOS DE LAS SONDA CAPACITIVAS	55
3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	58
CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	69
GRÁFICAS	75
TABLAS	82

ÍNDICE DE FIGURAS:

FIGURA 2.1. PARCELA DE ENSAYO SECTORIZADA CON LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS Y SUS RESPECTIVAS REPETICIONES Y LAS SONDAS FDR SEÑALADAS CON UNA ESTRELLA	28
FIGURA 2.2. RADIO DE INFLUENCIA DE LOS SENSORES CAPACITIVOS ENVIROSCAN	30
FIGURA 2.3. ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE SENSORES POR SONDA Y TRATAMIENTO	31
FIGURA 2.4. VOLUMEN DE INFLUENCIA DE LA SONDA	36
FIGURA 2.5. INCREMENTO DE HUMEDAD DIARIO EN EL PERFIL DE 0,6 A 1,6 M. (PÉRDIDAS)	39
FIGURA 2.6. VARIACIÓN DE HUMEDAD DIARIA EN EL PERFIL DE 0 A 1,6 M. (ENTRADAS)	40
FIGURA 2.7. INCREMENTO DE HUMEDAD DIARIO EN EL PERFIL DE 6 A 0,6 M.(ENTRADAS <SALIDAS)	42

ÍNDICE DE GRÁFICOS:

GRÁFICO 2.1. DIAGRAMA CLIMÁTICO DE GAUSSEN PARA VILLAMARCHANTE	24
GRÁFICO 2.2. CONTENIDO DE HUMEDAD T1	35
GRÁFICO 2.3. CONTENIDO DE HUMEDAD T4	35
GRÁFICO 3.1. EVOLUCIÓN MENSUAL DE LA ETO, DE LA PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA	46
GRÁFICO 3.2. VOLUMEN DE AGUA APLICADO (MM) EN CADA UNO DE LOS TRATAMIENTOS	42
GRÁFICO 3.3. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO DE LA ZONA DE RAÍCES EN MM DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO DE LAS SONDAS P4, P5 Y P7	ANEXO I, 76
GRÁFICO 3.4. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO DE LA ZONA DE PERCOLACIÓN EN MM DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO DE LAS SONDAS P4, P5 Y P7	ANEXO I, 77
GRÁFICO 3.5. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO DE LA ZONA DE RAÍCES EN MM DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO DE LAS SONDAS P1, P3 Y P8	ANEXO I, 78

GRÁFICO 3.6. EVOLUCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO DE LA ZONA DE PERCOLACIÓN EN MM DURANTE EL PERIODO DE ESTUDIO DE LAS SONDAS P1, P3 Y P8	ANEXO I, 79
GRÁFICO 3.7. SONDA P7 PORMENORIZADA	49
GRÁFICO 3.8. EVOLUCIÓN DE LA INFILTRACIÓN DE 2 RIEGOS DE 4 LITROS	50
GRÁFICO 3.9. DIAGRAMA DE BARRAS DE LA ETO DIARIA, TENUE DESCARGA DEL PERFIL DE SUELO EN PROFUNDIDAD (LÍNEA ROJA) Y DESECACIÓN POR ABSORCIÓN RADICAL EN LA ZONA SUPERFICIAL	50
GRÁFICO 3.10. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO PARA LA SONDA P8 DEL TRATAMIENTO 4 EN LA ZONA DE RAÍCES, EN LA ZONA DE PERCOLACIÓN, ETO Y PRECIPITACIÓN	ANEXO I, 80
GRÁFICO 3.11. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO PARA LA SONDA P7 DEL TRATAMIENTO 1 EN LA ZONA DE RAÍCES, EN LA ZONA DE PERCOLACIÓN, ETO Y PRECIPITACIÓN	ANEXO I, 81
GRÁFICO 3.12. SATURACIÓN SENSORES DE LA SONDA P8, DE 10 A 150 CM EN ORDEN DESCENDENTE	52
GRÁFICO 3.13. EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO DE TALLO DURANTE EL ENSAYO PARA T1 Y T4	55
GRÁFICO 3.14. EVOLUCIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO DE TALLO DURANTE EL ENSAYO EN LOS T1 Y T4 CON SONDAS DEL TIPO FDR	56
GRÁFICO 3.15. RELACIÓN ENTRE EL POTENCIAL DE TALLO Y LA HUMEDAD DE SUELO DE LA ZONA DE RAÍCES Y DE LA ZONA DE PERCOLACIÓN	57
GRÁFICO 3.18. RELACIÓN ENTRE EL POTENCIAL DE TALLO Y LA HUMEDAD DE SUELO RELATIVA DE LA ZONA DE RAÍCES Y DE LA ZONA DE PERCOLACIÓN POR TRATAMIENTO	58
GRÁFICOS 3.19 Y 3.20. DIAGRAMAS DE CAJA DE LA HUMEDAD DE SUELO DE LA ZONA DE RAÍCES (DCHA.) Y DE PERCOLACIÓN PROFUNDA (IZQ.)	58

ÍNDICE DE IMÁGENES:

IMAGEN 1.1. CÁMARA DE PRESIÓN TIPO SCHOLANDER	19
IMAGEN 2.1. FOTOGRAFÍA AÉREA DE LA PARCELA DE ENSAYO (SIGPAC, MAGRAMA)	22
IMAGEN 2.2. DETALLE DE LA HOJA DEL CULTIVAR MOSCATEL DE ALEJANDRÍA	25
IMAGEN 2.3. CONTADORES Y TUBOS DE POLIETILENO	27
IMAGEN 2.4. SENSOR DEL TIPO ENVIROSCAN	29
IMAGEN 2.5. DETALLE DEL EMBOLSADO DE LAS HOJAS	32
IMAGEN 2.6. DETALLE DE LA ZONA DE CORTE DEL PECIOLO HUMEDECIDO	33
IMAGEN 2.7. DRENAJE SUPERFICIAL DEL UNO LOS GOTEROS	38

ÍNDICE DE TABLAS:

TABLA 2.1. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUELOS	23
TABLA 2.2. RESULTADOS DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO	23
TABLA 2.3. PROGRAMACIÓN ANUAL ORIENTATIVA PARA VIÑEDO	26
TABLA 2.4. DESCRIPCIÓN DE LOS DIFERENTES PERIODOS	40
TABLA 3.1. VOLÚMENES DE AGUA (MM) APLICADOS AL T1 Y T4 HASTA EL FIN DE LA RESTRICCIÓN Y EL TOTAL ANUAL	47
TABLA 3.2. DATOS SEMANALES DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO (MM) DE LA ZONA DE RAÍCES POR TRATAMIENTO Y SONDA	ANEXO II, 83
TABLA 3.3. DATOS SEMANALES DEL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO (MM) DE LA ZONA DE PERCOLACIÓN POR TRATAMIENTO Y SONDA	ANEXO II, 84
TABLA 3.4. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO POR PERIODO Y TRATAMIENTO	52

TABLA 3.5. COMPARATIVA DE LOS COEFICIENTES DE CULTIVO REALMENTE APLICADOS Y LOS ESTIMADOS Y SU COCIENTE	54
TABLA 3.6. DESVIACIÓN TÍPICA DE LA TABLA DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO	62
TABLA 3.7. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA TABLA DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO	62
TABLA 3.8. RESUMEN ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA ZONA DE RAÍCES	59
TABLA 3.9. RESUMEN ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA ZONA DE PERCOLACIÓN	59
TABLA 3.10. PRUEBAS DE RANGO MÚLTIPLE PARA LA ZONA RADICULAR	60
TABLA 3.11. RESULTADO DE LOS INTERVALOS LSD PARA LA ZONA DE RAÍCES	60
TABLA 3.12. PRUEBAS DE RANGO MÚLTIPLE PARA LA ZONA DE PERCOLACIÓN	61
TABLA 3.13. RESULTADO DE LOS INTERVALOS LSD PARA LA ZONA DE PERCOLACIÓN	61
TABLA 3.14. ERROR ESTÁNDAR DE LA TABLA DE RESULTADOS DEL BALANCE HÍDRICO	63
 <u>ÍNDICE DE ECUACIONES:</u>	
ECUACIÓN 1: EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ETC)	17
ECUACIÓN 2: POTENCIAL HÍDRICO DE LA PLANTA (Ψ_w)	18
ECUACIÓN 3: CAPACITANCIA (C)	29
ECUACIÓN 4: VOLTAJE DE CARGA DEL CONDENSADOR (V)	29
ECUACIÓN 5: ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO (ETC)	41
ECUACIÓN 5.1.: ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO DETALLADA (ETC)	41
ECUACIÓN 6: PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)	41

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. MARCO DEL TRABAJO

El uso de sensores para la determinación del contenido de agua del suelo para la programación del riego en agricultura está ampliamente extendido (Fares, A.; Polyakov, V., 2006 y Bonet, L.; Ferrer, P.; Castel, J. R.; et al. 2010). Su interés radica en la posibilidad de conocer el estado hídrico del suelo y su evolución, pudiendo monitorear los riegos y las lluvias, permitiendo detectar pérdidas por percolación profunda y controlar la adecuada infiltración del agua de riego en el perfil enraizado del suelo (Hidalgo et al., 2003). Todo ello buscando mejorar la eficiencia de aplicación del riego, lo que conlleva ahorros de agua, fertilizantes y energía, y por tanto intentar reducir los costos de producción y la contaminación de acuíferos.

Cabe destacar que en climas Mediterráneos semiáridos el riego suele ser la variable que más afecta a la producción de los cultivos. Para su programación, el método más habitualmente utilizado es el que divulga la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), basado en la determinación de la demanda evaporativa o evapotranspiración de referencia, E_{To} y del denominado coeficiente de cultivo, K_c , que engloba las características del cultivo (Allen et al., 1998 y Gasque et al., 2011). Una de las principales dificultades de aplicación de esta metodología es el desconocimiento de los coeficientes de cultivo, su variación espacial y su gran dependencia en el estado fenológico. Por ello, resultan muy útiles las medidas del agua útil del suelo.

En el cultivo de la vid para vinificación este tipo de mediciones cobran especial utilidad, pues pretenden controlar el estado hídrico de las cepas durante la habitual aplicación de riegos deficitarios. Esto se debe a la extendida creencia entre los viticultores de que el riego aumenta la producción en detrimento de la calidad (García Escudero et al., 1991, Yuste et al. 1997, Nadal et al., 1997, Ortega Casamayor, J., 2010 y Intrigliolo et al., 2012) y el hecho de que la vinificación del mosto pueda conferirle tanto valor agregado. Por otro lado, es de gran importancia evitar dosis excesivas que puedan provocar un innecesario crecimiento vegetativo o una mayor incidencia de enfermedades. Por estas razones se plantea la necesidad de conocer una pauta de riego óptima en función del tipo de producto que se pretenda obtener, ya sea para consumo fresco, pasificación o vinificación.

Con el propósito de conocer la dosificación adecuada del riego, es imprescindible saber cómo evoluciona el contenido de agua en el suelo. Para ello, existen diferentes métodos de medida de la humedad del suelo y cada uno plantea una serie de ventajas e inconvenientes.

La metodología del balance de agua del suelo es la utilizada para la programación del riego. Para su cálculo es necesario conocer las entradas de agua al suelo, ya sean mediante el riego o la lluvia, las salidas (transpiración del cultivo, evaporación del suelo y posible escorrentía) y la acumulación o descarga del perfil de suelo considerado.

En este trabajo, el monitoreo de la humedad del suelo se ha realizado de manera indirecta, mediante sondas del tipo “Frequency Domain Reflectometry” (FDR), del modelo “EnviroScan” de Sentek Sensor Technologies, Australia. Su funcionamiento se basa en estimar la constante dieléctrica del suelo a través de la capacitancia. Como cualquier instrumento de medida, los sensores capacitivos no son instrumentos infalibles. Sus mediciones conllevan un determinado error que puede depender de multitud de factores (tipo de sensor, calidad del agua, tipo de suelo, temperatura, etc.), unido a ello, aspectos agronómicos o el mismo procedimiento de instalación también pueden influir en sus lecturas. En cualquier caso, es importante cuantificar la magnitud de estos errores de medida.

En esta línea, diversos investigadores han contribuido mediante distintos estudios, como se verá más adelante. El presente Trabajo Fin de Máster persigue ahondar en esta línea de investigación mediante el estudio de la fiabilidad de las medidas de este tipo de sensores sin calibración del suelo específica en unas condiciones agronómicas y climatológicas determinadas. Asimismo, se estudiará la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo y el potencial hídrico de tallo, que es un buen indicador del estado hídrico de las cepas.

Este trabajo de investigación nace dentro de parte un proyecto financiado por el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias (INIA) sobre la “adecuación agronómica del riego y otras técnicas culturales en variedades blancas tradicionales de vid” coordinado por el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA).

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Utilización de sensores FDR en viticultura

La medida del contenido de agua en el suelo es un aspecto fundamental en la programación del riego, pues dicho contenido va a influir de forma importante en el estado hídrico de las cepas y en última instancia sobre la producción y la calidad de la uva (Salón et al., 2005, Yañez-Barrau et al., Ruiz-Sánchez et al. y Hera-Orts et al.).

Para su determinación en agricultura existen diferentes métodos, directos (gravimetría, placas de Richards) e indirectos (tensiómetros, sensores de resistencia eléctrica, sondas de neutrones y medidas de la constante dieléctrica del suelo).

En realidad lo que interesa medir es el agua útil del suelo, que se define como la diferencia de contenido de humedad entre Capacidad de Campo (33 KPa) y el Punto de Marchitez (1500 KPa) y su determinación se realiza en laboratorio con placas de Richards.

Los métodos directos son muy precisos, pero tienen el inconveniente de que son destructivos, requieren mucha mano de obra y son inservibles para el monitoreo de la humedad del suelo en continuo. Por ello se utilizan para calibrar métodos indirectos. Entre estos están las medidas de potencial matricial mediante tensiómetros, con las desventajas de requerir un mantenimiento frecuente, pues hay que ir rellenándolos periódicamente, y de tener un rango de medidas limitado (0-100 KPa). Otro método indirecto de medida del contenido de agua de un suelo son las sondas de neutrones. Fue uno de los primeros que se emplearon en medidas continuas (años 70 y 80). Es muy exacto, pero está en cierto desuso, ya que por tratarse de un aparato radiactivo requiere una autorización expresa, personal especializado y elevadas medidas de seguridad. Hoy en día ha quedado relegado a centros de investigación.

Un método mucho más sencillo es la medida de la resistencia eléctrica del suelo, determinada con bloques de yeso con dos electrodos en su interior. Como ventaja está su bajo precio, pero el material poroso se va degradando con el tiempo y la

medida se ve muy afectada por la salinidad y la temperatura. Existen sensores más modernos que siguen el mismo principio de funcionamiento pero con una matriz granular en lugar de yeso, lo que mejora la inercia en las medidas y la influencia de la salinidad.

Otro método indirecto consiste en medir la constante dieléctrica del suelo mediante la aplicación de un campo eléctrico que disminuye como consecuencia de su polarización. La tendencia de un material a polarizarse se denomina permisividad dieléctrica (faradios/m), normalmente relativizada respecto de la del vacío y entonces llamada constante dieléctrica (K_a).

Las TDR (Time Domain Reflectometry) miden el tiempo que tarda un pulso electromagnético (1MHz–1GHz) en pasar de un electrodo a otro a través del suelo, que es función de la constante dieléctrica de este. Existen ecuaciones empíricas que relacionan esta variable con el contenido volumétrico para muchos suelos. Son bastante precisos en el pequeño volumen de suelo que miden pero requieren un contacto muy íntimo con el mismo.

Y por último, los FDR (Frequency Domain Reflectometry) que fueron los empleados para este trabajo. Éstos miden el contenido volumétrico indirectamente a través de la constante dieléctrica aparente del suelo, pero mediante la medición del tiempo que tarda en cargarse un condensador que utiliza el suelo como dieléctrico. Por ello se denominan también sensores capacitivos. Trabajan a frecuencias de entre 10 y 100 MHz, lo que hace que las medidas sean muy rápidas y más baratas que las TDR. Su mayor desventaja, además del pequeño volumen de suelo explorado, es la sensibilidad a salinidad y temperaturas (4% de dependencia térmica).

No obstante, independientemente del método empleado, estas mediciones, especialmente sin una calibración específica para cada suelo, son inexactas. Por tanto, se precisa la estimación de su error para el cálculo de balances hídricos (Evetts Steven et al., 2012). Además, las propiedades del suelo pueden ser cambiantes con el tiempo, y por tanto, la señal de las sondas se ve afectada por factores muy diversos independientes del contenido de humedad.

1.2.2. Importancia del cultivo de la vid en España y en la Comunidad Valenciana

España es el país con mayor superficie dedicada al cultivo de la vid del mundo, con un total de 1.109.409 hectáreas (Ha) (MARM 2010).

En España la vid para vinificación es el cultivo en tercer lugar en extensión, con poco más de 1 millón de Ha (MARM 2011), de las cuales el 19,75% son en régimen de regadío (Anuario de estadística agraria, 2011). Desde el año 2000 la tendencia es a reducir la superficie de viñedo pero incrementándose el área transformada a regadío.

En la Comunidad Valenciana la superficie dedicada a viñedo es de 78.785 Ha, lo que supone en torno al 6% del total nacional. De ellas, cerca del 31% se cultivan en regadío.

La producción nacional en 2010 fue de 5.878.800 toneladas (t) de uva, correspondientes a 35.353.500 hectólitros (Hl) de vino nuevo, 5.242.100 Hl de mosto y 3.073 t de uvas pasas. El 55% de dicha producción vinícola pertenece a vinos tintos y rosados, el 45% restante a vinos blancos. El valor económico de la producción de estos últimos se estima en torno a 674 millones de € (Sevi, 2011).

En la Comunidad Valenciana, en la campaña correspondiente a 2010, la producción ascendió a 365.834 toneladas de las que 287.220 se dedicaron para transformación (vino y mosto) que se corresponden con 1.835.980 Hl (el 23% vinos blancos).

La zona de la parcela bajo estudio en este trabajo pertenece a uno de los 700 viticultores integrados en la cooperativa agraria de Cheste. Que con más de 1.300 Ha de viñedo aportan una cosecha de 13.000 t de uva para vinificación, siendo el 80% de la variedad Moscatel de Alejandría.

1.3. LA VID

La vid (*Vitis vinifera* L.) es un arbusto leñoso caducifolio y trepador, de la familia de las Vitáceas, cuyo fruto es de tipo baya agrupado en racimos. Es originaria de Asia y se cultiva en todas las regiones templadas del mundo.

La vid entra en producción hacia el tercer o cuarto año después de su plantación y es bastante longeva (30-50 años).

1.3.1. Sistema radicular

Es la parte subterránea de la planta, se encarga del anclaje al suelo. Pero la principal función es el suministro de agua y elementos minerales que dan lugar a la savia bruta. La mayoría de las raíces se desarrollan lateralmente, aunque también hay un importante desarrollo vertical. La mayor densidad radicular se suele encontrar entre los 20 y los 50 cm de profundidad (Hidalgo, 2006).

1.3.2. Tronco, brazos, sarmientos, hojas y zarcillos

Es la parte aérea de la planta, cuenta con un sistema de vasos conductores para transportar la savia bruta a través de los órganos de sujeción (tronco y brazos) hacia las partes verdes. Éstas se encargan de transformarla a savia elaborada a través del proceso de fotosíntesis. Estos fotoasimilados nutren a toda la cepa y se acumulan en los frutos y en la madera. Las hojas son también las que llevan a cabo la respiración y la transpiración.

1.3.3. Flores, bayas y racimos

Las flores son hermafroditas y por tanto se diferencian órganos masculinos y femeninos. Se agrupan en racimo de racimos o panículas. Cuando fructifican generan racimos de bayas. Éstas suelen ser de forma globosa y están constituidas por una película externa, denominada hollejo, y la pulpa, que rellena casi todo el grano junto a las pepitas o semillas y el tallo por donde se efectúa el flujo de la savia.

Es en el hollejo donde se ubican la mayor parte de los polifenoles (antocianos y taninos, entre otros) y las sustancias aromáticas de la uva deseables para una buena vinificación.

Las variedades tintas se diferencian de las blancas, en que las paredes celulares de las primeras tienen mayor riqueza polifenólica y que además contiene antocianos.

1.3.4. Ciclo anual de la vid

Según Hidalgo (2006), el ciclo fisiológico anual de la vid puede dividirse en cuatro fases claramente diferenciadas:

- Fase I. Comprende la brotación, la posterior floración y el cuajado (fecundación del ovario y transformación de la flor en fruto).
- Fase II. De cuajado a envero (cambio de coloración y textura de la baya).
- Fase III. De envero a maduración (proceso fisiológico de transformación por el cual las uvas alcanzan su pleno desarrollo)
- Fase IV. De vendimia (recolección de la producción) a agostado (secado y caída de las hojas).

1.3.5. cv. Moscatel de Alejandría

Este cultivar es una variedad blanca considerada antigua, se cree que se originó en el Norte de África y que el nombre probablemente deriva de su asociación con los antiguos egipcios que usaron esta uva para hacer vino. Se destina a consumo en fresco, preparación de pasas de uva y a elaborar vinos y mostos.

Es la variedad principal en las denominaciones de origen de Málaga y Valencia.

1.3.6. Portainjerto

El portainjerto o patrón y el cultivar, son dos individuos genotípica y fenotípicamente diferentes, cuyas características individuales, mutuamente condicionadas, definen su comportamiento agronómico.

El cultivo de la vid en zonas filoxeradas, la utilización de portainjertos resistentes es la única alternativa para asegurar rendimientos altos y una buena calidad de la uva, conservando además las características propias de las variedades injertadas.

El patrón 161/46B tiene un grado de tolerancia a la filoxera radícula medio-elevado. En ciertos lugares es sensible a nemátodos (*Meloidogyne* spp.) y parece sensible a *Agrobacterium vitis*. El 46B se caracteriza principalmente por su adaptación a los suelos calcáreos. Tiene un vigor medio y su sistema radicular está compuesto por raíces gruesas, poco numerosas y carnosas.

1.4. EL RIEGO DE LA VID

El riego es una técnica de cultivo que pretende satisfacer las necesidades hídricas de las plantas. En climas semiáridos su manejo es el principal factor de regulación del estado hídrico de las cepas (Williams y Matthews, 1990; García-Escudero, 1997). No obstante, existen otros factores que pueden influir, como la pluviometría, la textura y profundidad útil del suelo, o el manejo del mismo.

