

AVANCES RECIENTES EN LA PROGRAMACIÓN DE LOS RIEGOS

Elías Fereres.¹
David A. Goldhamer.²

Resumen:

Se describe el estado actual de las distintas técnicas de programación de riegos, poniendo el énfasis en las aplicaciones de una nueva generación de sensores de humedad de suelo y de detección de estrés en planta, recientemente desarrollados. Se muestran ejemplos en los que el registro continuo de la humedad volumétrica del suelo a varias profundidades permite detectar de forma casi inmediata una dosis de riego insuficiente. La detección precoz del estrés en el propio cultivo, ya sea por teledetección o por medidas directas o indirectas en el mismo, debe conducir a manejar el riego con un elevado nivel de precisión y a modular las aplicaciones de agua para optimizar el riego. Entre todos los indicadores de estrés en planta existentes, se apunta que las medidas de contracción de tronco pueden estar entre las más sensibles a cambios en el estado hídrico del árbol. Se presentan casos donde las oscilaciones en el diámetro de los troncos pueden servir para programar los riegos de forma automática. Finalmente, se insiste en la necesidad de integrar estas nuevas técnicas en un enfoque mucho más amplio de manejo del riego, de manera que pueda generalizarse su uso.

Palabras clave: riegos, programación, sensor de humedad, estado hídrico.

Introducción

Se entiende por programación de riegos el proceso que utiliza un conjunto de técnicas para predecir la fecha y dotación de los riegos. La determinación de los momentos y dosis de riego es un proceso de toma de decisiones que habitualmente se ha basado en la experiencia previa y no en procedimientos técnicos. Sin embargo, en la medida en que la conservación del agua de riego pasa a ser un objetivo relevante en el manejo de una explotación de regadío, la necesidad de disponer de información precisa que permita programar los riegos se hace más patente.

Existen numerosos métodos de programación de riegos pero todos ellos se han agrupado tradicionalmente en dos enfoques; uno, basado en monitorizar el estado hídrico del suelo y/o de la planta. El otro consiste en considerar el suelo como un almacén de agua y cuantificar el balance hídrico del suelo para estimar el nivel de agotamiento permisible. En ambos enfoques se viene

investigando desde hace más de 50 años y se han desarrollado y perfeccionado muchas técnicas que se resumen en las revisiones de Heerman et. al. (1990) y de Martin et. al. (1990).

A pesar del amplio arsenal de técnicas disponibles para programar los riegos, es necesario reconocer de partida que, después de décadas de esfuerzos en investigación y difusión de dichas técnicas, la adopción de estas tecnologías por los usuarios ha sido muy limitada en la mayoría de los regadíos. Es importante hacer esta primera consideración para poder enfrentarse con realismo a un problema que muchas veces está más relacionado con las percepciones del agricultor que con el nivel tecnológico disponible. Ni que decir tiene que esta situación ha de cambiar y que el manejo del agua de riego debería tecnificarse al nivel máximo posible por los problemas que se mencionan a continuación.

¹ Instituto de Agricultura Sostenible-CSIC y Universidad de Córdoba, España.

² Universidad de California, Kearney Horticultural Center, Parlier, California, USA.

La agricultura de riego es la principal consumidora de agua del Planeta. Más de las dos terceras partes del agua que el hombre destina a los distintos usos se aplican en el riego. La urbanización creciente en todas las sociedades, está alejando a los ciudadanos del mundo rural, ciudadanos que cada vez comprenden menos la necesidad de asignar a la agricultura de riego unos niveles tan elevados de un recurso que se percibe tan escaso. Además los usos excesivos de agua de riego resultan en aportaciones importantes a la contaminación difusa del agua en los ecosistemas y ello aumenta la actitud crítica de la sociedad hacia el regadío. Sin embargo, el aumento demográfico que se espera en las próximas décadas, va a requerir una expansión en la producción de alimentos y por ende, del regadío. Dicha expansión no va a poder hacerse a costa de utilizar recursos hídricos adicionales a los que ahora usa la agricultura de riego; por el contrario, en muchas zonas habrá presiones para reducir el uso del agua en el riego. Por tanto, parece que ha llegado la hora de renovar esfuerzos para usar el agua más racionalmente y para compartirla por parte de todos.