En líneas generales puede afirmarse que el riego de la vid cuando es aplicado para cubrir la totalidad de las necesidades hídricas de la vid tiende a incrementar el crecimiento vegetativo, la producción y a diluir los componentes de calidad de los vinos, en especial los tintos, si como es frecuente, produce aumento de tamaño de la baya, sin ir acompañado del correspondiente aumento de la relación hollejo/pulpa o de la concentración de los compuestos deseables en el hollejo.

De ahí que dosis de riego moderadas, deficitarias, sean preferibles para incrementar los rendimientos intentando no afectar demasiado o incluso mejorar la calidad de los vinos.

En este trabajo la programación del riego se calculó con el método propuesto por la FAO en su estudio sobre riego y drenaje. Este tiene su base en un parámetro denominado Evapotranspiración de referencia, E_{To} , que incluye variables climatológicas y un factor ligado al cultivo que engloba los requerimientos hídricos de los cultivos, K_c .

1.4.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración es la cantidad de agua que es devuelta a la atmósfera en forma de vapor desde un suelo por evaporación y por la superficie foliar debido a la transpiración del cultivo (Allen et al., 2006).

La evapotranspiración del cultivo, es decir, las necesidades hídricas de un determinado cultivo se define como:

$$E_{Tc} = E_{To} * K_c \quad \text{(ecuación 1)}$$

La ETo ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) depende de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad de la atmósfera y la velocidad del viento, y se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia que ocurre sin restricciones de agua (Thornwaite, 1948). El método más comúnmente empleado para determinar la ETo es el denominado de Penman-Monteith (Allen et al., 2006).

El coeficiente de cultivo de la vid depende de diversos factores que en definitiva determinan el área sombreada por las cepas y su interceptación de radiación, habiéndose observado relaciones lineales entre Kc y dichos parámetros (Williams y Ayars, 2005). Los valores de Kc también dependen en parte de la variedad y fluctúan con la fase del cultivo. Es por ello que el uso de sensores de medida de la humedad del suelo cada vez es más habitual.

Por último, para la programación del riego hay que considerar el efecto de la lluvia, más concretamente, la cantidad de lluvia efectivamente aprovechada por un cultivo. Lo que resulta muy difícil de parametrizar.

1.4.2. Potencial hídrico

El potencial hídrico (Ψ) integra todas las variables que determinan el estado hídrico de las cepas (riego, pluviometría, textura del suelo, demanda evaporativa, etc.). Es un parámetro fisiológico que indica el balance entre los flujos de absorción y de transpiración de agua por medio de la energía necesaria para extraer el agua contenida en los tejidos foliares (Albuquerque, 1993).

El potencial hídrico de la planta (Ψ_w) consta de cuatro componentes (Barceló et al., 1987; Turner, 1981):

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_s + \Psi_m + \Psi_g \quad \text{(ecuación 2)}$$

Donde:

Ψ_s : Potencial osmótico (determinado por la concentración de solutos en las vacuolas celulares)

Ψ_p : Potencial de presión (la presión que ejercen las vacuolas sobre las paredes celulares cuando el agua entra en la célula)

Ψ_m : Potencial matricial (fuerzas de capilaridad, absorción e hidratación celular)

Ψ_g : Potencial gravitacional (fuerzas gravitacionales)

En la vid, así como en muchos otros cultivos el método más utilizado para la determinación del potencial hídrico es el denominado de cámara de presión (Imagen 1.1.), desarrollado por Scholander et al., (1964). Valores elevados de presión en esta cámara, se corresponden con valores altos de tensión del agua en la hoja (muy negativos) y por tanto, con elevados niveles de estrés hídrico.



Imagen 1.1. Cámara de presión tipo Scholander

Hay que mencionar que el potencial hídrico es un parámetro dinámico con amplia variación a lo largo del día y por ello la necesidad de estandarizar las condiciones de medida, así como la hora. Estas medidas se pueden realizar en hojas transpirantes o no transpirantes. Estas últimas se embolsan herméticamente y por tanto cesa su transpiración (cierran los estomas) y el potencial se iguala al del tallo. De ahí que se denomine Ψ_{tallo} o xilemático a las medidas de hoja embolsada. Estas son más estables que las sin embolsar, no obstante, algunos autores prefieren la medida de hoja sin embolsar (Girona et al., 2009).

Si se mide el potencial hídrico antes del amanecer se denomina potencial de base, (Ψ_{aa}), indica fundamentalmente el contenido de agua en el suelo disponible para la planta. Si se mide a mediodía solar (Ψ_{md}), ya sea con hojas embolsadas o no, es importante tener en cuenta que en dicho momento del día, el potencial hídrico no depende exclusivamente del agua en el suelo disponible para la planta, sino también de la tasa de transpiración (T) y de la resistencia hidráulica en el continuo suelo-planta-atmósfera (R), según se resume en la ecuación $\Delta\Psi = R \cdot T$, donde $\Delta\Psi$ es la caída de potencial a lo largo de la trayectoria de transporte del agua.

Por lo tanto, dichos tipos de potenciales hídricos indican la capacidad que tiene la vid para transportar agua desde el suelo a la atmósfera. Debido al posible efecto de las condiciones climáticas ambientales sobre el potencial hídrico medido a

mediodía, hay que procurar que el día seleccionado sea representativo de las condiciones climáticas de la zona y periodo de estudio (Sellés *et al.*, 2002).

1.4.3. Antecedentes de los efectos del riego deficitario

Se han realizado infinidad de estudios sobre el riego deficitario en distintas variedades de vid, tanto tintas como blancas. A modo de escueto resumen se puede afirmar que riegos deficitarios provocan estrés hídrico a las cepas, y este afecta negativamente a la producción de biomasa (Vaux and Pruitt, 1983). Así que la aportación adicional del riego suele conllevar un incremento en el vigor de las cepas y en la producción final (Williams and Matthews, 1990, García-Escudero et al., 1997; Rubio 2002; Yuste et al., 1993). Sin embargo, en la vid para vinificación parece que al menos en variedades tintas, riegos deficitarios pueden mejorar la calidad de los mostos (Salón et al., 2005; Esteban et al., 2002; Kennedy et al., 2000; Intrigliolo y Castel, 2007a), siendo la calidad de la uva el principal factor que afecta la calidad del vino.

1.5. OBJETIVOS

El objetivo general perseguido en este trabajo fue determinar la fiabilidad del uso de las sondas FDR multisensor como herramienta de programación del riego en vid var. Moscatel de Alejandría y más concretamente para técnicas de riego deficitario controlado (RDC) sin una calibración específica para el suelo de la parcela utilizada.

Con esta finalidad se evaluó gráficamente la utilidad de las sondas de capacitancia en la programación del riego, como se expondrá en el apartado 3.3. También se calculó el balance hídrico y se analizó estadísticamente la variabilidad entre sondas y sus errores, cuyos resultados y discusión aparecen en el apartado 3.4.

Otro propósito fue evaluar la fiabilidad de las medidas del estado hídrico del suelo como indicador del estado hídrico de las cepas. Esto se hizo relacionándolas con el potencial hídrico de tallo, que es el indicador más fidedigno del estado hídrico de las plantas. El gran inconveniente de estas medidas es que son manuales, por ello, encontrar otro indicador más fácilmente automatizable que se correlacione bien con este es de especial interés.

Capítulo 2

MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. CARACTERIZACIÓN DE LA PARCELA DE ENSAYO

El estudio se ha realizado durante la campaña 2012 en un viñedo comercial situado en el término municipal de Villamarchante (39°33' N, 0°42' O), Valencia, propiedad de un viticultor integrado en la cooperativa agraria de Cheste (D.O. Valencia, subzona Moscatel).

La parcela se encuentra a una altitud de 197 m.s.n.m. y tiene una extensión de 0,56 Ha con una pendiente longitudinal del 5,4%. El ensayo se realizó en cepas adultas de la variedad Moscatel de Alejandría sobre el patrón 161-46B con un sistema de guiado de la vegetación en espaldera (23º N-O) con Doble Cordón Royat (10-12 pulgares/cepa). Las cepas se plantaron en 1996 y se riegan por goteo desde el año 2005, con emisores compensantes de 4 l/h integrados cada metro en la tubería de polietileno. El marco de plantación es de 2,75 x 1,80 m (2,75 m entre filas y 1,8 m entre cepas de la misma fila).

En la imagen 2.1. se puede observar que las aproximadamente 1150 cepas distribuidas en 20 filas no obedecen a ninguna clara distribución espacial en el tamaño de las cepas, lo que indica la posibilidad de realizar un diseño experimental de tratamientos al azar, tal y como se comenta en el apartado 2.3.



Imagen 2.1. Fotografía aérea de la parcela de ensayo (SIGPAC, MAGRAMA).

El suelo de la parcela se clasifica como un Calcisol háplico de uso agrícola de regadío (Mapa de suelos de la Comunidad Valenciana, hoja topográfica 695, Liria; Conselleria d'Agricultura i Mig Ambient, 1995). Su textura es franco arcillosa (Tabla 2.1.), con un alto contenido en cal activa y fertilidad media. Con una profundidad de 1,5 a 2 m en toda la parcela y con elevada capacidad de retención de agua (200 mm m⁻¹) (Tabla 2.2.) y una densidad aparente de 1,26-1,47 t m⁻³. No obstante, aunque las características texturales y sus propiedades químicas son bastante uniformes, se detectó un gradiente de menor profundidad hacia la parte sur de la parcela.

Prof (cm)	% partículas			TEXTURA	CE 20°C (mS/cm)	pH
	Arcilla	Limo	Arena			
0 - 30	30	31	40	FRANCO- ARCILLOSA	668	8,0
30 - 60	30	33	30		333	7,9
60 -90	33	30	38		376	7,8
90-120	35	24	41		278	7,8

Tabla 2.1. Resultados del análisis de suelos. Los valores mostrados son el resultado de 4 muestras por perfil de suelo.

Prof. (cm)	Hv CC (%)	σ (CC)	C.V. (CC)	Hv PM (%)	σ (PM)	C.V. (PM)	A.U. (mm)	σ (A.U.)	C.V. (A.U.)
0 - 30	41	4,1	11%	19	3,9	22%	65	14,5	6%
30 - 60	36			21			46		
60 -90	35			16			55		
90-120	38			13			74		

Tabla 2.2. Resultados de la capacidad de retención de humedad del suelo mediante análisis con placas de Richard. Los valores mostrados son el resultado de 16 muestras por perfil de suelo.

Donde:

Hv CC = Humedad volumétrica equivalente a la capacidad de campo calculada como:

$$Hv\ CC\ (\%) = (Hv\ 10 * M + Hv\ 20 * (100 - M)) / 100$$

M = (%) de agregados y arenas > 0.2 mm en la muestra

Hv 10 = Humedad volumétrica a 10 kPa de succión

Hv 20 = Humedad volumétrica a 20 kPa de succión

Hv PM = Humedad volumétrica a 1500 kPa, equivalente al punto de marchitamiento permanente de las plantas

A. U. (mm) = Almacenamiento en el perfil de agua utilizable por las plantas, calculada como:

$$AU\ (mm) = ((Hv\ CC - Hv\ 1500) * 300) / 100; \text{ siendo } 300 \text{ el espesor en mm de la capa de suelo}$$

El agua de riego es de salinidad media-alta; sin problemas por sodio, carbonatada (CE25º= 1,07 dS/m; RAS=1,2; pH=7,12; Cl= 2,6 meq/L).

El tipo climático de la zona se define como Semiarido (Thornthwaite), sin ningún exceso de agua en invierno. Con precipitaciones muy escasas durante los meses de verano (Gráfico 2.1.) y una media de 407 mm anuales, que según la clasificación de Rivas-Martínez, corresponde a un valor encuadrado en ombroclima seco.

En el gráfico 2.1. se pueden apreciar (mediante el área punteada) los meses que se consideran secos, frente a la situación contraria de meses húmedos (precipitación que queda por encima de la línea continua). El 48% de la evapotranspiración tiene lugar en verano (mesotérmico).

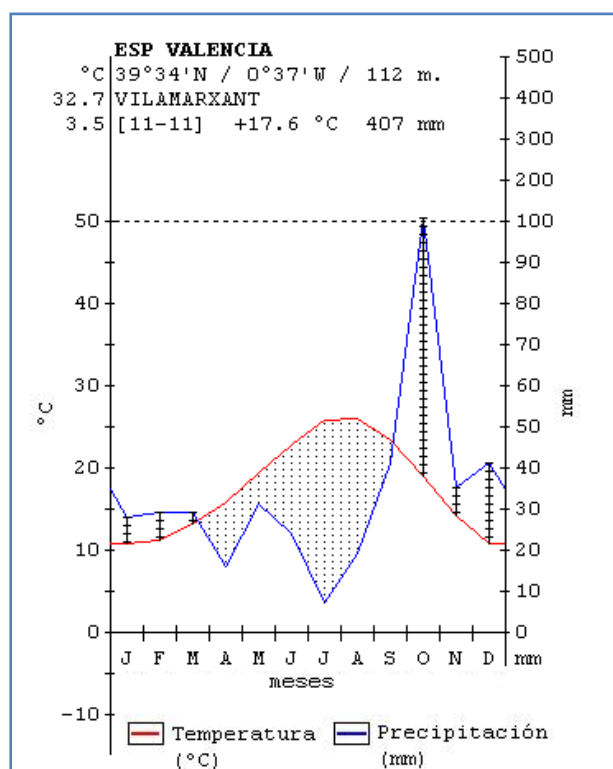


Gráfico 2.1. Diagrama climático de Gausson para Villamarchante. (Fuente. S.Rivas-Martínez, 1996-2009, modificado). Se muestra la evolución anual de la temperatura y las precipitaciones medias mensuales.

Los valores históricos indican que la temperatura media anual es de 17.6 °C y la evapotranspiración potencial anual (Thornthwaite) de 921 mm con un déficit de humedad de 514 mm.

El ensayo se ha realizado en cepas de *Vitis vinifera* L. cv. Moscatel de Alejandría (Imagen 2.2.) injertado sobre patrón 161-46B plantadas en el año 1996. La brotación de Moscatel de Alejandría en esta área por lo general ocurre a mediados de abril, la floración a principios de junio, el envero se alcanza a principios de agosto con la cosecha en septiembre y caída de hojas en diciembre.



Imagen 2.2. Detalle de la hoja del cultivar Moscatel de Alejandría

Las técnicas de cultivo fueron las habituales de la región, realizadas por el dueño de la parcela. El suelo no se altera con ninguna técnica de laboreo, únicamente se pasa la segadora para cortar la flora adventicia entre filas y se aplica herbicida en la fila por donde pasa la línea de goteros. También se realiza un aporte periódico de estiércol en la fila. Se realiza una poda de invierno dejando aproximadamente 10 pulgares por cepa de 2 yemas por pulgar y luego se repasa en primavera: La altura y anchura final del dosel fue de alrededor de 1,1 y 0,40 m, respectivamente.

2.2. TRATAMIENTOS DE RIEGO Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO CON SONDAS FDR COMO APOYO

La parcela experimental cuenta con cuatro tratamientos diferenciales de riego, pero solo se instalaron sondas de humedad de suelo en dos de ellos. En el denominado tratamiento uno (T1) y en el cuatro (T4):

- **T1:** Este tratamiento recibe un Riego Deficitario Sostenido (RDS), con una dosificación del 50% de la ETc durante toda la temporada.
- **T4:** Este tratamiento recibe un riego que satisface todas sus necesidades hídricas. Los cálculos para su programación del riego consideran el 100% de la ETc.

La ETc se calculó con los datos climatológicos obtenidos por la estación meteorológica automática de Pedralba de la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática para el Regadío) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a través de la página web del Servicio de Tecnología del Riego (<http://riegos.ivia.es/>), distante a 1.4 km de la parcela experimental.

La evapotranspiración de referencia (ETo) se calculó con los valores horarios por la fórmula Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Las precipitaciones se miden en la misma parcela por un pluviómetro automático.

A modo de ejemplo, la tabla 2.3. muestra los resultados de una programación anual orientativa para el T4 utilizando los datos climatológicos históricos de la estación de Pedralba antes mencionada, utilizando los coeficientes de cultivo para viñedo de vinificación recomendados por el Servicio de Tecnología del Riego (STR) del IVIA. La programación del T1 resultaría de dividir el Kc entre 2, aplicar la mitad de riego que al T4. La frecuencia de aplicación fue la misma para ambos tratamientos y osciló de 3 a 5 días por semana, por lo tanto, la duración de los riegos en el T1 fue la mitad que en el T4.

Mes	ETo	Kc	ETc	P	Pe	Nec. riego	m ³ /Ha	Litros/planta	Horas riego
Enero	45,01	0	0	27,37	20,48	0	0	0	00:00
Febrero	51,88	0	0	29,24	21,09	0	0	0	00:00
Marzo	86,45	0	0	46,96	32,88	0	0	0	00:00
Abril	108,09	0,29	31,14	59,89	37,7	0	0	0	00:00
Mayo	135,9	0,29	39,15	56,77	31,48	7,68	76,75	37,99	5:33
Junio	162,19	0,33	53	19,12	4,29	48,72	487,16	241,15	35:15
Julio	171,43	0,40	67,82	10,94	2,52	65,3	652,98	323,22	47:15
Agosto	148,64	0,41	61,36	13,23	3,22	58,14	581,36	287,77	42:04
Septiembre	103,5	0,42	43,61	53,54	10,34	33,28	332,8	164,74	24:04
Octubre	71,74	0,37	26,22	76,4	30,81	0	0	0	00:00
Noviembre	44,33	0	0	33,32	19,06	0	0	0	00:00
Diciembre	40,51	0	0	34,97	25,55	0	0	0	00:00
TOTALES	1169,67	0,21	322,31	461,75	239,42	213,11	2131,05	1054,87	154:10:12

Tabla 2.3. Programación anual orientativa para viñedo de vinificación situado en Pedralba

El coeficiente de cultivo (K_c) aplicado durante la campaña de riego de 2012 en la parcela experimental osciló entre 0,2 y 0,5. Estos valores son el resultado de la utilización de los datos del estado hídrico del suelo como criterio complementario para la programación del riego. Su eficacia como herramienta de programación del riego se discute en el apartado 3.3 de interpretación de gráficos de humedad.

El riego se inició, para ambos tratamientos, cuando Ψ_{tallo} alcanzó -0.65 MPa, 43 días después de la brotación, a partir del 23 de septiembre fue el mismo para todos los tratamientos y finalizó el 21 de Octubre. Su programación se realizaba semanalmente y para su aplicación hubo de instalarse un sistema de riego sectorizado para poder regar independientemente cada tratamiento según las diferentes estrategias de riego (Imagen 2.3.). Durante toda la campaña todos los tratamientos se fertirrigaron con las mismas dosis de abono ($111-73-214-24$ kg ha $^{-1}$ de N, P $_{205}$, K $_{20}$, MgO). Por tanto, si el abonado tuvo influencia en las lecturas de las sondas debido al incremento de la conductividad eléctrica del agua de riego, lo tuvo para todos los tratamientos por igual.



Imagen 2.3. Contadores y tubos de PE

Para la rápida detección de posibles averías en la instalación de riego se instalaron contadores volumétricos en cada unidad experimental con un sistema de transmisión de datos vía GSM (marca “Contazara”, modelo CZ2000).

2.3.- DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental de la parcela es de 4 tratamientos con 4 repeticiones por cada tratamiento, aunque para nuestro análisis solo se monitoreó la humedad en dos tratamientos, en 4 de las 16 unidades experimentales (u.e.) como se observa en la Figura 2.4.

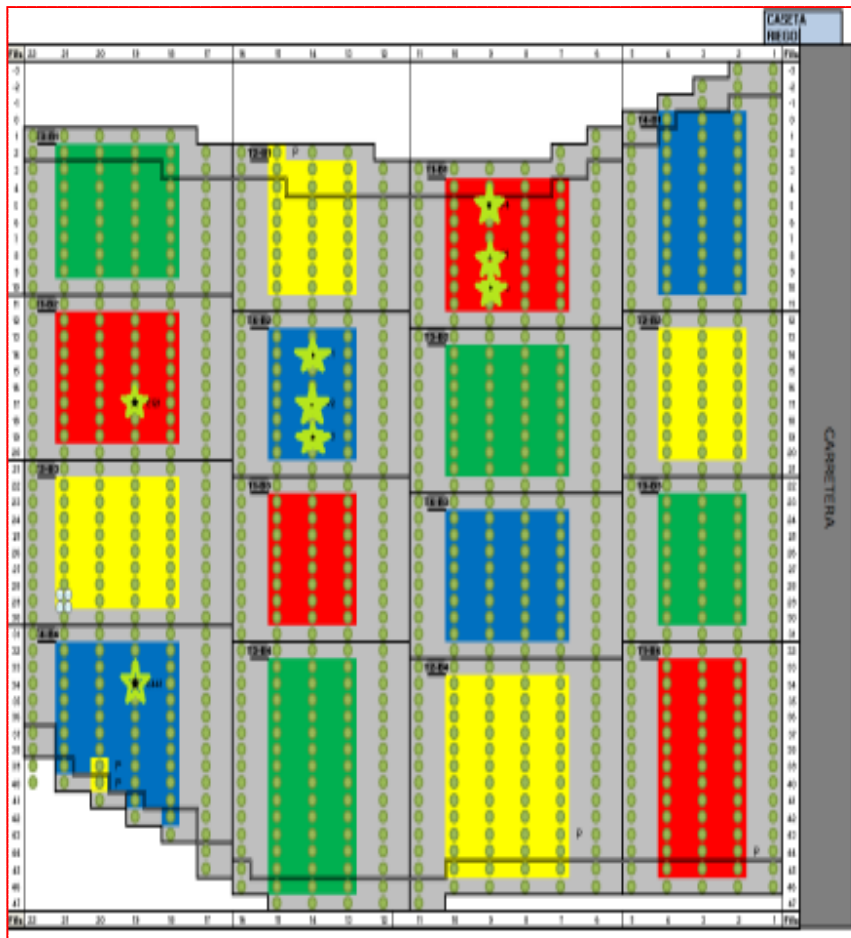


Figura 2.1. Parcela de ensayo sectorizada con los diferentes tratamientos y sus respectivas repeticiones y las sondas FDR señaladas con una estrella.

Las unidades experimentales (u.e.) se seleccionaron dividiendo la parcela en 4 bloques en dirección Este-Oeste de forma que al azar dentro de cada bloque hubiese una u.e. de cada tratamiento y no se repitiesen a lo largo de las filas. El motivo de diseñarlo así fue distribuir homogéneamente entre todos los tratamientos la posible influencia del gradiente de menor profundidad de suelo hacia el sur de la parcela.

Se decidió instalar 4 sondas en solo 2 tratamientos en previsión de la alta variabilidad que pudiesen tener sus lecturas. La instalación de las 8 sondas FDR, por motivos técnicos, se realizó en dos bloques por tratamiento. Tres sondas en el bloque 1 y una en el 2 del tratamiento de riego al 50% ETc (coloreados de rojo), y en el tratamiento de riego al 100% de la ETc (coloreados de azul) se instalaron tres en el bloque 2 y una en el 4. Se seleccionaron cepas con un desarrollo medio de la

zona central de la u.e. con la intención de reducir en lo posible la variabilidad espacial y evitar las posibles interferencias del denominado “efecto borde”.

2.4. DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DEL SUELO

El contenido de agua del suelo se midió con sensores FDR, modelo “EnviroScan” (Sentek Pty Ltd, Australia). Dos de ellas del modelo EnviroScan Plus (con sistema de transmisión de datos vía GSM). Como ya se comentó en el apartado 1.2.1, son sensores de medida indirecta, pues en realidad miden la constante dieléctrica aparente del suelo (K_a) a través del tiempo que tarda en cargarse un condensador interno que utiliza el suelo como dieléctrico. Es por ello que a este tipo de sensores se los denomina de capacitancia.

La capacitancia (C) es la medida de la capacidad de almacenamiento de carga de un condensador (Faradays). Los sensores empleados incorporan un condensador de placa paralela, la capacitancia es función de su superficie (A), de la constante dieléctrica del material usado como dieléctrico (el suelo) y de la separación entre las placas (S).

$$C = K_a * A * S^{-1} \quad \text{(ecuación 3)}$$

Como A y S son constantes (Imagen 2.5.), el tiempo que tarda en cargarse el condensador es una función lineal de la constante dieléctrica del suelo (K_a).

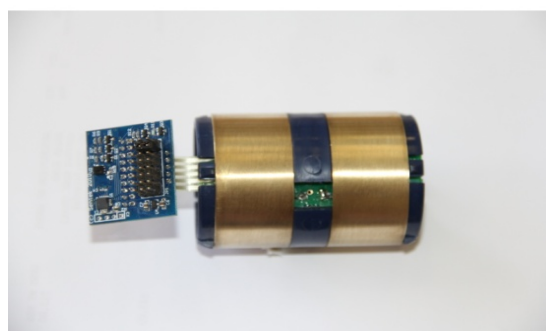


Imagen 2.4. Sensor del tipo EnviroScan

La física del funcionamiento de estos sensores consiste en la aplicación de un voltaje conocido, que dependiendo de la constante dieléctrica del suelo, produce una determinada frecuencia. El tiempo de carga viene dado por la expresión:

$$\frac{V - V_f}{V_i - V_f} = e^{t/RC} \quad \text{(ecuación 4)}$$

Donde:

- V , voltaje de carga del condensador
- V_i , voltaje inicial
- V_f , voltaje aplicado
- t , tiempo de carga
- R , resistencia
- C , capacitancia del condensador

Las sondas FDR funcionan a frecuencias de 10 a 100 MHz, lo que posibilita que sean medidas rápidas. Su mayor desventaja es la sensibilidad a salinidad y temperatura, pero las EnviroScan cuentan con ecuaciones de calibración internas que minimizan su influencias. El radio de influencia del campo eléctrico generado entre las dos placas de un sensor es de 10 cm., vertical y horizontalmente, concentrándose intensamente en los primeros 5 cm (Mounzer et al., 2010).

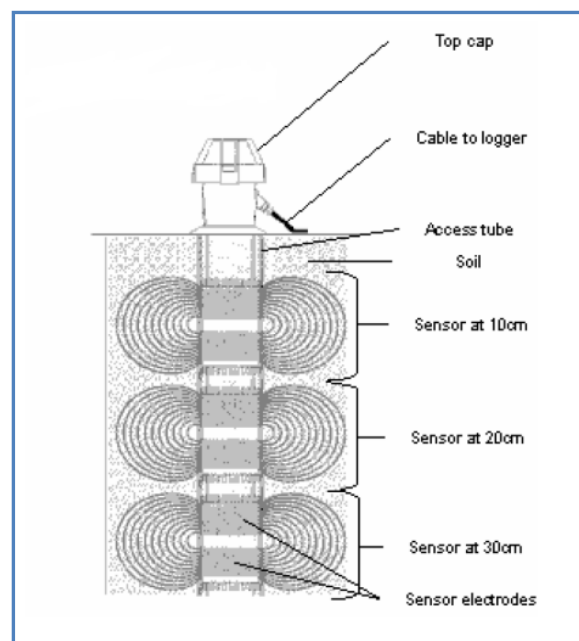


Figura 2.2. Radio de influencia de los sensores capacitivos "EnviroScan"

Previo a la instalación, las 8 sondas se normalizaron en agua y al aire, pero no se calibraron para el suelo de la parcela. Se instalaron a finales del mes de Mayo de 2012 a través de tubos de acceso de PVC a una distancia de 0.10-0.15 m. del gotero. Se instalaron un mínimo de 5 sensores en cada una, a 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 y 1,5 m de profundidad. En la Imagen 2.7. se muestra la distribución de sensores por sonda y por tratamiento.

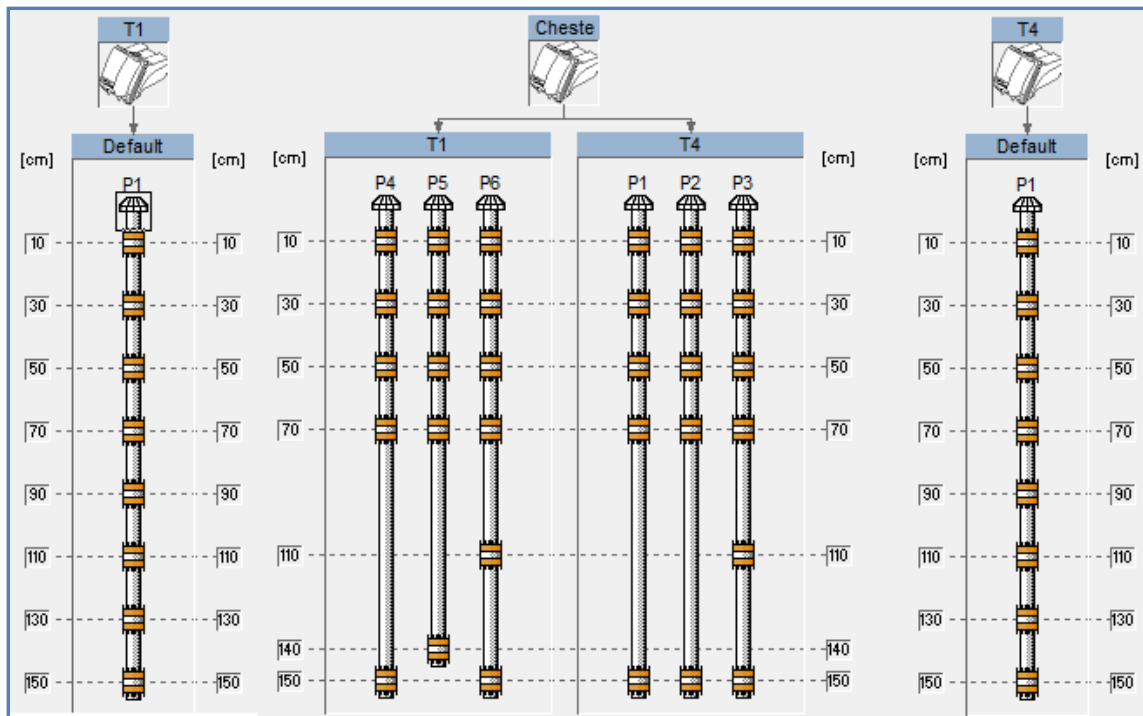


Figura 2.3. Esquema de la distribución de sensores por sonda y tratamiento.

La frecuencia de lectura fue variando a lo largo de la campaña por motivos de almacenamiento en los registradores de datos, ya fuese transmisión vía GSM o por descarga directa. A inicio del ensayo, durante el mes de mayo la periodicidad de registro era de 4h, ya que durante la parada vegetativa de un cultivo caducifolio como la vid, esos datos no requieren mucha definición. En junio, la frecuencia de las sondas P1, P2, P3, P4 y P5 dependientes de un mismo registrador de datos, pasó a ser horaria, y a partir de finales de agosto semihoraria. La frecuencia de las sondas P7 y P8 (EnviroScan Plus), varió de semihoraria en mayo y junio a cada diez minutos a partir de ese momento.

Las sondas P2 y P6, correspondientes con el tratamiento 1, bloque 1 y tratamiento 4, bloque 2 respectivamente, tuvieron interrupciones en la toma de datos y/o sensores con mal funcionamiento. Por estos motivos, no se pudieron analizar sus datos durante la campaña de riego completa y se decidió no incluirlos en los cálculos del balance hídrico.

Las lecturas de las sondas se visualizaron mediante la utilidad informática del fabricante "IrriMAX 8". Con una opción de interpolación de datos de este programa se obtuvieron los contenidos volumétricos cada 0,1 m. para todo el perfil de suelo. (IrriMAX User Guide, Sentek Pty Ltd.)

2.5. DETERMINACIÓN DEL ESTADO HÍDRICO DE LA PLANTA

El estado hídrico de las cepas se determinó midiendo el potencial hídrico de hoja embolsada, también denominado potencial hídrico de tallo (Ψ_h). Las mediciones se realizaron con periodicidad semanal durante toda la campaña de riego con una cámara de presión tipo Scholander (PMS, Model 600, USA).

Se midió una hoja por cepa de su cara oeste, en 4 cepas representativas de cada u.e.. Dichas hojas se introducían en bolsas de plástico herméticas recubiertas de papel reflectante para evitar el calentamiento debido a la radiación solar y para que la hoja cerrara sus estomas y se equilibrará con el potencial del tallo. (Imágenes 2.8. y 2.9.). El embolsado se realizaba como mínimo 1 hora antes de realizar la medida al mediodía (11:30-12:30 hora solar) y no se dejó pasar más de 30 segundos desde que se arrancaba la hoja hasta que se metía dentro de la cámara de presión, siempre dentro de la bolsa hermética. Tiempos más largos de 2 minutos desde que se arranca la hoja hasta que se empieza la medición provoca deshidratación de la hoja (Sellés *et al.*, 2002). Las medidas fueron realizadas por técnicos del IVIA con amplia experiencia y conocimientos del protocolo de correcto funcionamiento y seguridad de este tipo de instrumental.



Imagen 2.5. Detalle del embolsado de las hojas previo a la medición de potencial hídrico foliar de tallo a medio día solar

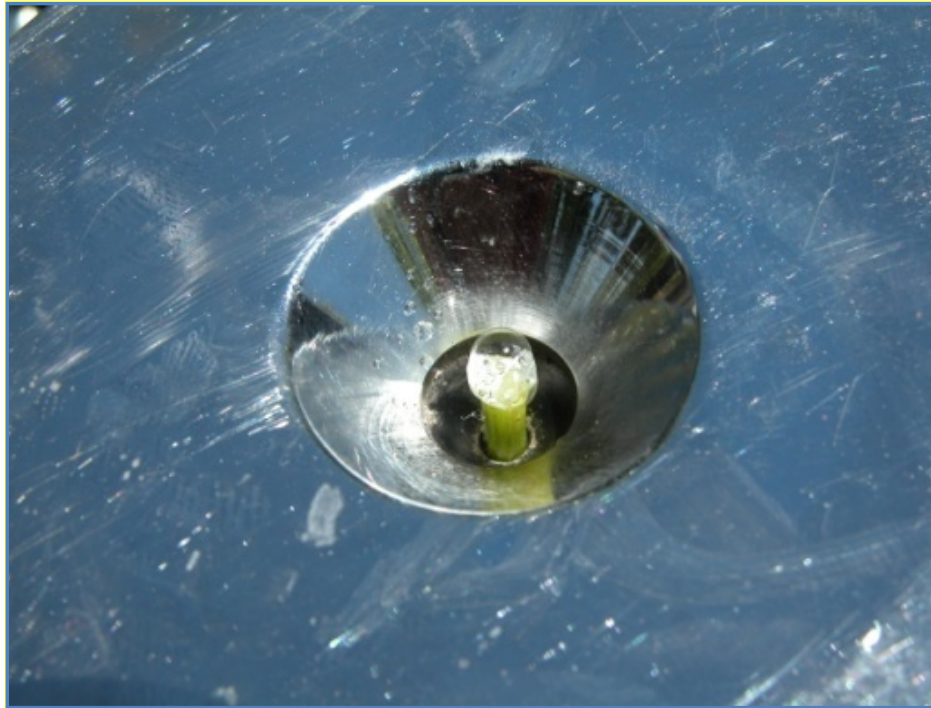


Imagen 2.6. Detalle de la zona de corte del peciolo humedecido

2.6 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO EN UN SUELO DE VIÑEDO

La metodología empleada para la programación del riego es la del balance de agua. Este trabajo pretende evaluarla empíricamente en un caso práctico concreto utilizando los datos de la evolución temporal del contenido de agua en el suelo obtenidos mediante sondas FDR multisensor.

A continuación se describen los parámetros a considerar para el cálculo de las relaciones hídricas en nuestra parcela experimental:

- Profundidad del suelo

La profundidad del suelo de la parcela se determinó mediante un muestreo realizado con barrenas entre 1,5 y 2 metros en 20 diferentes ubicaciones. Se considera efectiva por no existir horizontes cementados ni otras limitaciones al enraizamiento. El perfil de suelo estudiado para el cálculo del balance hídrico fue únicamente hasta 1,6 m de profundidad.

- Profundidad radicular

Para la determinación de la zona de raíces no se realizó ninguna calicata, se dedujo de la evolución del contenido volumétrico de humedad del suelo durante la campaña de riego. Se observó que la infiltración de los riegos más habitualmente aplicados se percibía con claridad hasta el 0,5 m de profundidad, y por tanto, es en esta zona donde se concentran las raíces y la absorción radical. No obstante, el resultado de graficar la humedad del perfil de suelo, como se puede observar en los gráficos 2.1. y 2.2., sugiere que el cambio de gradiente de humedad que demarcaría la separación entre la zona radical y la de pérdidas por percolación puede estar más profunda. No obstante, debido a las profundidades de instalación de los sensores realizada, dependiente de limitaciones de material, se definió la zona de raíces de 0 a 0,6 m y la de pérdidas por percolación profunda de 0,6 a 1,6 m. Dicho diseño obedece a la pretensión de monitorear lo que ocurre en la zona de absorción radical y contar con un sensor profundo para detectar las posibles pérdidas por percolación profunda a 1,5 m. Por tanto, se considera que todos los incrementos de humedad en profundidad son descargas por flujo descendente y no por absorción radical. No obstante, se tiene conciencia de que parte del agua de riego que se descontará mediante este procedimiento pueda ser consumida por el potente sistema radical de la vid en periodos fenológicos de mayor necesidad, contenido de humedad del suelo menor o una demanda evaporativa puntualmente no satisfecha por las entradas al suelo.

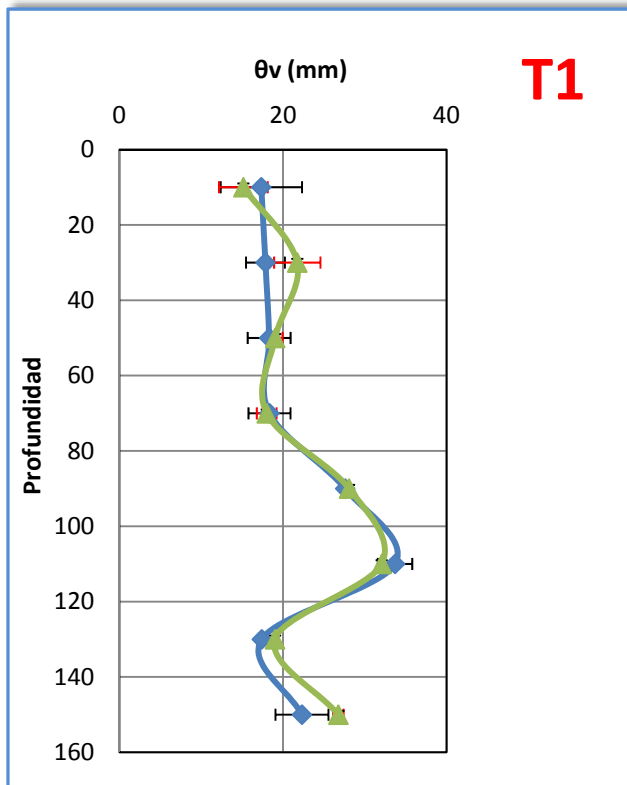


Gráfico 2.2. Contenido de humedad T1

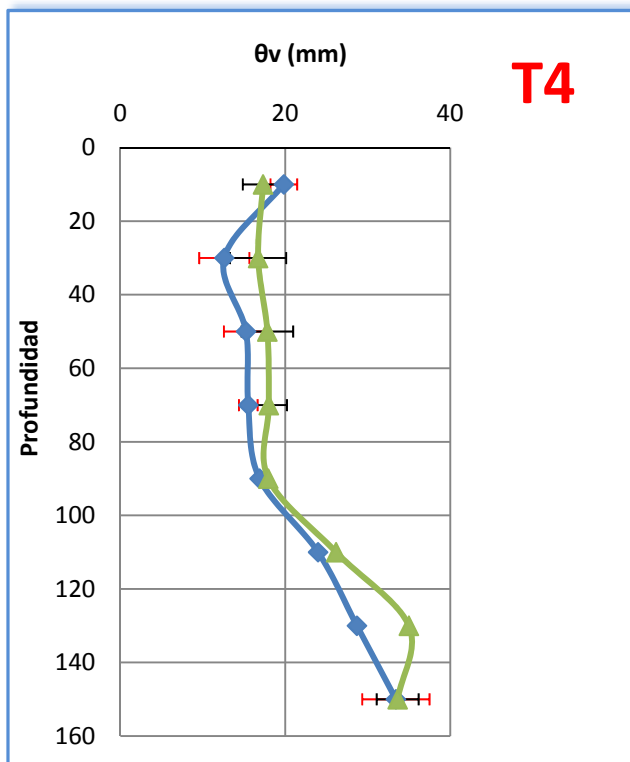


Gráfico 2.3. Contenido de humedad T4

Los gráficos 2.1. y 2.2. representan la variación del contenido de agua del perfil de suelo desde el día que se empezó con su monitoreo (23/04/2012) hasta el día de último riego (21/10/2012). Las barras de error muestran el error estándar de los sensores en común a las 3 sondas analizadas, tanto para el tratamiento 1 como para el 4.

Se observa que la variación por profundidad entre el principio y el final de la campaña de riegos ha sido muy tenue y similar por durante los meses intermedios.

Los contenidos menores de humedad se aprecian hasta 70 cm. aprox. en ambos tratamientos (zona de absorción radicular) y aparentemente en profundidad se acumula más humedad. Cabe destacar el incremento de humedad a 110 cm en el T1, que podría tratarse de un plano de flujo nulo ocasionado por una veta más arcillosa. Un plano donde el gradiente hidráulico vertical sería cero, lo que significa que no le llegaría la infiltración y por debajo de él sí se infiltraría.

- **Entradas:**

- **Lluvia**

Las precipitaciones tenidas en cuenta en el balance fueron las correspondientes al área de lectura de la sonda más la ocupada por la propia sonda. Teniendo en cuenta que su radio de medida es de 10 cm y que el diámetro de la sonda es de 5,5 cm, dicha área corresponde a 5,1 dm². Las precipitaciones menores de 4 mm diarios se despreciaron, valores mayores que de los 2 mm habituales, pues el follaje de la cepa se supuso que interceptaría estas cantidades por estar justo encima de la sonda y en caso de alcanzar la zona de suelo de lectura se podrían despreciar por evaporación.

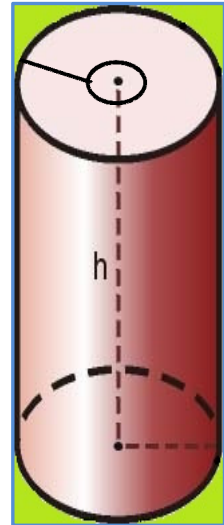


Figura 2.4. volumen de radio 12,5 cm. en el que tiene influencia la sonda.

- **Riego**

El riego considerado en el balance hídrico fue el del gotero instalado junto a la sonda, calculado como el cociente entre el caudal de la u.e. correspondiente al del contador volumétrico y el número total de emisores.

- **Ascenso capilar**

El posible ascenso capilar no se detectó gráficamente en ningún momento y por tanto se consideró despreciable. No obstante, en un balance hídrico realizado con sensores de capacitancia del mismo tipo en la Finca Experimental La Poveda (CCMA-CSIC) en maíz, una de las hipótesis apuntaba a movimientos de humedad ascendentes en forma de vapor (Arauzo et al., 2005).

- **Salidas:**

- **Consumo de agua de la vid**

En condiciones climáticas semiáridas, la vid regada por goteo mediante la aplicación de coeficientes de cultivo experimentales siguiendo el método recomendado por la FAO para la programación del riego, el consumo de

agua por parte de la planta debería ser la salida del balance de mayor cuantía. Su estimación mediante sensores de humedad de suelo es bastante difícil dado lo complicado de disociar la parte de humedad que se descarga del perfil de suelo debido a la absorción de la planta de la que se infiltra más allá de la zona radical.

- **Evaporación del suelo**

Otro factor a tener en cuenta en el balance es la evaporación del suelo. Aspecto de importancia cuantitativa en sistemas de riego que humedezcan gran parte del suelo, como por ejemplo, sistemas de riego a manta, por surco o por tablar, o también sistemas de riego presurizado como la aspersión.