Hasta épocas muy recientes se ha cuestionado, tanto por parte de muchos regantes como por técnicos del sector, la necesidad de disponer de

métodos técnicos de programación de los riegos. Un solo ejemplo que se cita a continuación, ha de servir para resaltar la importancia que estas técnicas podrían tener en el momento actual en la gestión del regadío en España. Sin duda, uno de los lugares de España donde el agua de riego es más escasa y cara es Almería.

La Figura 1 presenta la relación entre producción y agua aplicada en riego para los cultivos de pepino, pimiento y sandía, obtenida en invernaderos comerciales durante tres campañas de riego (Caja Rural de Almería, 1997). El rango de valores de agua aplicada para los que se obtiene la máxima producción oscila entre unos 2.000 y 5.000 m³/ha para pepino y pimiento y entre 2.400 y 5.700 m³/ha en sandía. Asimismo, para una dotación dada, la producción puede variar más de un 100% (Figura 1). Los datos de la Figura 1 evidencian el desconocimiento existente entre los agricultores en cuanto a la dotación estacional de agua de riego necesaria para alcanzar las producciones máximas, objetivo habitual de la horticultura intensiva de la zona. Si los datos presentados en la Figura 1 fuesen representativos de la situación general, parece claro que existen grandes oportunidades de mejorar la eficiencia en el uso del agua en la agricultura de riego, incluso en las áreas más productivas del país.

Este trabajo examina los últimos avances en programación de riegos a dos escalas; por un lado a escala de planta individual o parcela, centrándose en el desarrollo de nuevos sensores de suelo y planta que permiten detectar los momentos de riego con mayor precisión que lo hacían los existentes hasta ahora. Por el otro, se examina la programación de los riegos a escala de zona regable a regional, describiendo los últimos avances en la difusión de información sobre los consumos de los cultivos y sobre los sistemas de apoyo a la toma de decisión para el manejo del riego en zonas regables.

Una nueva generación de sensores de estado hídrico del suelo y de la planta.

Los sensores de humedad del suelo

La programación científica de los riegos comenzó casi en paralelo con el desarrollo de los primeros sensores de potencial matricial del agua del suelo, hace más de 50 años. Ello seguramente es debido a la atracción que produce la idea de disponer de un 'detector' que produzca una señal

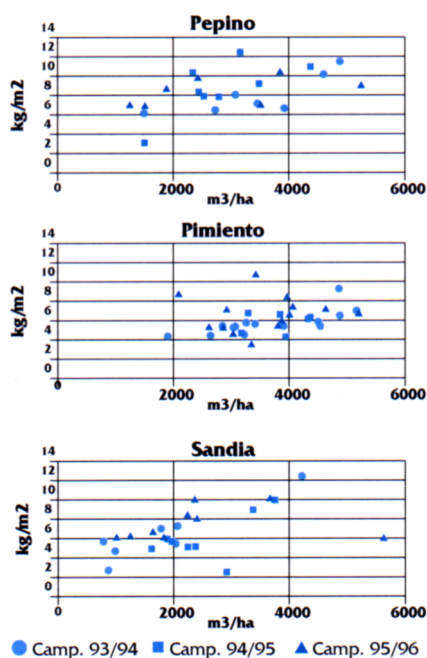


Figura 1. Relaciones entre producción y agua aplicada en el riego en invernaderos comerciales de Almería (adaptado de Caja Rural de Almería, 1997)

inequívoca del momento idóneo del riego que sustituya a la apreciación subjetiva del regante. De ahí que los sensores de estado hídrico del agua del suelo comenzaran a utilizarse en aplicaciones relacionadas con el manejo del riego al poco tiempo de su invención para su uso en investigaciones sobre la física del agua en el suelo.

Los primeros tensiómetros y bloques de yeso empezaron a usarse comercialmente a finales de los 50 con un entusiasmo inicial que fue perdiéndose con el tiempo (Martin et al., 1990). Como en otros casos, la tecnología ha ido por delante de la ciencia y las medidas del potencial hídrico (ψ) fueron más fáciles de hacer que de interpretar. Las medidas puntuales de ψ en el espacio y el tiempo están sujetas a los problemas de variabilidad espacial de los suelos y de la distribución del sistema radical por lo que pueden ser difíciles de interpretar lo cual, unido a las dificultades de mantenimiento de estos instrumentos han limitado su uso en la programación de riegos (Campbell y Mulla, 1990; Martin et al., 1990). Conviene, no obstante, hacer una consideración que suele olvidarse; aunque en un momento determinado sean pocos los regantes que usan activamente estos instrumentos, en el transcurso de los años aquellos que han usado tensiómetros acaban 'calibrando' su sistema de riego y aunque abandonen su uso, aprenden lo suficiente para mejorar el manejo del riego respecto a lo que hacían con anterioridad (Feres, 1996).