Este factor, en la metodología que empleada para el cálculo del balance hídrico, está incluido en el término ETC. Cabe destacar, que su contribución en la zona de influencia de lectura de las sondas es muy pequeña, pues se encuentra sombreada durante la mayor parte del día y el caudal de los goteros (4l/h) evita el encharcamiento dado que la textura del suelo permite una rápida infiltración.

- **Consumo de agua de las cubiertas vegetales**

Como se comentó en el apartado 2.1 de caracterización de la parcela, el no laboreo del suelo y la climatología de la zona permiten la aparición de flora auxiliar entre filas, no así en la línea de goteros gracias a la periódica aplicación de herbicida. Esta flora silvestre forma una cubierta vegetal beneficiosa para mejorar la infiltración de la lluvia, servir de nicho ecológico para predadores o parásitos de posibles plagas, aportar materia orgánica al suelo y favorecer su mineralización. Pero también conlleva un consumo de agua difícil de estimar. Para el cálculo del balance no se tuvo en cuenta por no aparecer en el radio de influencia de los sensores capacitivos.

- **Escorrentía**

La escorrentía superficial afecta principalmente a las aportaciones por lluvias, puede ser de gran importancia en parcelas con grandes desniveles. Pero en riego por goteo si se adopta un correcto diseño agronómico las pérdidas son normalmente pequeñas. En la parcela experimental este factor se obvió dada su pequeña pendiente a pesar de que en momentos puntuales haya podido escurrir algo del riego hacia la calle al estar ligeramente acaballonada la hilera de cepas (Imagen 2.11.)



Imagen 2.7. Drenaje superficial del uno de los fertirriegos con quelatos de hierro del gotero de una de las sondas antes del acondicionamiento del terreno.

- **Percolación profunda**

Es el flujo vertical descendente de agua del suelo a mayores profundidades que la alcanzada por las raíces. Para su cálculo en del balance hídrico se tuvieron en cuenta todos los incrementos diarios en los sensores de 0,7 a 1,5 m de profundidad. Así se calculó el incremento de humedad en dicha zona como la diferencia entre la lectura máxima diaria menos la mínima diaria si esta última es anterior a la máxima. El resultado de esta operación se corresponde con la altura del cilindro de suelo de influencia de las sondas, que multiplicado por su área da el volumen de agua que ha alcanzado dichas profundidades, es decir, la que se ha perdido por percolación.

Este método de cálculo fue corroborado gráficamente (ANEXO II, gráficos 3.4. y 3.6.), concluyéndose que a estas profundidades, donde los

incrementos son leves y los posibles aportes por riego ocurren a últimas horas del día, se contemplan la inmensa mayoría de las entradas. En el siguiente gráfico se puede observar de forma exagerada el caso más típico:

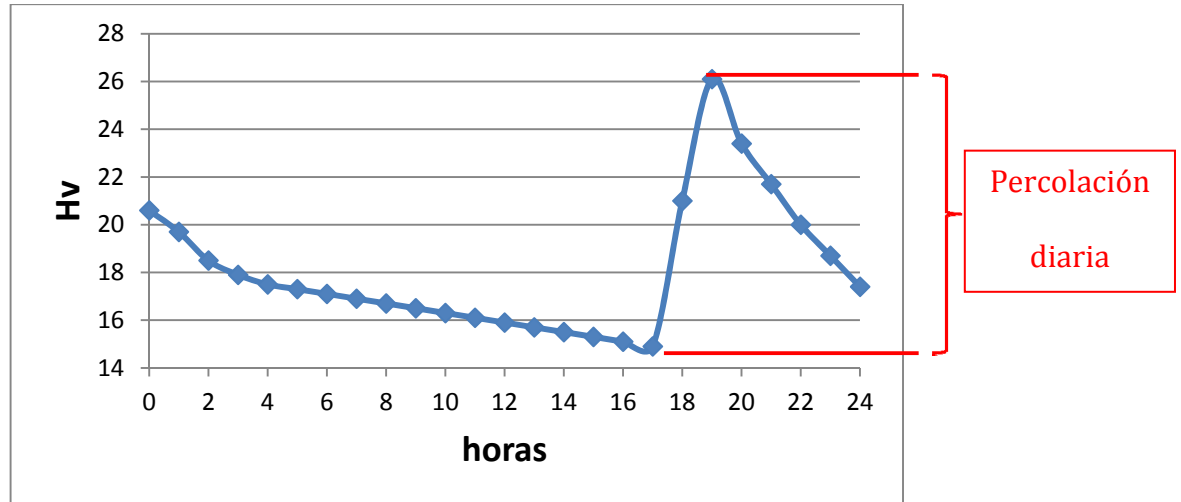


Figura 2.5. Incremento de humedad diario en el perfil de 0,6 a 1,6 m. (pérdidas)

- **Capacidad de retención de agua**

La capacidad de retención de agua de un suelo influye en el balance hídrico, pues funciona como almacén de humedad en el rango de capacidad de campo a punto de marchitez. Para el cálculo del balance hídrico se computaron las variaciones diarias de humedad en la zona considerada de raíces (0-0,6 m) a efectos de acumulación o descarga.

Este cálculo se realizó restándole a la última lectura del día la primera. Obviamente estas variaciones pueden ser positivas (entradas), o negativas (salidas). En el siguiente gráfico se puede observar gráficamente:

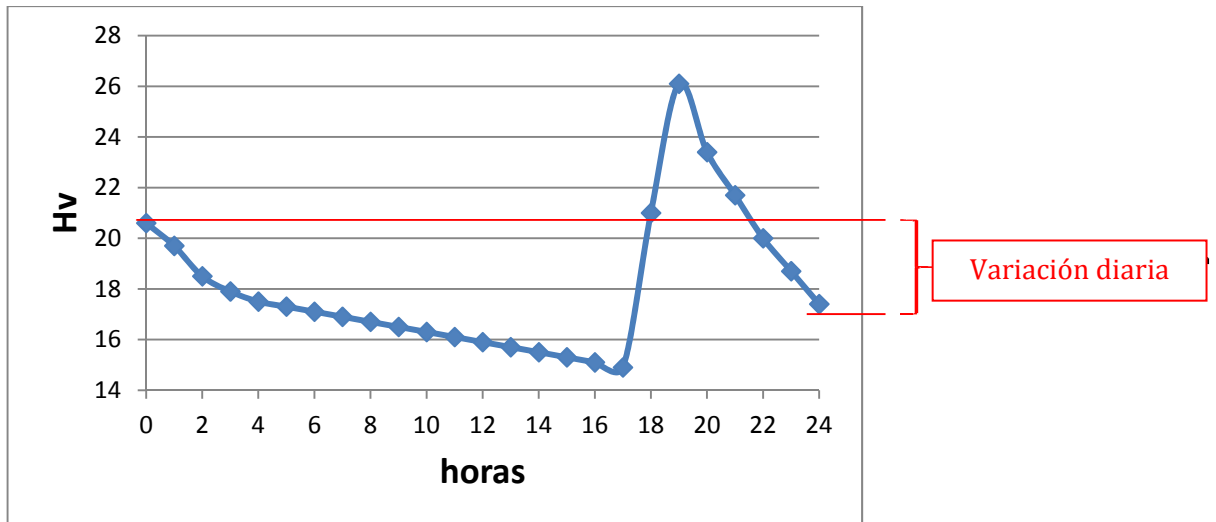


Figura 2.6. Variación de humedad diaria en el perfil de 0 a 1,6 m. (entradas)

Una vez descritos los parámetros a tener en cuenta en el balance y su método de cálculo, se procede a exponer el proceso de cálculo del balance hídrico. Se trabajó con datos semanales, obtenidos como la suma de siete diarios, interpolados por perfil de suelo (0 a 0,6 m) y de (0,7 a 1,5 m). Estos datos eran el resultado de una opción de interpolación del software específico de este tipo de sondas.

En previsión de que existiesen diferencias de funcionamiento durante la campaña, se decidió fraccionar el balance en periodos que obedecen a criterios fenológicos y por tanto de programación del riego:

Periodo	Fecha inicial	Fecha final	Descripción
1	23/04/2012	20/05/2012	Brotación (hojas extendidas-botones florales separados). Riego solo para abonado.
2	21/05/2012	10/06/2012	Floración-cuajado (inicio del riego el 24/04/2012).
3	11/06/2012	05/08/2012	Tamaño guisante-Envero (Envero: 7 Agosto).
4	06/08/2012	23/09/2012	Envero-Maduración (1ªvendimia 19/9/12) .
5	24/09/2012	21/10/2012	Agostamiento (2ªvendimia 5/10/12, último riego, elevada pluviometría)

Tabla 2.4. Descripción de los diferentes periodos en los que se dividió la campaña de riegos

La ecuación para el cálculo del balance hídrico utilizada fue:

$$ETc = R + P - \Delta H_v - Per \quad \text{(ecuación 5)}$$

Donde:

ETc, Evapotranspiración de las cepas (mm)

R, Riego (mm)

P, Precipitación (mm)

ΔH_v , Variación de humedad volumétrica en la zona de raíces expresada como lámina de agua (mm)

Per, Pérdidas por percolación profunda (mm)

Anteriormente se expuso el método de cálculo de la variación de humedad en la zona de raíces y de las pérdidas por percolación profunda, pero para su inclusión en la ecuación 5 han de estar en las mismas unidades. Para ello, el procedimiento consistió en calcular tanto las variaciones en la zona de raíces como la percolación semanal en porcentaje respecto al riego y la precipitación efectiva en el área de suelo de influencia de la sonda. De esta forma, extrapolamos para la lluvia lo observado con las sondas a 1 metro cuadrado que se asume como la superficie de suelo que una cepa de 0,8 m de anchura de espaldera podría aprovechar (con goteros espaciados 1 m). Este cálculo viene de la expresión 6, utilizada por el Servicio de Tecnología del Riego (IVIA) para el cálculo de la precipitación efectiva.

$$Pe = P * (A * 1,25) \quad \text{(ecuación 6)}$$

Donde:

- Pe , precipitación efectiva (mm)
- P , precipitación total (mm)
- A , área sombreada

Por tanto, la ecuación quedaría así:

$$ETc = R * (1 - (\% Per/100) - (\% \Delta H_v/100)) + Pe * (1 - (\% Per/100) - (\% \Delta H_v/100)) \quad \text{(ecuación 5.1.)}$$

Donde:

- E_{Tc} , R y P_e son iguales y en las mismas unidades que en la ecuación 5, mientras que la variación de humedad volumétrica de la zona de raíces y las pérdidas por percolación profunda están aquí expresadas en porcentaje ($\% \Delta H_v$ y $\% Per$).

Por último, con el objetivo de conocer qué porcentaje de lo que teóricamente ha entrado en el balance ha sido detectado por las sondas se calculó su relación. Las entradas teóricas se consideraron como el volumen aplicado por el gotero más la suma de la precipitación efectiva correspondiente al área de influencia de la sonda. Las entradas estimadas por los sensores se calcularon en la zona de raíces mediante el mismo método que los incrementos de la zona de percolación, esto es restándole a la lectura mayor diaria la menor si esta era anterior en el tiempo. No obstante, dado el flujo más dinámico en esta zona, se observó que había días en el que las entradas no cubrían las salidas, pues la lectura mínima diaria era posterior a la máxima a pesar de haber existido entradas y por tanto esta metodología no era válida. Así, en esos casos, se calculó la diferencia entre la lectura máxima y la lectura inicial del día. De esta forma se estimaban todas las entradas al suelo a excepción de la entrada de menor cuantía en el improbable episodio de que coincidiesen lluvia y riego el mismo día. Esto ocurrió muy excepcionalmente con precipitaciones de poca consideración ya que en la programación del riego semanal se tenía en cuenta la previsión meteorológica de la Agencia Española de Meteorología (AEMET) y en los días de mayor probabilidad de lluvia no se programaba riego.

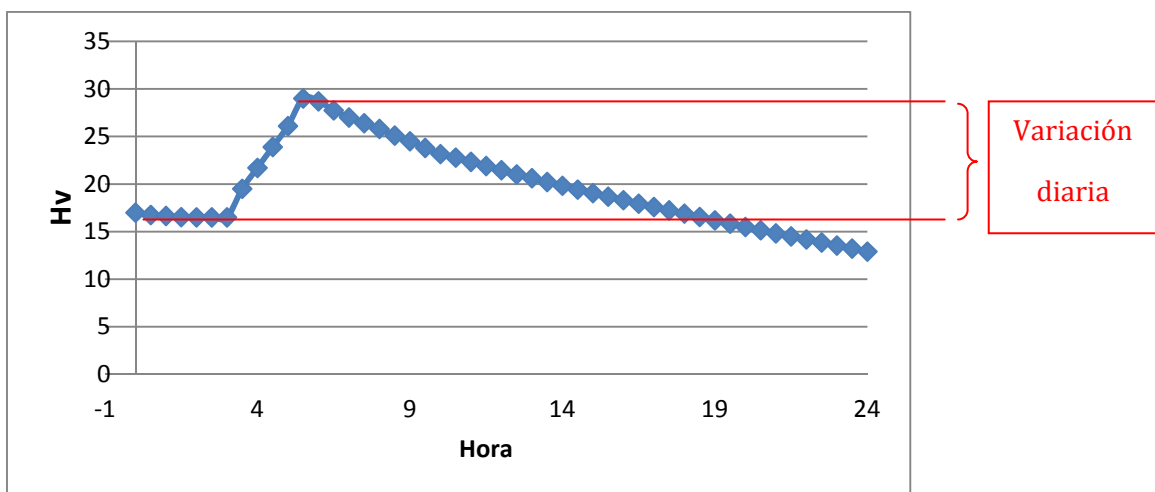


Figura 2.7. Incremento de humedad diario en el perfil de 6 a 0,6 m.(entradas < salidas)

2.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS SUMINISTRADOS POR LOS SENSORES

Se comprobó la normalidad de los datos obtenidos mediante los sensores capacitivos y por tanto se analizaron con el programa informático STATGRAPHICS Centurion XVI, mediante ANOVA. Mediante la distribución F de Snedecor y Pruebas de Rango Múltiple se determinó la significación estadística de las diferencias entre las medias de las distintas sondas, sin hacerse separación entre tratamientos de riego. El análisis se realizó separando los datos más superficiales (0-0,6 m; zona asumida como de raíces) de los de profundidad (0,6-1,5 m; zona asumida como de pérdidas por percolación profunda).

Capítulo 3

Resultados y Discusión

3.1. CLIMATOLOGÍA Y VOLUMEN DE AGUA APLICADA

El año 2012 fue de elevada demanda evaporativa para los cultivos y de baja pluviometría. La ETo anual fue de 1275 mm, mientras que el promedio de los datos históricos de esta estación es de 921 mm. La pluviometría de 2012 tuvo lugar en los meses habituales del año que, pero con valores menores que la media histórica, 407 mm frente a los 230 del 2012.

En el gráfico 3.1. se muestran los datos mensuales para el año 2012 de la precipitación, la evapotranspiración de referencia y la temperatura media.

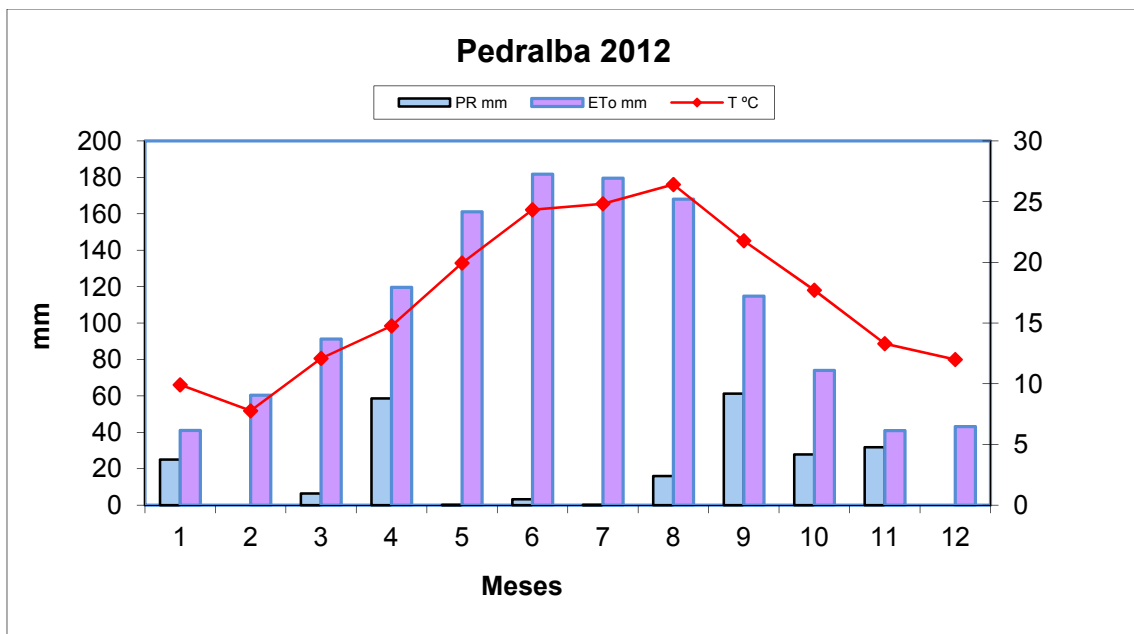


Gráfico 3.1. Evolución mensual de la ETo, de la precipitación y temperatura media

A pesar de tratarse de un año de bajas precipitaciones, es importante indicar que las lluvias ocurridas durante el 30 de agosto, 27 y 28 de septiembre tuvieron importancia en el aporte hídrico a la planta, como se pudo observar en las medidas de potencial hídrico de tallo.

El volumen de agua aportado por riego fue de 156 y 281 mm para los tratamientos T4 y T1 respectivamente hasta el 24 de Septiembre, fecha en la que se terminaron los tratamientos diferenciales de riego y a partir de entonces solo hubo una

pequeña aplicación de agua sin distinción entre tratamientos (Tabla 3.1). El T1, con riego deficitario sostenido, conllevó un ahorro de agua del 44,4% respecto del T4. No corresponde exactamente con el 50% que teóricamente debería. Esto se debe a que a los riegos de principio de campaña para abonado y pruebas de funcionamiento de la instalación de riego fueron de la misma duración para ambos, además de por las pequeñas diferencias de uniformidad en el riego.

Tratamiento	Riego (mm) 1 Abril- 24 Septiembre (Ahorro %)	Riego Total año (mm)
T1 (50% ETc)	156 (44)	181
T4 (100% ETc)	281	306

Tabla 3.1. Volúmenes de agua (mm) aplicados al T1 y T4 hasta el fin de la restricción y el total anual

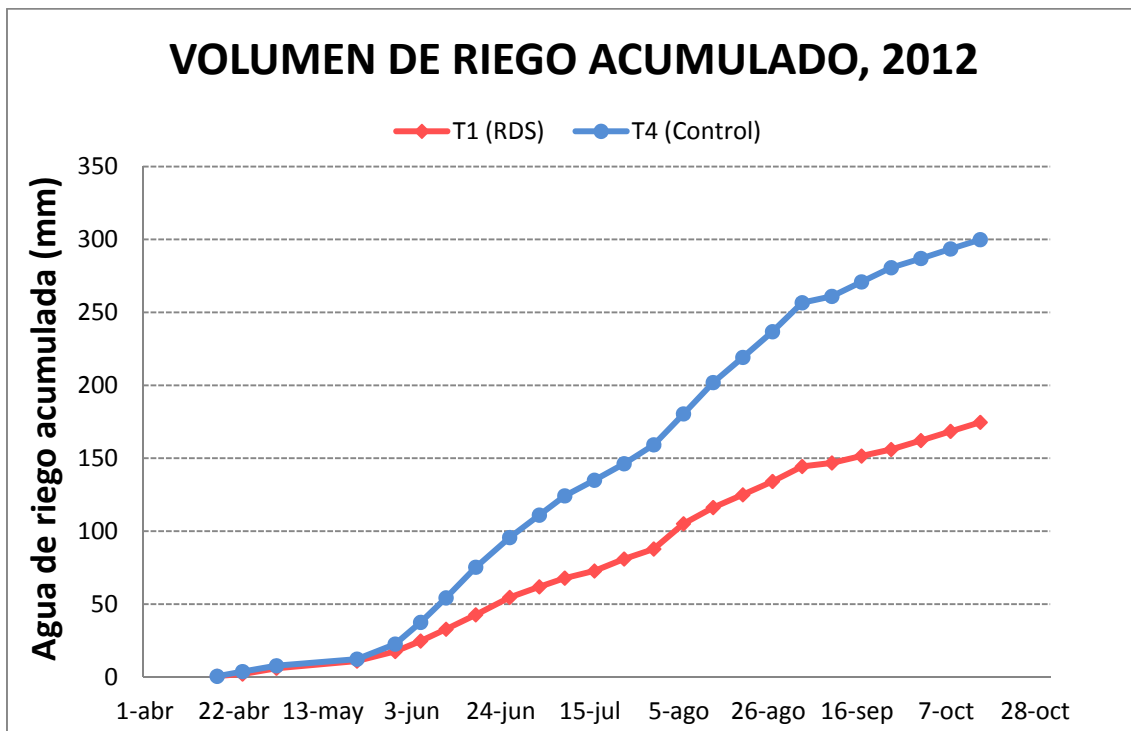


Gráfico 3.2. Volumen de agua aplicado (mm) en cada uno de los tratamientos. T1 (50%ETc) y T4 (100%ETc). Los datos mostrados son las medias de cuatro repeticiones por tratamiento y fueron obtenidos empleando contadores volumétricos de agua.

3.2. LECTURAS DE LAS SONDAS CAPACITIVAS

Los datos mostrados en los gráficos 3.3., 3.4., 3.5. y 3.6 y tablas 3.2. y 3.3. son el resultado de interpolar a cada 10 cm. el contenido volumétrico por sensor en los diferentes tubos de medida o sondas. Cada gráfico muestra la evolución de la humedad en cada tratamiento de riego, profundidad y sonda durante todo el periodo estudiado. En el 3.3. y 3.5. se pueden observar los incrementos de humedad en de la zona de raíces provocados por los riegos y su evolución a más largo plazo (acumulación). A su vez, en los gráficos 3.4. y 3.6. se aprecian las entradas en el perfil de suelo considerado de percolación (pérdidas).

La respuesta tan exageradamente rápida de los sensores ante una variación brusca del contenido de humedad tiene diversas explicaciones. La primera, que la frecuencia de toma de datos sea demasiado baja, no obstante, con registro cada diez minutos se observa la misma respuesta. Otra explicación, puede ser que el agua fluya rápidamente por las paredes del tubo de acceso de la sonda por mal contacto con el suelo y dado el pequeño radio de influencia de las EnviroScan su peso en la lectura sea muy alto (Mounzer et al., 2010). Esto suele ocurrir hasta que transcurre cierto tiempo tras la instalación y el suelo se asienta. Se observó con claridad en la sonda P7 del tratamiento 1, donde el 10 de Julio, se decidió realizar una compactación manual del suelo circundante a la sonda, lo que solucionó la rápida infiltración (gráfico 3.7.). No obstante, también se ha observado esta exagerada respuesta en diferentes periodos de la campaña en algunas sondas. Esto se atribuye, como ya se comentó, a que las características del suelo no son totalmente estables en el tiempo, y variaciones rápidas de humedad provocan la expansión o contracción de las arcillas que pueden provocar la aparición de grietas. Sin embargo, esas rápidas exageradas respuestas en ausencia de grietas parecen deberse a la propia física del sensor, a las interacciones electromagnéticas con el suelo (Caton Paltineanu, I., 2010).

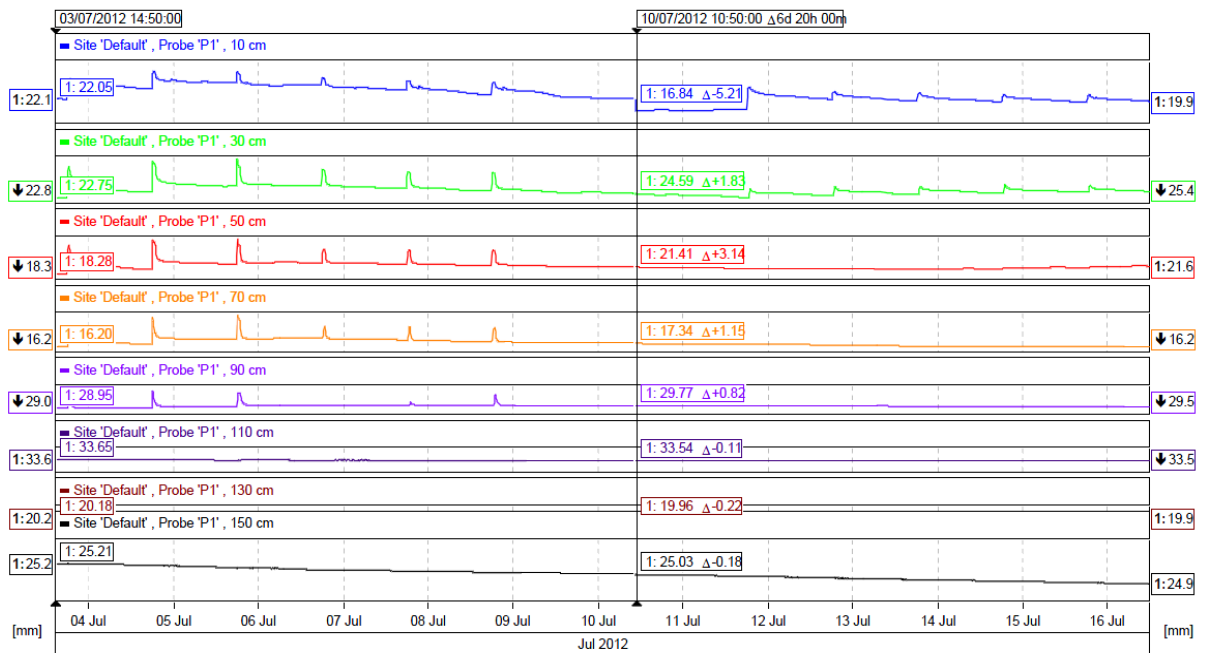


Gráfico 3.7. Sonda P7 pormenorizada por sensores con auto escala en orden descendente (0,1-1,5m) para la observación de la infiltración anterior y posterior al momento de la realización del compactado del terreno (línea vertical en el 10 de Julio).

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los datos semanales del contenido de agua del suelo en mm, por tratamiento y sonda, para la zona de raíces y para la zona de percolación respectivamente.

3.3. INTERPRETACIÓN DE LOS GRÁFICOS DE HUMEDAD DEL SUELO

Independientemente de los valores absolutos de los volúmenes de agua que entran al balance hídrico, en términos relativos los sensores de humedad del suelo aportan provechosa información sobre las tendencias. Analizando gráficamente su evolución se puede detectar la recarga o descarga del perfil de suelo (riego excedentario o deficitario), se puede apreciar la profundidad de infiltración de los riegos, las pérdidas por percolación profunda o incluso la absorción radicular.

Mediante este análisis, por ejemplo, se puede apreciar que riegos de 2 horas durante los días 4 y 5 de Agosto fueron excesivos, pues su infiltración supera la zona de raíces (Gráfico 3.8). O episodios de clara absorción radical, como el mostrado en el gráfico 3.9., donde debido a la ausencia de riego como consecuencia de las precipitaciones de la última semana de agosto, se aprecia la desecación del perfil superior de suelo. Se interpreta que se trata de extracción por parte de la

planta y no infiltración vertical descendente, porque los sensores más profundos permanecen bastante estables y se detecta con claridad una mayor pendiente negativa a medio día solar (cuando la demanda evapotranspirativa es más elevada). Se descarta la influencia de la evaporación directa del suelo o la influencia de la temperatura a profundidades mayores de 0,1 m.

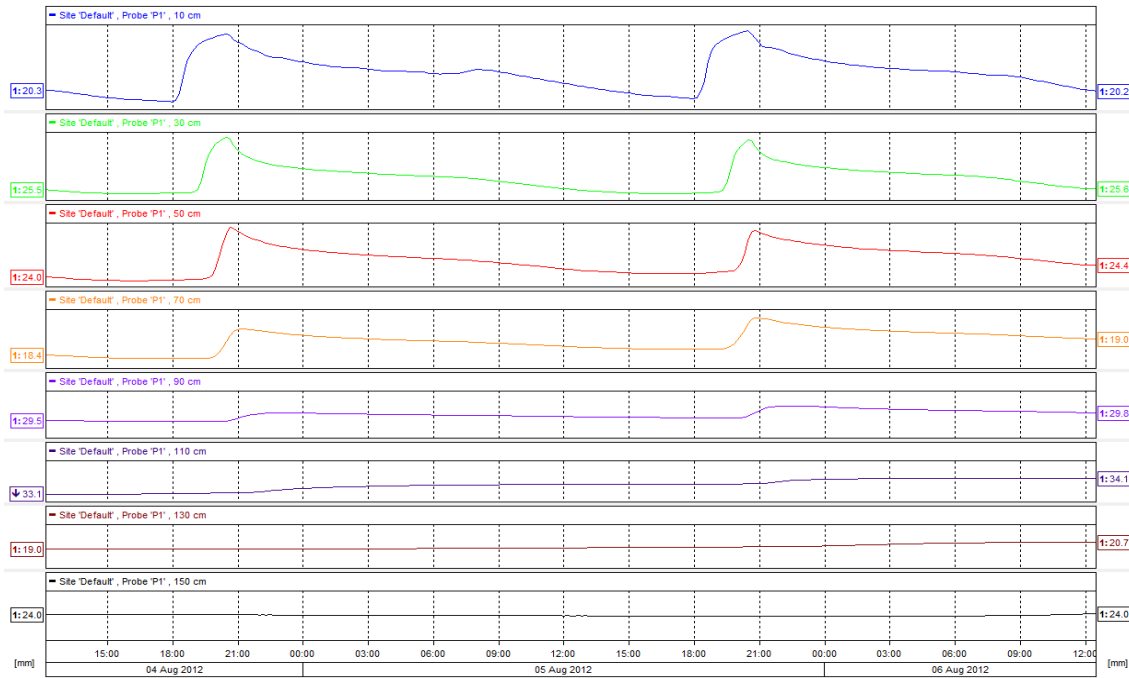


Gráfico 3.8. Evolución de la infiltración de 2 riegos de 4 litros en la sonda P1 del trat. 1

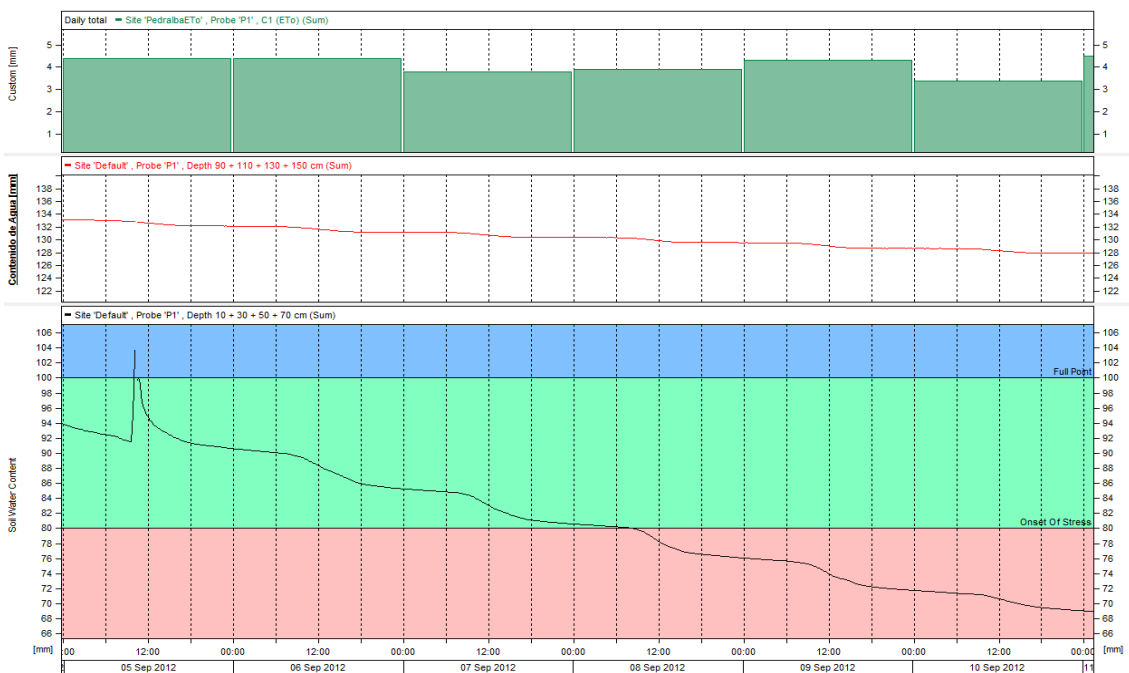


Gráfico 3.9. Diagrama de barras de la ETo diaria, tenue descarga del perfil de suelo en profundidad (línea roja) y desecación por absorción radical en la zona superficial.

De los gráficos 3.3. y 3.5. se puede interpretar de forma general, que los riegos se aprecian con más claridad en la zona superficial del tratamiento T4. Esto era esperable, pues los volúmenes de riego aportados son el doble que en el T1 y por tanto, se perciben a más profundidad y el dato graficado es el sumatorio de la interpolación de sensores. De la comparación de los gráficos 3.4. y 3.6. se deduce que el número de riegos que alcanzan el perfil de suelo más profundo es mucho mayor en el tratamiento regado al 100% de sus necesidades teóricas (T4) que en el del Riego Deficitario Sostenido (T1).

Por último, en los gráficos 3.10. y 3.11. se presentan los gráficos utilizados como criterio de programación del riego. En ellos se puede observar para dos de las sondas la evolución del contenido de agua del suelo en la zona de raíces y en la zona de percolación junto con un diagrama de barras que representan la ETo y otro la precipitación. En el gráfico correspondiente a la zona superficial se pueden observar unas líneas horizontales que señalan la capacidad de campo y un punto de recarga o agotamiento permisible. Entre ellas, en color verde, quedaría delimitado el rango óptimo de humedad del suelo. La capacidad de campo se establece de forma empírica tras un episodio de lluvias o riego que sature el perfil de suelo. Esto se puede observar cuando al graficar la lectura que da un sensor genera una meseta (gráfico 3.12.). Esto significa que la lectura del sensor en esa porción de suelo está en su nivel máximo, esto es que toda la porosidad efectiva del suelo está llena de agua. Y por tanto, por encima de este nivel, el agua drenará gravitacionalmente. Respecto de este límite máximo, se establece un nivel de recarga relativo a él, por debajo del cual la planta no tendría suficiente agua a su disposición y se estresaría hídricamente. Este umbral relativo se estableció en un 30% de recarga para el T1 y un 20% para el T4 (gráficos 3.10. y 3.11.). Estos porcentajes dependen de la sensibilidad del cultivo a la ausencia de humedad en el suelo. Por ser el primer año experimental se establecieron de manera conservadora.

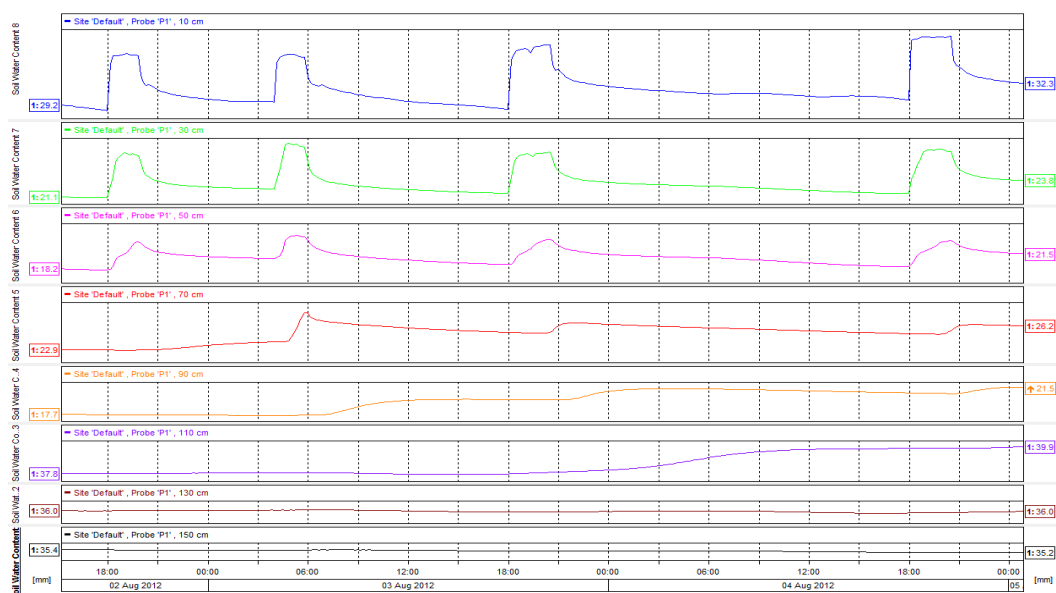


Gráfico 3.12. Sensores cada 20 cm. de la sonda P8, de 10 a 150 cm en orden descendente. Se aprecia que los riegos saturan la zona de 10 y 30 cm. Provocando infiltración a mayor profundidad.

3.4. BALANCE HÍDRICO

Los resultados del cálculo del balance hídrico se muestran en la tabla 3.4. Los datos ahí reflejados muestran por periodo fenológico y tratamiento la suma o el promedio diario, según corresponda.

Periodo	Tratamiento	Precipitación (mm)	ET _o (mm)	Riego (mm)	Percolación (%)	Acumulación (%)	ET _c SP (mm)	ET _c (mm)	K _c SP	K _c	Relación (%)
1	100% ET _o	0	131	9.9	2.0	5.4	9.3	9.3	0.1	0.1	24%
	50% ET _o			8.3	6.4	8.6	7.2	7.2	0.1	0.1	21%
2	100% ET _o	0	129	39.3	3.2	3.6	37.7	37.7	0.3	0.3	12%
	50% ET _o			20.0	8.7	6.6	17.6	17.6	0.1	0.1	24%
3	100% ET _o	3	333	123.1	6.2	-0.6	116.7	116.7	0.4	0.4	15%
	50% ET _o			70.1	5.0	0.7	66.1	66.1	0.2	0.2	33%
4	100% ET _o	29	233	98.7	1.2	-0.4	97.4	122.0	0.4	0.5	14%
	50% ET _o			42.5	2.4	-1.6	41.8	59.7	0.2	0.3	24%
5	100% ET _o	128	73	30.7	1.5	1.1	29.9	141.0	0.4	2.0	12%
	50% ET _o			24.5	6.0	1.6	22.7	122.4	0.3	1.7	18%
TOTAL	100% ET _o	159.7	897.5	301.7	3.2	1.1	290.9	426.6	0.33	0.60	15.3%
	50% ET _o			165.5	5.3	2.3	155.4	273.1	0.19	0.38	25.7%

Tabla 3.4. Resultados del cálculo del balance hídrico por periodo y tratamiento. Los datos mostrados son el resultado del cálculo diario de las variaciones de humedad volumétrica y de las pérdidas por percolación profunda. Para el cálculo de la ET_c y los consiguientes k_c se ha trabajado con datos semanales.

Leyenda:

- *Periodo: Fechas en las que se dividió el análisis de los datos de humedad (Tabla 2.1.)*
- *Tratamiento: Diferenciación entre T1 (50% ETo) y T4 (100% ETo)*
- *Precipitación, en milímetros acumulados por periodo ($l * m^{-2}$)*
- *ETo: Evapotranspiración de referencia acumulada por periodo (mm)*
- *Riego: Caudal acumulado por emisor y periodo (mm), obtenido de las lecturas de los contadores volumétricos*
- *Percolación: Porcentaje promedio semanal del acumulado diario de la percolación profunda detectada por los sensores FRD respecto del riego por emisor más la precipitación efectiva*
- *Acumulación: Porcentaje promedio semanal del acumulado diario de la variación de humedad en la zona de raíces*
- *ETcSP: Sumatorio de la evapotranspiración diaria de las cepas sin considerar la precipitación en el balance (mm)*
- *ETc: Sumatorio de la evapotranspiración diaria de las cepas obtenida de la ecuación de cálculo en el balance 2.6.2. (mm)*
- *KcSP: Coeficiente de cultivo calculado por periodo como $ETcSP/ETo$*
- *Kc: Coeficiente de cultivo calculado por periodo como ETc/ETo*
- *Relación: Cociente entre las entradas al balance estimadas por las sondas capacitivas y las entradas teóricas (riego y precipitación efectiva)*

Del análisis de la tabla 3.4. se puede concluir que la percolación detectada por las sondas del tratamiento de riego deficitario (T1) porcentualmente fue mayor para casi todos los periodos que el detectado por las del T4. No siendo así en valores absolutos, 27,6 mm durante toda la campaña para el T4 frente a 22,6 mm para el T1. No obstante, estas similitudes no eran esperables, puesto que el tratamiento en restricción de riego debería de tener pérdidas del riego mucho menores. Esto pone de manifiesto la importancia de un íntimo contacto del tubo de acceso de la sonda con el suelo, puesto que es esa zona la de mayor influencia en las lecturas.

Respecto al porcentaje de acumulación de humedad en el área de influencia de las sondas, cabe destacar que fue mayor en el T1 que en el T4. Estos resultados a priori parecen ilógicos, pero podrían explicarse por el flujo horizontal del agua en el suelo. Es lógico que tiempos de riego más largos, en un suelo de características bastante uniformes como el de la parcela experimental, generen bulbos húmedos

más anchos. Por ello, estos resultados se interpretan como que la variación de humedad en los bulbos generados por el T4 pueda ser menor que los del T1 porque en los primeros, el volumen de suelo que detecta la sonda esté siempre más próximo a la saturación y por tanto, los volúmenes de agua que puedan entrar, se desplacen horizontalmente, ensanchando el bulbo húmedo. Por el contrario, los tres bulbos húmedos monitoreados del tratamiento de riego deficitario, para los 10 cm. de radio que detectan las sondas, sufren mayores variaciones de humedad para riegos de la mitad del volumen que los del T4.

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo se ha realizado considerando los riegos únicamente (ETcSP) y contemplando los riegos y la precipitación efectiva (ETc). Para la discusión de sus resultados, se compararon los coeficientes de cultivo obtenidos del cálculo del balance hídrico sin precipitación (KcSP) y con ella (Kc) con los realmente aplicados (Tabla 3.5.)

Tratamiento	Aplicado		Estimado		Cociente (estimado/aplicado)	
	KcSP	Kc	KcSP	Kc	KcSP	Kc
T4	0.43	0.51	0.33	0.60	0.775	1.187
T1	0.25	0.36	0.19	0.38	0.768	1.044%

Tabla 3.5. Comparativa de los coeficientes de cultivo realmente aplicados y los estimados y su cociente.

El resultado del cálculo del balance hídrico con la metodología empleada tiende a infraestimar el efecto de los riegos y a sobrestimar el de las precipitaciones. Esto parece deberse a que al no detectarse el bulbo húmedo en su totalidad y la sonda estar ubicada próxima al centro del mismo, va perdiendo sensibilidad en la detección de los riegos debido su flujo lateral cuanto mayor sea el porcentaje de porosidad del suelo relleno de agua. Esta hipótesis explicaría la mejor correlación del coeficiente de cultivo para el T1 que para el T4, tanto sin considerar la precipitación como sobre todo, con ella. Ha de destacarse la buena correlación del Kc con precipitación, donde menos flujo lateral tendría lugar dado que la lluvia moja toda la superficie y por ello los gradientes laterales de humedad tienden a ser menores.

Como confirmación de estas afirmaciones, el análisis de la correlación entre lo estimado por las sondas y las entradas teóricas (medido por los contadores),

muestra que en el T1 las sondas detectan aproximadamente solo el 25,7% de lo que ocurre en el bulbo húmedo, mientras que las del T4 lo hacen en solo un 15,3% de media. La correlación del T1 también es peor en los periodos con lluvias.