Mientras que los tensiómetros han sido utilizados durante décadas y han tenido un cierto resurgir reciente coincidiendo con la difusión de sistemas de riego localizado, los bloques de yeso han sido menos populares que los tensiómetros, debido a su baja sensibilidad en el rango de alta humedad de suelo y a la necesidad de calibración. La búsqueda de sensores para determinar la humedad del suelo ha sido ininterrumpida desde la aparición de los primeros tensiómetros y bloques de yeso. En la década de los setenta, se propuso el uso de la sonda de neutrones para la programación de los riegos. La aplicación de este instrumento a la determinación del momento y dosis de riego es sencilla (Campbell y Mulla, 1990) y fue utilizada en varios programas de asesoramiento de riego en comunidades de regantes del Oeste de EEUU y de España. Estos programas no persistieron pasados unos años por las altas necesidades de mano de obra de la metodología propuesta y por los problemas de seguridad asociados al uso de un instrumento radioactivo.

En los últimos años, la expansión de los métodos de riego localizado ha demandado técnicas que permitan programar el riego con precisión. El uso del balance de agua no siempre es posible por la incertidumbre en la distribución de agua en el suelo bajo riego localizado y por la dificultad de estimar los coeficientes de cultivo en árboles jóvenes y otras situaciones de cobertura parcial. Ello ha requerido el uso de sensores de humedad del suelo particularmente, los tensiómetros. Las dificultades de mantenimiento y automatización de estos instrumentos ha hecho que se generara una demanda de sensores de humedad de suelo de mayor facilidad de uso y automatización para lecturas frecuentes o incluso continuas. Aunque durante décadas se han estudiado las relaciones entre la constante dieléctrica de suelos humedecidos y su contenido volumétrico en agua, los primeros sensores para su uso práctico en programación de riegos basados en este principio son mucho más recientes. La aparición de sensores TDR (del inglés, *time domain reflectometry*) data de principios de los 80 pero, por su coste y otras dificultades técnicas de instalación, apenas se han usado hasta ahora fuera del ámbito de la investigación. En los últimos años, han aparecido otros sensores basados en medidas de capacitancia que permiten el registro continuo de la humedad del suelo a varias profundidades (Paltineanu y Starr, 1997).

Las ventajas de disponer de datos continuos de humedad del suelo en tiempo real son varias ya que se monitoriza un punto determinado y se pueden tomar decisiones en base a los cambios observados. Los registros permiten evaluar las tasas de infiltración y de extracción así como los niveles de humedad en los distintos estratos. Un ejemplo de un trabajo reciente (Goldhamer et al., 1999) servirá para ilustrar la utilidad de estos sensores. La Figura 2 muestra el registro continuo de la humedad volumétrica de tres capas utilizando sensores de capacitancia en un lisímetro con dos melocotoneros. El lisímetro había sido regado diariamente con una dotación equivalente al 100% de la ET real, cuando comenzó a aplicarse un tratamiento de riego deficitario con el objetivo de estudiar la sensibilidad de distintos sensores e indicadores al déficit hídrico de los árboles (Goldhamer et al., 1999). La aplicación de un 75% de la ET produjo una respuesta inmediata en el sensor más superficial (Fig.2a) cuyas oscilaciones diurnas se amplificaron con tendencia a decrecer, debido a que la extracción superaba la recarga aportada por el riego nocturno. A medida que avanzaban los días y aumentaba la intensidad del déficit

de riego impuesto, las oscilaciones de la capa superficial se amortiguan y comienza a extraerse agua de la capa de 50 cm de profundidad, si bien a una tasa menor. La casi nula extracción a los 90 cm que se observa en la Figura 2a indica que apenas existen raíces en esa capa debido a la compactación del subsuelo en el lisímetro (Goldhamer et al., 1999). La Figura 2b demuestra que es posible hacer un seguimiento detallado de la dinámica del agua del suelo con estos sensores (Paltineanu y Starr, 1998) puesto que su evolución sigue la tasa de ET medida en el lisímetro, si bien existe un desfase que sería indicativo de las resistencias y capacitancias del sistema suelo-raíz.

Actualmente, a partir de desarrollos recientes, existen varios sistemas de medida de la humedad del suelo en el mercado. Unos, fijos, se basan en la monitorización de unos lugares determinados, seleccionados previamente mediante estudio o reconocimiento de los suelos que componen la unidad de riego. También se han desarrollado sondas portátiles que permiten medir en muchas ubicaciones, si bien se pierde la capacidad de obtener registros continuos. Además de la sensibilidad y robustez en la fabricación de los sensores para su uso en campo, dos aspectos importantes a considerar son la calibración y la esfera de influencia de la medida. Los estudios de calibración realizados hasta la fecha (p ej., Paltineanu y Starr, 1997) sugieren que se obtienen relaciones no lineales que pueden variar con el tipo de suelo. Si el uso de las medidas se basa en los cambios relativos de humedad, la calibración puede ser menos precisa.

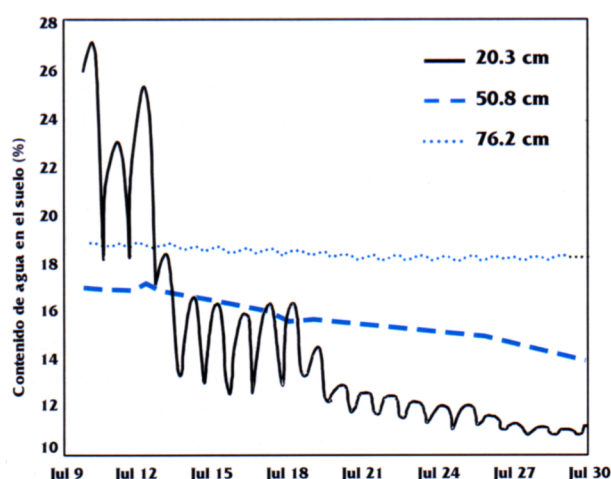


Figura 2a. Evolución del contenido de agua en el suelo a tres profundidades en un lisímetro con dos melocotoneros. (Tomado de Mata y cols., 1999)

El volumen de suelo en el que se evalúa la humedad es variable según el tipo de sensor y ha sido una limitación, pues hay sensores que solo exploran muy pocos centímetros a su alrededor. Es recomendable que el volumen explorado sea al menos de 7-10 cm alrededor del sensor para que las medidas sean representativas y no se vean muy afectadas por las condiciones de instalación.

Los precios de estos sistemas son elevados y su uso está justificado cuando los beneficios reales o percibidos, sean importantes. Para obtener buenos resultados, es necesario diseñar un protocolo de utilización que requiere ajustes para llegar a optimizar el programa de riego. Dicho protocolo debe incluir una estima de las dotaciones de riego requeridas, en base a los valores calculados para la zona de la ET de referencia (ET_0) y del coeficiente de cultivo (K_c). Aplicada dicha dosis, el usuario debe ir haciendo ajustes al alza o a la baja en función de los registros de humedad que se observen. Si se parte de un perfil humedecido, como es deseable, se puede recortar la dosis en fracciones del 5-10 % y estudiar la evolución de la humedad en las distintas capas. Una característica del riego localizado es que, debido a la proliferación de raíces en las capas superficiales y en la proximidad de los emisores, las tasas de extracción son muy altas y muy sensibles al déficit de riego como se observa en los datos de la Figura 2. En pocos días se puede hacer una calibración local de la dotación calculada, que habrá que comprobar periódicamente según evolucione la humedad en las capas más activas y en el subsuelo.

Detectando el estado hídrico de la planta

La detección del estado hídrico de la planta para determinar sus necesidades de riego ha sido siempre enormemente atractiva, pues evita la evaluación indirecta a través del suelo o de la atmósfera. Sin embargo, al ser la planta un intermediario entre fuente y sumidero del agua, su propio estado hídrico es tan dinámico que resulta difícil caracterizar. Ello ha dificultado el uso de medidas de estado hídrico de la planta para la programación de los riegos. No obstante, en algún cultivo como el algodón, las medidas de potencial hídrico de hoja (ψ) con la bomba de presión se han utilizado en fincas comerciales para aplicar déficits hídricos y regular el crecimiento vegetativo. Para ello, Grimes y Yamada publicaron en 1982 el valor umbral de ψ al mediodía para algodón por debajo del cual, habría que regar.