3.5. ESTADO HÍDRICO DE LAS CEPAS Y CORRELACIÓN CON LOS DATOS DE LAS SONDA CAPACITIVAS

En el gráfico 3.13. se grafica la evolución del potencial hídrico de tallo para los dos tratamientos estudiados. En general, las cepas regadas al 100% de la ETc (T4) tuvieron un Ψ_{tallo} ligeramente superior a las menos regadas (T1) como era esperable, de acuerdo con los resultados de Rubio (2002) y Yuste (1995). No obstante, no es hasta mediados del mes de Julio que se empiezan a diferenciar. Esto se atribuye a que hasta ese momento, el tratamiento deficitario pueda haber estado aprovechando la reserva de agua del suelo acumulada durante las lluvias del invierno.

En cualquier caso, los niveles más negativos alcanzados en ambos tratamientos no suponen estrés hídrico tratándose de la vid.

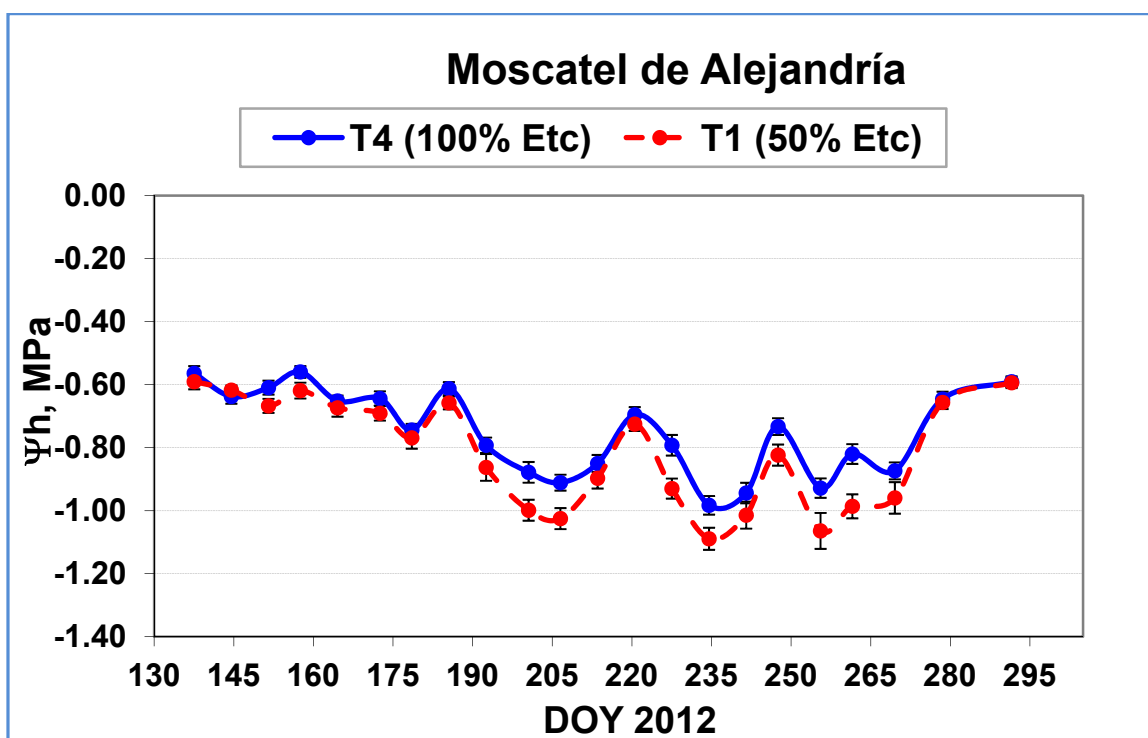


Gráfico 3.13. Evolución del potencial hídrico de tallo durante el ensayo para T1 y T4. Los valores mostrados son las medias de 4 determinaciones por cada repetición y por tratamiento, las barras indican el error estándar.

En el gráfico 3.14. aparecen representadas las medidas de potencial hídrico de tallo de las unidades experimentales donde se monitoreaba la humedad del suelo (T1-1, T1-2, T4-2 y T4-4).

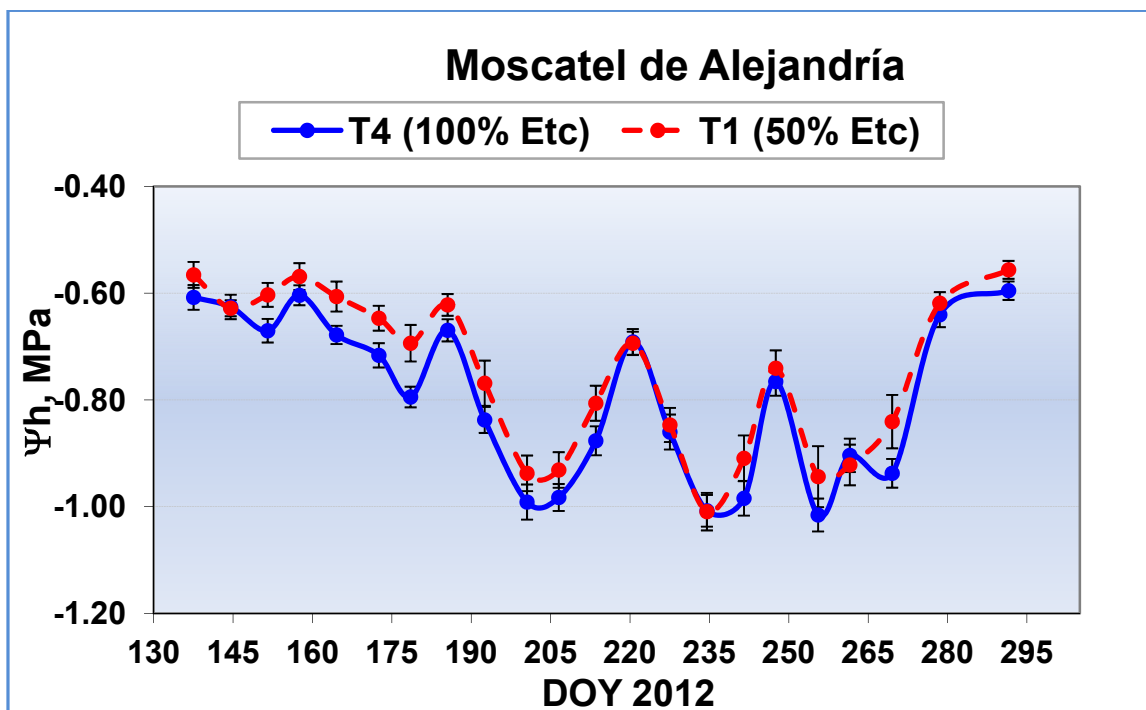


Gráfico 3.14. Evolución del potencial hídrico de tallo durante el ensayo en los T1 y T4 con sondas del tipo FDR. Los valores mostrados son las medias de 8 determinaciones por tratamiento y las barras indican el error estándar.

Los valores de potencial hídrico de tallo de las parcelas experimentales en las que se ubican las sondas muestran diferencias muy leves entre tratamientos y solo en algunas de las semanas de medida. No obstante, cabe destacar que contra todo pronóstico, es el tratamiento menos regado el que presenta un mejor estado hídrico. Esto se puede deber a la variabilidad espacial de la parcela, que como se comentó en el apartado 2.3., tiene un gradiente de menor profundidad de suelo hacia el sur, donde se ubica la sonda P8 del tratamiento 4.

Una vez presentados los datos de potencial hídrico de tallo y su discusión, se presenta su correlación con los datos de humedad de suelo (gráfico 3.15.).

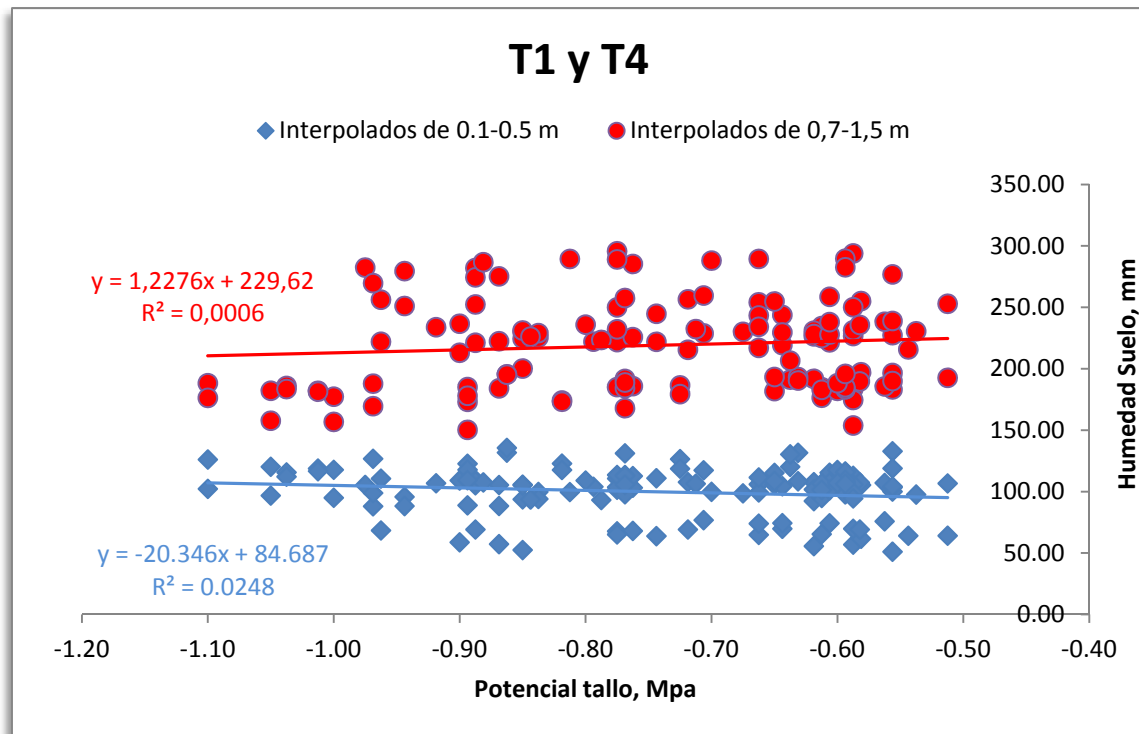


Gráfico 3.15. Relación entre el potencial de tallo y la humedad de suelo de la zona de raíces y de la zona de percolación. Los valores del potencial hídrico de tallo mostrados son promedios por unidad experimental y los datos de humedad de suelo son el resultado del sumatorio de la interpolación por sonda y perfil en el momento de la medición con la cámara de presión.

Como se puede observar, la relación entre ambas variables es prácticamente inexistente y no significativa en ambos tratamientos y en ambas zonas de suelo. Dado la ausencia de relación con los valores absolutos de humedad de suelo, se pensó en la posibilidad de trabajar con valores relativos, como se hizo en la interpretación gráfica para la programación del riego. Es decir, trabajar con datos de humedad relativos al valor máximo que cada sonda hubiese alcanzado durante el periodo de estudio. Este valor máximo no tiene porque corresponder con la supuesta capacidad de campo, pues no en todas las sondas se llegó a saturar el perfil de suelo de raíces.

Los resultados se muestran en el gráfico 3.18. con idéntica discusión. Similares conclusiones se derivaron de un estudio que relacionaba también en viñedo, el estado hídrico con la humedad volumétrica estimada con sensores TDR (Asenjo, J.L. y Yuste, J., 2003).

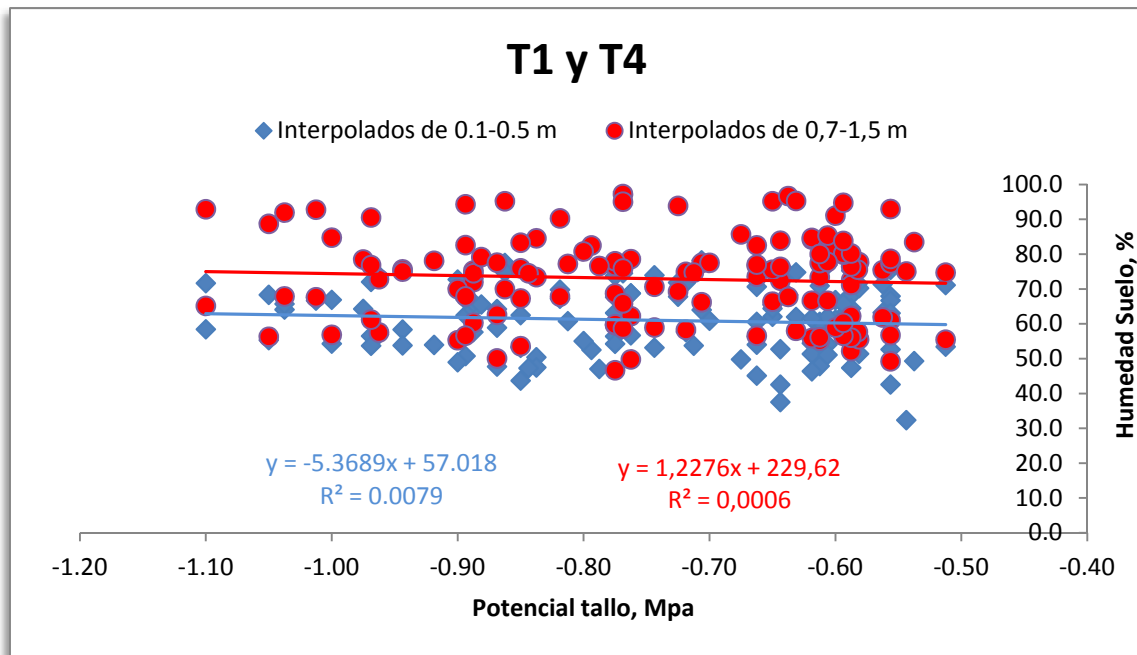
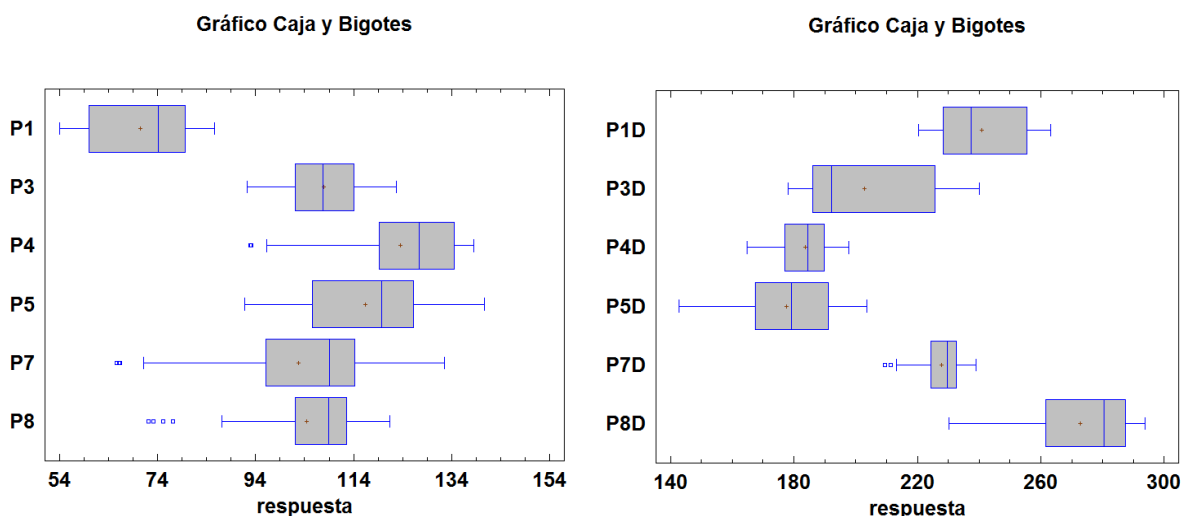


Gráfico 3.18. Relación entre el potencial de tallo y la humedad de suelo relativa de la zona de raíces y de la zona de percolación por tratamiento.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Previo al análisis estadístico, para visualizar el conjunto de los datos se obtuvieron los diagramas de “caja-bigote”. Obtenidos como el promedio semanal de los datos de humedad interpolados de los sensores de cada sonda a sus virtuales a cada 10 cm, diferenciando entre el perfil de suelo con raíces y de la supuesta percolación profunda (Gráficos 3.19. y 3.20.).



Gráficos 3.19 y 3.20. Diagramas de caja de los datos semanales interpolados de humedad de suelo de la zona de raíces (dcha.) y de percolación profunda (izq.).

Inicialmente se comprobó la normalidad de los datos obtenidos mediante los sensores capacitivos y seguidamente se analizaron mediante ANOVA. Utilizando la prueba F de Snedecor y las Pruebas de Rango Múltiple se determinó la significación estadística de las diferencias entre las medias de las distintas sondas, sin hacerse separación entre tratamientos de riego. El análisis se realizó separando los datos más superficiales (0-0,6 m; zona asumida como de raíces) de los de profundidad (0,6-1,5 m; zona asumida como de pérdidas por percolación).

A continuación se muestran los resultados del ANOVA para el perfil de suelo con raíces:

Tabla ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	43324.1	5	8664.83	47.37	0.0000
Intra grupos	27439.9	150	182.932		
Total (Corr.)	70764.0	155			

Tabla 3.8. Cuadro resumen Análisis de la Varianza para la zona de raíces

A continuación se muestran los resultados del ANOVA para el perfil de suelo con raíces:

Tabla ANOVA

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	172694.	5	34538.8	146.05	0.0000
Intra grupos	35472.0	150	236.48		
Total (Corr.)	208166.	155			

Tabla 3.9. Cuadro resumen Análisis de la Varianza para la zona de percolación

Puesto que el valor-P de la prueba F en ambos análisis es menor que 0.05, rechazamos la hipótesis nula de que las medias son iguales. Es decir, que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 6 sondas estudiadas con un nivel del 95.0% de confianza.

Por ello se recurrió a las pruebas de rango múltiple, con la intención de detectar las medias por sonda que difieren entre sí, dado que como era esperable las de las 6

sondas eran diferentes. Los resultados para la zona de raíces se muestran en las Tablas 3.10. y 3.11.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
P1	26	70.5612	X
P7	26	102.786	X
P8	26	104.398	X
P3	26	107.847	X
P5	26	116.327	X
P4	26	123.497	X

Tabla 3.10. Pruebas de rango múltiple para la zona radicular (Método: 95.0 porcentaje LSD)

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P1 - P3	*	-37.2858	7.41209
P1 - P4	*	-52.9354	7.41209
P1 - P5	*	-45.7654	7.41209
P1 - P7	*	-32.2246	7.41209
P1 - P8	*	-33.8369	7.41209
P3 - P4	*	-15.6496	7.41209
P3 - P5	*	-8.47962	7.41209
P3 - P7		5.06115	7.41209
P3 - P8		3.44885	7.41209
P4 - P5		7.17	7.41209
P4 - P7	*	20.7108	7.41209
P4 - P8	*	19.0985	7.41209
P5 - P7	*	13.5408	7.41209
P5 - P8	*	11.9285	7.41209
P7 - P8		-1.61231	7.41209

Tabla 3.11. Resultado de los intervalos LSD para la zona de raíces (* indica una diferencia significativa)

Del resultado del análisis de la significación de las diferencias entre los valores medios de cada sonda para la zona de raíces se extrae que los datos de la sonda P1 difieren de todas las demás, que los de la P7 (tratamiento 1) son similares estadísticamente a los de la P3 y P8 (tratamiento 4) y que entre los de la P5 y P4 tampoco hay diferencias (misma unidad experimental). De lo que se concluye que el comportamiento de las sondas parece tener tanta variabilidad que no se pueden establecer grupos similares por tratamientos.

Los resultados para la zona de percolación profunda se muestran en las Tablas 3.12. y 3.13.

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
P5D	26	177.681	X
P4D	26	183.725	X
P3D	26	202.848	X
P7D	26	227.816	X
P1D	26	240.89	X
P8D	26	272.705	X

Tabla 3.12. Pruebas de rango múltiple para la zona de percolación (Método: 95.0 % LSD)

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
P1D - P3D	*	38.0427	8.42738
P1D - P4D	*	57.1658	8.42738
P1D - P5D	*	63.2096	8.42738
P1D - P7D	*	13.0746	8.42738
P1D - P8D	*	-31.8146	8.42738
P3D - P4D	*	19.1231	8.42738
P3D - P5D	*	25.1669	8.42738
P3D - P7D	*	-24.9681	8.42738
P3D - P8D	*	-69.8573	8.42738
P4D - P5D		6.04385	8.42738
P4D - P7D	*	-44.0912	8.42738
P4D - P8D	*	-88.9804	8.42738
P5D - P7D	*	-50.135	8.42738
P5D - P8D	*	-95.0242	8.42738
P7D - P8D	*	-44.8892	8.42738

Tabla 3.13. Resultado de los intervalos LSD para la zona de percolación (* indica una diferencia significativa)

En este análisis, las únicas sondas que tienen lecturas similares para el perfil de suelo de 0,6 a 1,5 m de profundidad son la P4 y la P5. Ambas dentro de la misma unidad experimental. Sin embargo, difieren de la P7, también del tratamiento de riego deficitario sostenido.

Estos resultados denotan que la variabilidad de las lecturas entre sondas es muy elevada, sobre todo en los sensores de percolación profunda.

A continuación se presentan los datos de la desviación típica de los componentes del balance hídrico (Tabla 3.6.), sus coeficientes de variación (Tabla 3.7.) y sus errores estándar (Tabla 3.12.).

Los valores observados son el promedio por periodo del cálculo la desviación típica diaria.

Periodo	Tratamiento	σ				
		Percolación	Acumulación	ETc SP	ETc	Relación
1	100% ETo	2.1	6.6	1.9	1.9	0.13
	50% ETo	10.1	7.0	1.1	1.1	0.14
2	100% ETo	5.4	4.3	6.1	6.1	0.16
	50% ETo	11.9	6.7	2.8	2.8	0.25
3	100% ETo	4.4	2.6	4.4	4.4	0.08
	50% ETo	6.6	2.0	3.4	3.4	0.16
4	100% ETo	2.1	2.9	5.5	12.0	0.08
	50% ETo	5.6	4.7	3.3	9.7	0.18
5	100% ETo	2.5	1.0	1.0	27.5	0.05
	50% ETo	6.7	2.1	0.6	22.7	0.07
TOTAL	100% ETo	4.0	4.2	6.2	15.6	0.10
	50% ETo	7.9	5.8	3.5	12.5	0.17

Tabla 3.6. Desviación típica de la tabla de resultados del balance hídrico

Periodo	Tratamiento	CV				
		Percolación	Acumulación	ETc SP	ETc	Relación
1	100% ETo	1,01	1,23	0,21	0,21	0,54
	50% ETo	1,57	0,82	0,16	0,16	0,67
2	100% ETo	1,69	1,19	0,16	0,16	1,31
	50% ETo	1,37	1,01	0,16	0,16	1,06
3	100% ETo	0,71	-4,34	0,04	0,04	0,55
	50% ETo	1,33	2,76	0,05	0,05	0,49
4	100% ETo	1,68	-7,52	0,06	0,10	0,58
	50% ETo	2,38	-3,02	0,08	0,16	0,77
5	100% ETo	1,70	0,95	0,03	0,19	0,42
	50% ETo	1,11	1,34	0,02	0,19	0,39
TOTAL	100% ETo	1,27	3,74	0,02	0,04	0,67
	50% ETo	1,51	2,52	0,02	0,05	0,68

Tabla 3.7. Coeficiente de variación de la tabla de resultados del balance hídrico

Periodo	Tratamiento	Error Estándar				
		Percolación	Acumulación	ETc SP	ETc	Relación
1	100% ETo	0,40	1,26	0,37	0,37	0,02
	50% ETo	1,95	1,35	0,22	0,22	0,03
2	100% ETo	1,22	0,96	1,37	1,37	0,04
	50% ETo	2,66	1,51	0,62	0,62	0,06
3	100% ETo	0,59	0,35	0,59	0,59	0,01
	50% ETo	0,90	0,27	0,46	0,46	0,02
4	100% ETo	0,30	0,42	0,79	1,73	0,01
	50% ETo	0,81	0,68	0,47	1,40	0,03
5	100% ETo	0,47	0,20	0,19	5,29	0,01
	50% ETo	1,28	0,41	0,11	4,36	0,01
TOTAL	100% ETo	0,30	0,31	0,46	1,16	0,01
	50% ETo	0,59	0,43	0,26	0,93	0,01

Tabla 3.14. Error estándar de la tabla de resultados del balance hídrico

En general, la desviación típica entre sondas dentro de un mismo tratamiento, tanto de la percolación como para la acumulación, al igual que coeficiente de variación, son muy elevados. Lo que denota una muy elevada variabilidad espacial entre las lecturas de las sondas dentro de un mismo tratamiento de riego. Sin embargo, la dispersión de los parámetros resultado del cálculo del balance hídrico, como son la ETc y ETcSP, es mucho menor por intervenir factores de mayor peso como los riegos y la precipitación efectiva. El error estándar por el contrario es relativamente pequeño, puesto que la desviación estándar se calculó diariamente, y por lo tanto, el número de observaciones de la muestra es bastante grande para cada periodo. El periodo con mayor error debido a la estimación de la media del parámetro a partir de las medias del cálculo individual de cada sonda para el correspondiente parámetro es el periodo 2, de 21 días.

Es importante destacar, la elevada influencia que la precipitación tiene sobre la variabilidad o dispersión de las lecturas de humedad del suelo entre sondas (Tabla 3.6.). Esto se puede apreciar con claridad mediante la comparación de desviación típica de la ETcSP con la de la ETc, que en los periodos 4 y sobre todo en el 5, donde llovió más se incrementa considerablemente. El coeficiente de variación para esos periodos también muestra esa influencia (Tabla 3.7.). Se aprecia también una mayor dispersión al principio de la campaña, más visible en la evolución de la

ETc sin precipitación, lo que podría explicarse por el mal contacto con el suelo tras la instalación de las sondas. Aspecto que mejora a partir del tercer periodo, supuestamente por al asentamiento del suelo. El error estándar (Tabla 3.12.), también empeora considerablemente con la inclusión de la precipitación en el balance, no así el de la relación entre lo detectado por las sondas y lo realmente aplicado.

Capítulo 4

CONCLUSIONES

El estudio de la determinación del estado hídrico del suelo mediante sensores FDR en vid regada por goteo es parte de un proyecto más amplio en el que se pretende evaluar durante varias campañas los efectos de distintos regímenes hídricos sobre la producción y la composición de la uva en la variedad Moscatel de Alejandría. Los resultados aquí mostrados nacen de la necesidad de conocer la fiabilidad, en las condiciones de cultivo del ensayo, de las medidas de los sensores capacitivos sin calibración específica del suelo, ya que su interpretación gráfica se estaba utilizando como herramienta de programación del riego. A su vez, interesaba determinar la relación entre el contenido volumétrico de agua en el suelo detectado por este tipo de sensores y el estado hídrico de las cepas.

Como se expuso en el apartado 3.3., mediante la combinación de la información de la demanda evaporativa de la atmósfera y la evolución del contenido de humedad del suelo es posible desarrollar una programación del riego (dosificación, duración y frecuencia del riego) con un elevado grado de eficiencia. De lo que se puede concluir que los sensores del tipo FDR pueden ser una herramienta muy útil para la programación del riego si se estudian las tendencias y variaciones de humedad relativas.

Sin embargo, la utilización de las sondas EnviroScan para el cálculo del balance hídrico de un viñedo en las condiciones agronómicas de nuestra parcela experimental ha mostrado gran variabilidad entre sondas y por ello una baja precisión. Así dado que el radio de influencia de los sensores es de solo 10 cm, con 2 goteros de 4 l/h por planta, dejan mucho porcentaje de bulbo húmedo sin monitorear. Nuestros cálculos estiman esta parte no monitoreada en un 84,7 % para el T4 y un 74,3% en el T1. Por lo tanto, se puede concluir que independientemente del error con que los sensores del tipo FDR determinan los valores absolutos de humedad del suelo, por si solos, no son una herramienta fiable para el cálculo de balances hídricos.

No obstante, si se consiguiera determinar con cierta precisión las dimensiones reales del bulbo húmedo, se podría extrapolar la lectura de las sondas a ese volumen de suelo con una metodología similar a la que se ha desarrollado en este trabajo; extrapolando los porcentajes de percolación y acumulación respecto de la

lluvia al 125% del área sombreada o a los volúmenes de riego medidos con contadores volumétricos.

Respecto a las mediciones del estado hídrico de las cepas, se observó que la aportación de riego deficitaria en un 50% de la ETc permitió mantener un estado hídrico adecuado.

Asumiendo que las determinaciones del potencial hídrico de tallo a medio día solar son un buen indicador del estado hídrico de las cepas, de la elevada variabilidad espacial observada en sus medidas se advierte que el riego es solo uno de los factores que influyen sobre el estado hídrico de las cepas. Y en última instancia, es éste el determinante de la producción y composición de la uva y no el riego en sí. Aquí radica la importancia de encontrar un indicador que se correlacione bien con ella. Por desgracia, el contenido de humedad de suelo apenas aporta información sobre el estado hídrico de la planta, tanto con valores absolutos como relativos.

A este respecto, y como sugerencia de una posible futura línea de investigación, hay autores que han conseguido mejores correlaciones con el potencial hídrico de base (Ψ_{aa}). Esto es debido a que, teóricamente, la cepa al cerrar los estomas durante la noche cesa su transpiración y se rehidrata en función del contenido de humedad del suelo (Asenjo, J.L. y Yuste, J., 2003).

Capítulo 5

BIBLIOGRAFÍA

- Albuquerque Regina, M., 1993. Réponses des cépages de *Vitis vinifera* L. aux variations de l'environnement: effets de la contrainte hydrique sur la photosynthèse, la photorespiration et la teneur en acide abscisique des feuilles. Thèse Université de Bordeaux.
- Allen, R.; Pereira, L.; Raes, D. y Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, 56. FAO
- Allen, RG; Pereira, LS, Raes; D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO: Irrigation and Drainage paper No 56, Rome, Italy
- Arauzo, M.; Díez, J.A. y Hernáiz, P., 2005. Observaciones a escala horaria del contenido de agua en la zona no saturada mediante el uso de sensores de capacitancia. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VII. F.J. Samper Calvete y A, Paz González.
- Barceló, J.; G. Nicolas; B. Sabater y Sánchez, R., 1987. Fisiología Vegetal. Ed. Pirámide. Madrid.
- Bonet, L.; Ferrer, P.; Castel, J. R. and D. S. Intrigliolo, 2010. Soil capacitance sensors and stem dendrometers. Useful tools for irrigation scheduling of commercial orchards, Spanish Journal of Agricultural Research: 8 Special Issue: 2 : S52-S65
- Caton Paltineanu, I., 2010. Real-time Soil Water Dynamics Using Capacitance, Impedance and TDT – A Global View, Third International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance, Impedance and TDT, 2010, Murcia, Spain
- Chaves, M.M., 2007. Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. *Sci. Hortic.* 112:321-330.
- Esteban, M.A.; Villanueva, M.J. y Lissarrague, J.R. , 2002. Relationships between different berry components in Tempranillo (*Vitis vinifera* L.) grapevines from irrigated and non-irrigated vines during ripening. *L. Sci. Food Agr.* 82: 1136-1146. (1-11).

- Evett, S.R.; Schwartz, R.C.; Casanova, J.J.; Heng, L.K., 2012. Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management* 104, 1-9.
- Fares, A.; Polyakov, V., 2006. Advances in Crop Water Management Using Capacitive Water Sensors, In: Donald, L.S. (Ed.), *Advances in Agronomy*. Academic Press, pp. 43-77.
- García Escudero, E.; Santamaria, P.; López, R. y Palacios, I, 1991. Aplicación de dosis moderadas de agua en el proceso de maduración del cv. "Tempranillo" en Rioja. *Vitivinicultura*; 1991-1: 30-34.
- García-Escudero, E.; López, R.; Santamaría, P. y Zaballa, O., 1997. Ensayos de riego localizado en viñedos productivos de cv. Tempranillo. *Viticultura/Enología Profesional* 50: 35-47.
- Gasque, M.; González Altozano, P.; Granero, B.; Martí, P.; Turegano Pastor, J. V., 2011. Sondas de humedad FDR como herramienta de apoyo en la programación de riego. *Agricultura: revista agropecuaria*, Año LXXX, núm. 941, pág. 396 - 400
- Girona, J.; Marsal, J.; Mata, M.; Del Campo, J.; Basile, B., 2009. Phenological sensitivity of berry growth and composition of Tempranillo grapevines (*Vitis vinifera* L.) to water stress. *Aust. J. Grape Wine Res.* 15:268-277.
- Hera-Orts, M.L. de la; Martínez-Cutillas, A.; López-Roca, J.M. and Gómez-Plaza, E., 2004. Effects of moderate irrigation on vegetative growth and productive parameters of Monastrell vines grown in semiarid conditions. *Span J Agric Res*; 2 (2): 273-81.
- Hidalgo, J., 2006. *La Calidad del Vino desde el Viñedo*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Hidalgo, J.; Pastor, M. y Hidalgo, J.C, 2003. Evolución de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI*. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero.

- Intrigliolo, D.S. y Castel, J.R., 2007^a. Efectos del riego sobre la producción y calidad del vino en la vid cv. Tempranillo en Utiel-Requena. *Agrícola Vergel*. Mayo 2007. 265-269.
- Intrigliolo, D.S.; Pérez; D., Risco; D., Yeves; A. y Castel; J.R., 2012. Yield components and grape composition responses to seasonal water deficits in Tempranillo grapevines. *Irr Sci*; 30: 339-49.
- Kennedy, J.A.; Matthews, M.A. y Waterhouse, A.L., 2000. Changes in grape seed polyphenols during fruit ripening. *Phytochemistry* 55, 77-85.
- Mounzer, O.; Abrisqueta, J.M.; Ruiz-Sánchez, M.C and Vera, J., 2010. Zone of influence of two FDR Capacitance Sensors used to measure Soil Water Content, Third International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance, Impedance and TDT, Murcia, Spain.
- Nadal, M. y Arola, L, 1997. Efecto de la aplicación de distintas dosis de riego sobre el crecimiento, composición de la uva y del vino en *V. vinifera* Cabernet-Sauvignon. *Riegos y Drenajes*; XXI (96): 25-30.
- Ortega Casamayor, J., 2010. Estudio de distintas estrategias de riego deficitario en *Vitis vinífera* L. cv. Cabernet Sauvignon. Trabajo de fin de carrera. Departamento de Producción Vegetal. Universidad Politécnica de Valencia.
- Rubio, J.A., 2002. Riego y aclareo de racimos: Efectos en la actividad fisiológica, en el control de rendimiento y en la calidad de la uva del cv. Tempranillo (*Vitis vinifera* L.). Tesis doctoral. Departamento de Producción Vegetal: Fitotecnia. Universidad Politécnica de Madrid. 206-235.
- Ruiz-Sánchez, M.C.; Domingo, R. and Castel, J.R., 2010. Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. *Span. J. Agr. Res.* 8:S5-S20.
- Salón, J.L.; Chirivella, C. y Castel, J.R., 2005. Response of cv. Bobal to timing of deficit irrigation in Requena, Spain: Water relations, yield, and wine quality. *American Journal of Enology and Viticulture* 56: 1-8.

- Scholander, P.F.; H.T. Hammel, E.A.; Hemmingsen, E.D., 1964. Bradstreet. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 52: 119-125.
- Sellés, V.G.; Ferreyra, E.R. y Maldonado, B.P., 2002. Instrumento para controlar el riego midiendo el estado hídrico de las plantas. INIA 1-7.
- Sevi, 2011. Mercado de vinos. La semana vitivinícola. 3339:178-189.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38, 55-94.
- Turner, N.C., 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant and Soil 58: 339-366.
- Vaux, H.J. and Pruitt, W.O., 1983. Crop-water production functions. Adv. Irr. 2: 61-99.
- Williams, L.E. and Matthews, M.A., 1990. Grapevine. In Irrigation of agricultural crops, Agronomy Monograph no. 30. B.A. Stewart and D.R. Nielsen (eds) pp. 1019-1055. ASA-CSSA-SSSA Madison, WI, USA.
- Williams, L.E. y J.E. Ayars, 2005. Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. Agricultural and Forest Meteorology 132: 201-211.
- Williams, L.E.; Matthews, M.A., 1990. Grapevine. In Irrigation of agricultural crops, Agronomy Monograph no. 30. B.A. Stewart and D.R. Nielsen (eds) pp. 1019-1055. ASA-CSSA-SSSA Madison, WI, USA.
- Yañez-Barrau, F.; Duque-Martínez, M.C. y Bravo de Mingo, J., 1996. Riego localizado en viñedo. Vitivinicultura: 7-11.
- Yuste, J.; Rubio, J.A.; Baeza, P. y Lissarrague, J.R., 1997. Aclareo de racimos y régimen hídrico: Efectos en la producción, el desarrollo vegetativo y la calidad del mosto de la variedad Tempranillo conducida en vaso. Vitic Enol Prof; 51: 28-35.
- Yuste, J.; Soldevilla, A.J.; Ruiz, C. y Lissarrague J.R., 1993. Consecuencias del nivel de poda y del riego en el estado hídrico, la producción y el desarrollo vegetativo en vides de la Ribera del Duero. XI Jornadas Técnicas sobre Riegos. Valladolid (España).

Referencias electrónicas:

- <http://faostat.fao.org/> (Agosto 2013)
- <http://sig.mapa.es/geoportal/> (Agosto 2013)
- <http://www.marm.es/> (Agosto 2013)
- <http://riegos.ivia.es/> (Agosto 2013)
- <http://www.sentek.com.au/home/default.asp> (Febrero 2013)

Anexo I

GRÁFICAS

Sondas T1 (zona de raíces)

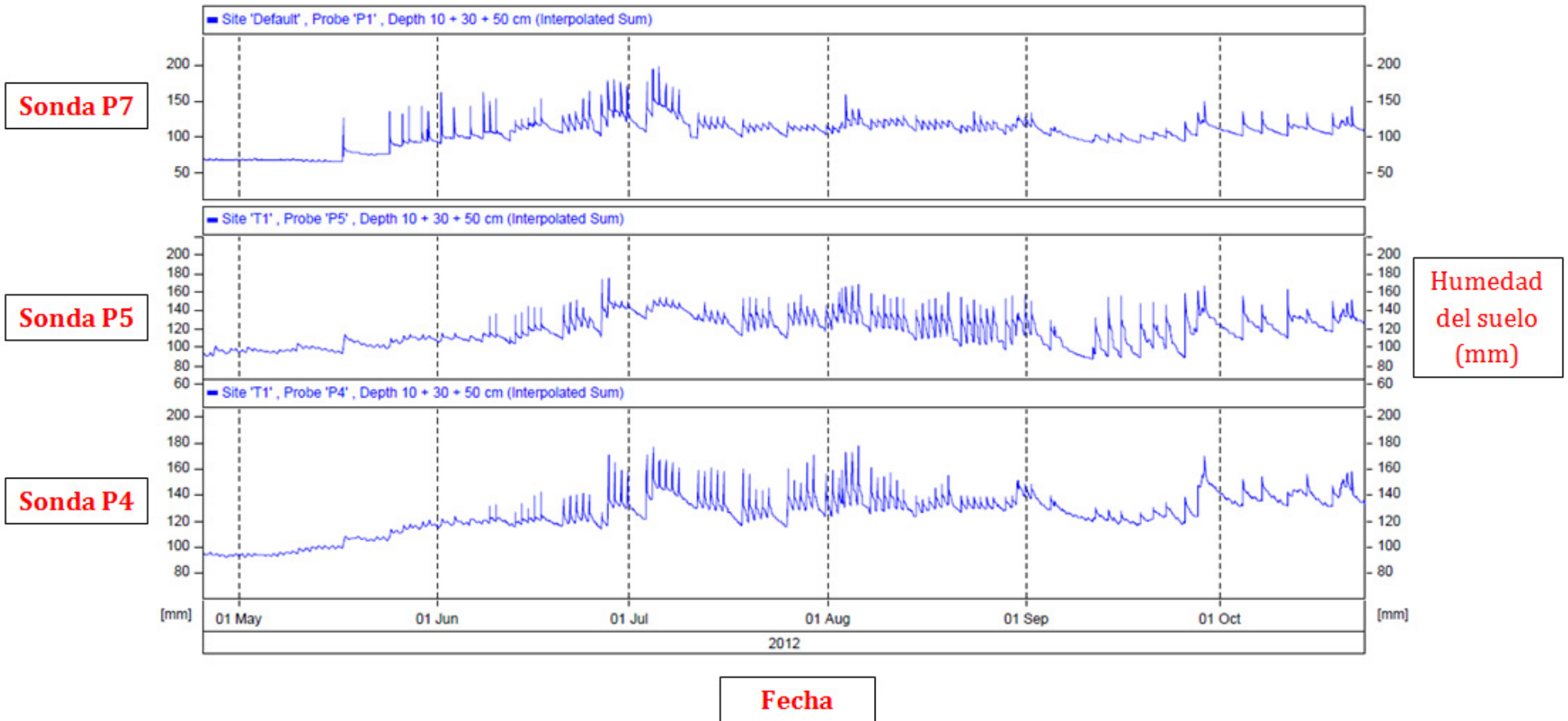


Gráfico 3.3. Evolución de la humedad del suelo de la zona de raíces en mm durante el periodo de estudio de las sondas P4, P5 y P7 del tratamiento 1.

Sondas T1 (zona de percolación)

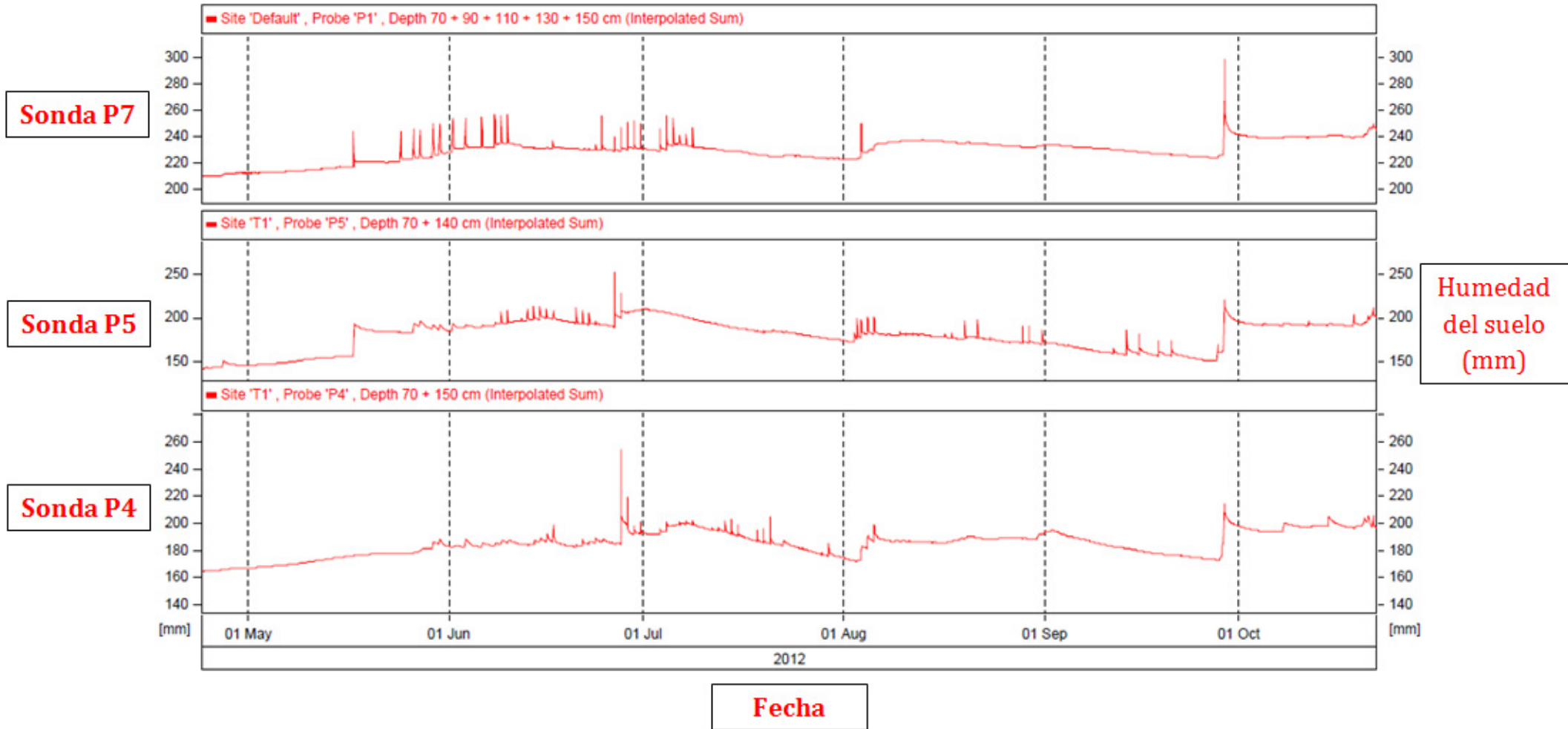


Gráfico 3.4. Evolución de la humedad del suelo de la zona de percolación en mm durante el periodo de estudio de las sondas P4, P5 y P7 del tratamiento 1

Sondas T4 (zona de raíces)

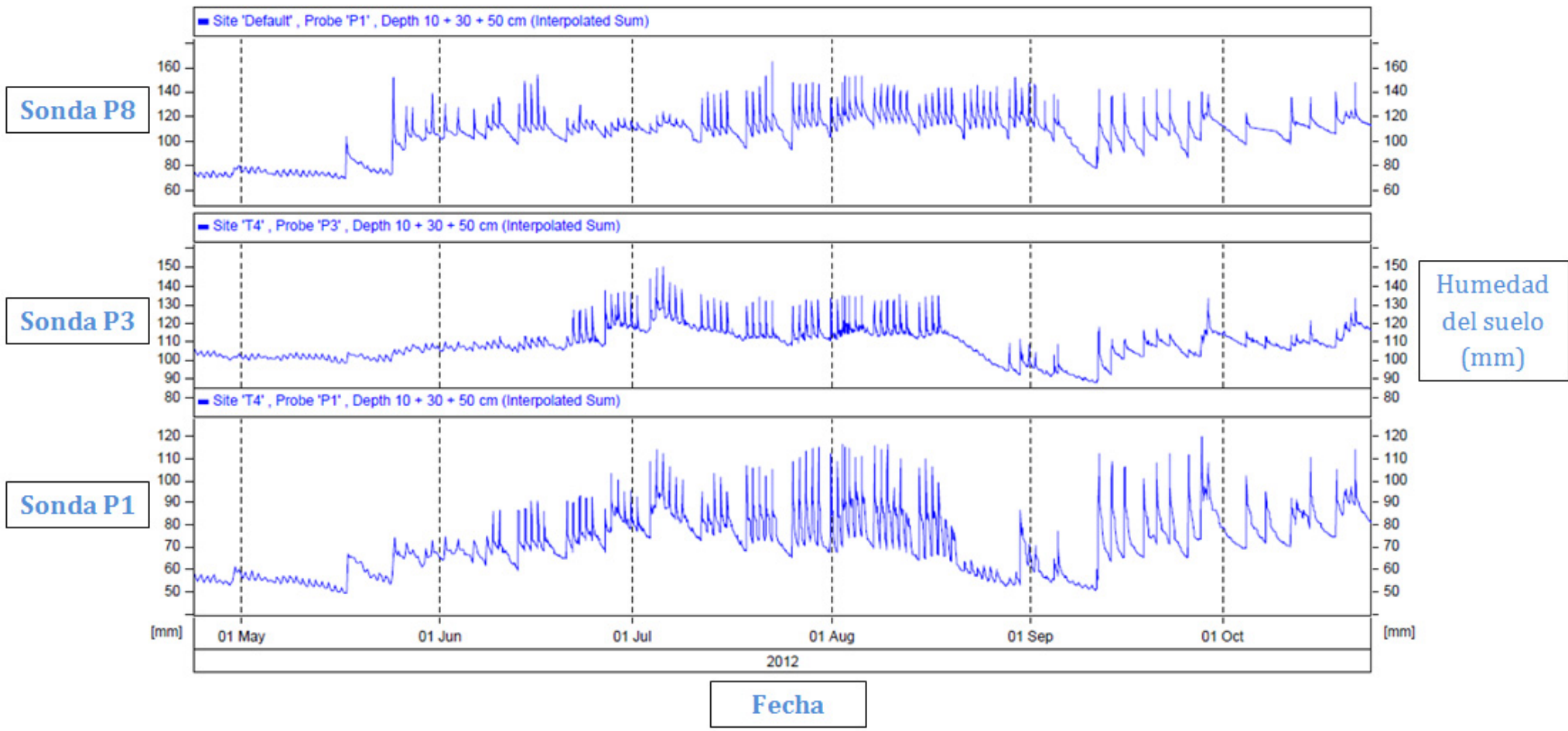


Gráfico 3.5. Evolución de la humedad del suelo de la zona de raíces en mm durante el periodo de estudio de las sondas P1, P3 y P8 del tratamiento 4.

Sondas T4 (zona de percolación)

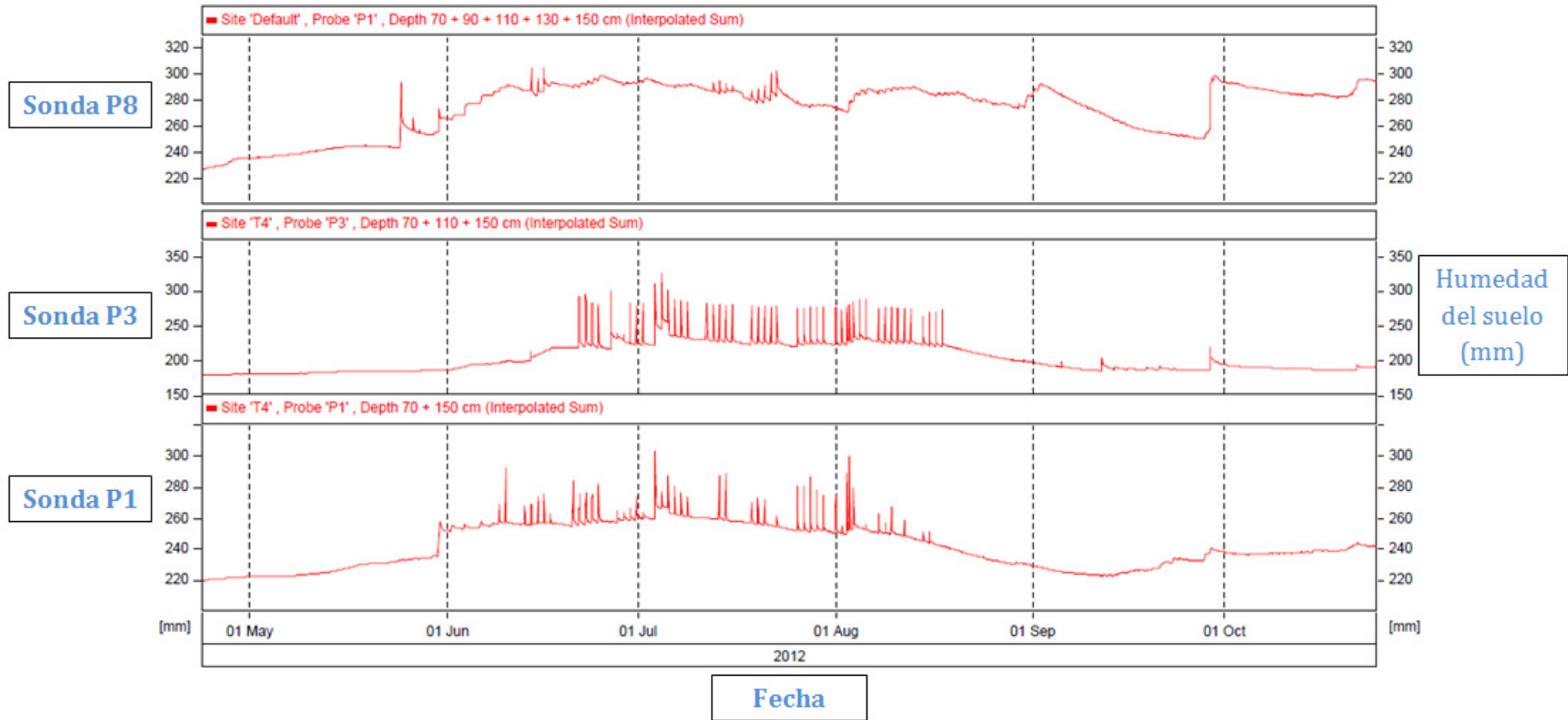


Gráfico 3.6. Evolución de la humedad del suelo de la zona de percolación en mm durante el periodo de estudio de las sondas P1, P3 y P8 del tratamiento 4.

T4 - P8

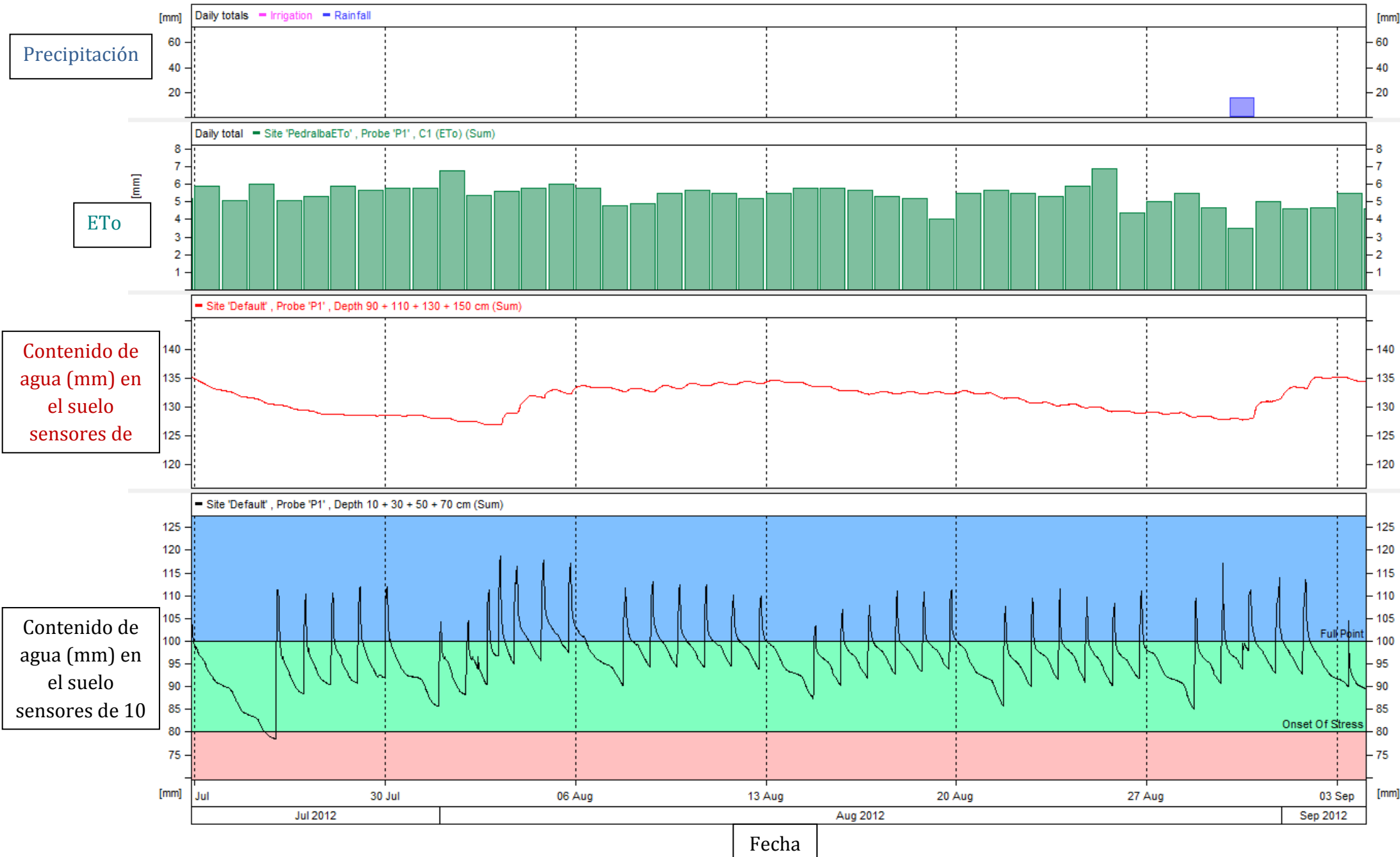


Gráfico 3.10. Evolución del contenido de agua del suelo para la sonda P8 del tratamiento 4 en la zona de raíces, en la zona de percolación, ETo y precipitación

T1 - P7

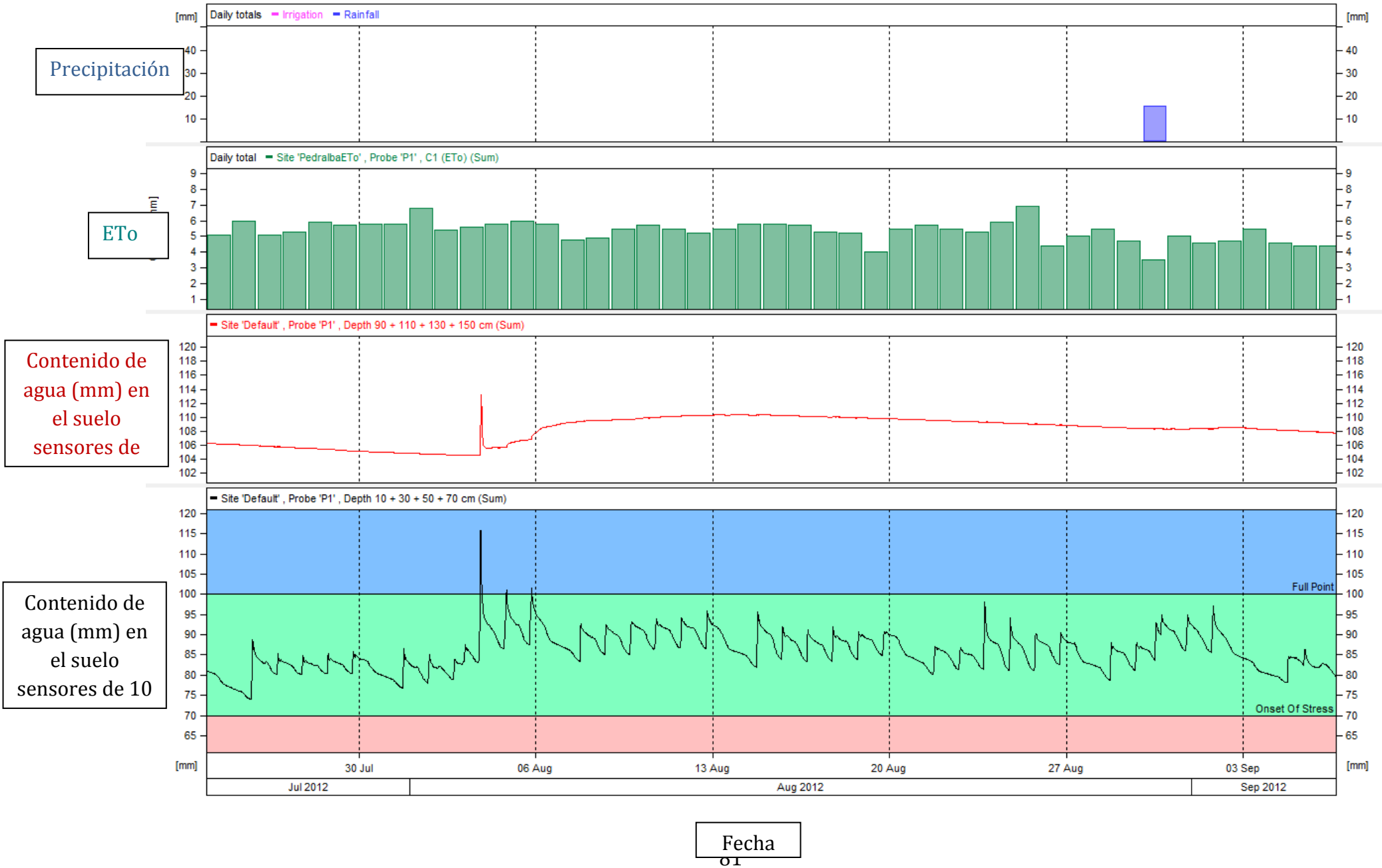


Gráfico 3.11. Evolución del contenido de agua del suelo para la sonda P7 del tratamiento 1 en la zona de raíces, en la zona de percolación, ETo y precipitación

Anexo II

TABLAS

DATOS ZONA DE RAÍCES (mm)								
SEMANA	Fecha inicial	Fecha final	T1 (50% ETc)			T4 (100% ETc)		
			P4	P5	P7	P1	P3	P8
1	23/04/2012	30/04/2012	93.14	91.86	66.14	54.86	102.43	72.14
2	01/05/2012	08/05/2012	93.00	95.14	66.29	56.00	100.86	75.14
3	09/05/2012	16/05/2012	96.29	96.43	65.71	54.00	101.29	73.14
4	17/05/2012	24/05/2012	102.57	99.71	71.14	56.57	100.86	77.14
5	25/05/2012	01/06/2012	108.43	102.00	82.29	61.14	102.14	87.14
6	02/06/2012	09/06/2012	116.43	108.86	96.14	66.57	106.00	106.00
7	10/06/2012	17/06/2012	119.14	109.71	103.14	68.43	107.29	108.86
8	18/06/2012	25/06/2012	120.00	113.14	111.43	70.00	108.00	110.29
9	26/06/2012	03/07/2012	120.43	120.29	114.14	72.57	109.86	107.86
10	04/07/2012	11/07/2012	127.14	135.14	124.57	79.57	117.86	109.29
11	12/07/2012	19/07/2012	138.57	140.71	132.43	85.57	122.71	111.57
12	20/07/2012	27/07/2012	133.43	134.71	113.14	80.00	117.71	109.00
13	28/07/2012	04/08/2012	125.43	125.57	110.29	78.71	114.00	110.86
14	05/08/2012	12/08/2012	129.29	127.00	109.71	76.14	112.57	112.57
15	13/08/2012	20/08/2012	136.00	131.43	114.29	82.43	116.43	120.71
16	21/08/2012	28/08/2012	134.29	130.43	118.29	80.71	116.00	121.43
17	29/08/2012	05/09/2012	131.86	123.14	115.71	75.71	114.86	118.29
18	06/09/2012	13/09/2012	131.71	119.29	113.14	59.29	104.57	117.43
19	14/09/2012	21/09/2012	136.43	120.00	114.86	60.00	96.29	117.57
20	22/09/2012	29/09/2012	127.43	105.57	102.29	55.43	92.29	102.14
21	30/09/2012	07/10/2012	121.29	99.00	95.43	69.29	98.00	98.43
22	08/10/2012	15/10/2012	122.29	107.86	98.71	76.57	107.57	106.71
23	16/10/2012	23/10/2012	134.57	118.57	108.29	81.14	108.57	108.71
24	24/10/2012	31/10/2012	137.14	121.29	108.00	76.00	110.00	106.00
25	01/11/2012	08/11/2012	136.75	121.50	107.00	75.75	107.00	111.50
26	09/11/2012	16/11/2012	137.86	126.14	109.86	82.14	108.86	114.43

Tabla 3.2. Datos semanales del contenido de agua del suelo (mm) de la zona de raíces por tratamiento y sonda. Los datos mostrados son el resultado de la interpolación de los datos de los sensores de 0,1 a 0,5 m de cada sonda

DATOS ZONA DE PERCOLACIÓN (mm)								
SEMANA	Fecha inicial	Fecha final	T1 (50% ETc)			T4 (100% ETc)		
			P4	P5	P7	P1	P3	P8
1	23/04/2012	30/04/2012	164.71	142.86	209.43	220.29	178.00	230.29
2	01/05/2012	08/05/2012	166.86	144.71	211.43	222.00	179.29	235.86
3	09/05/2012	16/05/2012	170.57	150.71	213.29	223.29	181.00	239.71
4	17/05/2012	24/05/2012	175.00	170.14	217.86	228.14	183.43	243.71
5	25/05/2012	01/06/2012	176.71	184.00	220.86	231.71	184.00	250.57
6	02/06/2012	09/06/2012	182.57	187.86	227.43	245.57	186.14	261.57
7	10/06/2012	17/06/2012	184.00	190.86	232.71	255.57	194.29	282.71
8	18/06/2012	25/06/2012	185.00	197.86	231.00	256.71	204.71	288.71
9	26/06/2012	03/07/2012	183.86	193.43	229.57	257.57	223.43	291.71
10	04/07/2012	11/07/2012	190.86	202.29	229.71	258.57	226.86	293.71
11	12/07/2012	19/07/2012	195.57	203.57	231.57	263.29	240.14	291.71
12	20/07/2012	27/07/2012	193.86	191.71	229.14	259.43	231.43	287.71
13	28/07/2012	04/08/2012	186.29	183.86	225.00	256.29	227.57	282.29
14	05/08/2012	12/08/2012	179.43	178.57	223.57	253.00	225.71	278.29
15	13/08/2012	20/08/2012	177.00	176.57	224.29	253.00	231.86	277.29
16	21/08/2012	28/08/2012	186.43	179.71	235.00	249.57	230.14	287.29
17	29/08/2012	05/09/2012	185.57	176.71	235.14	242.86	223.29	285.14
18	06/09/2012	13/09/2012	188.00	174.14	233.14	234.86	209.14	279.71
19	14/09/2012	21/09/2012	189.71	170.29	231.86	229.29	197.86	280.14
20	22/09/2012	29/09/2012	187.71	164.00	231.00	224.71	189.00	281.00
21	30/09/2012	07/10/2012	180.71	158.71	228.14	223.29	187.43	265.29
22	08/10/2012	15/10/2012	175.71	156.14	225.29	228.43	186.43	255.00
23	16/10/2012	23/10/2012	182.14	167.43	230.57	234.71	189.00	264.71
24	24/10/2012	31/10/2012	193.86	191.43	238.57	236.29	190.00	289.14
25	01/11/2012	08/11/2012	197.00	191.00	238.50	237.00	187.75	283.50
26	09/11/2012	16/11/2012	197.71	191.14	239.14	237.71	186.14	283.57

Tabla 3.3. Datos semanales del contenido de agua del suelo (mm) de la zona de percolación por tratamiento y sonda. Los datos mostrados son el resultado de la interpolación de los datos de los sensores de 0,7 a 1,5 m de cada sonda.