Otro indicador del estado hídrico del cultivo que se ha propuesto en el pasado reciente es la temperatura de la cubierta vegetal. La aparición de termómetros de infrarrojos que permiten monitorizar la temperatura de la cubierta a distancia, hizo abrigar esperanzas de utilizar la teledetección como herramienta para programar los riegos. Los primeros resultados en trigo en un clima árido fueron muy esperanzadores (Jackson et al., 1977) pero pronto se comprobó que la temperatura de la cubierta se veía afectada por los diversos factores ambientales que determinan la demanda transpirativa además de por el estado hídrico del cultivo. Otros factores que limitan su uso son los efectos en la lectura de la temperatura de la superficie del suelo en cobertura parcial que pueden corregirse- y el hecho de ser un indicador tardío en los casos en los que un cierre estomático –causa de la elevación de la temperatura de la superficie de la cubierta- ya afecta el rendimiento en determinados casos. Posteriormente, Jackson (1981) propuso combinar las medidas de termometría con las de déficit de presión de vapor para calcular un índice de estrés hídrico (*crop water stress index*; CWSI). Este índice permite determinar si la tasa de ET de un cultivo está por debajo de su nivel máximo o potencial. Dada la habitual correlación entre transpiración y producción de biomasa, una reducción en la ET implica una reducción en la producción por lo que el CWSI puede ser un buen indicador para programar los riegos en los casos en los que se pretenda mantener la ET a niveles máximos.

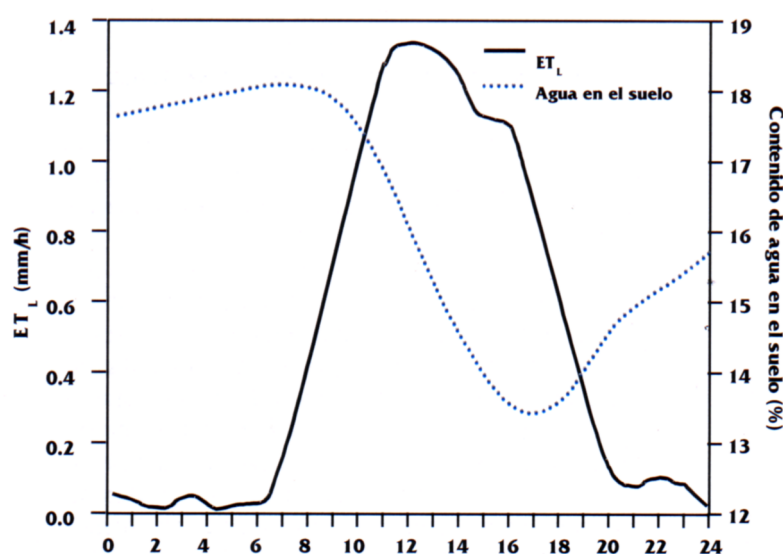


Figura 2b. Evolución diaria del contenido de agua del suelo y de la ET del melocotonero en un lisímetro. Nótese que el riego comenzó hacia las 1700 horas. (Tomado de Mata y cols., 1999)

A pesar de la solidez teórica del CWSI, su uso ha sido muy limitado en la práctica al requerir medidas en parcela y estimas de la ET_0 . Sin embargo, hay usos posibles de la termometría infrarroja que pueden ser muy útiles en la programación de riegos en el futuro. La variabilidad espacial de los suelos en combinación con la variabilidad inducida por la aplicación del riego, hace que la aparición de los síntomas de estrés no sea uniforme en un campo regado. El coeficiente de variación de la temperatura de la cubierta puede ser un buen indicador precoz de las necesidades de riego. Sorprendentemente, sólo unos pocos trabajos hasta ahora sugieren su uso pero combinando este índice con los avances en teledetección, se pueden hacer realidad algunas propuestas innovadoras (Moran, 1994).

Finalmente, dentro de los indicadores convencionales de planta, existen algunas nuevas posibilidades que merece la pena mencionar. La acumulación de información experimental sobre los valores de ψ en distintas especies frutales y la evidencia de que la medida del ψ en hoja cubierta $-\psi_t$, que estima el ψ del punto de inserción de la hoja o potencial del tallo- es mas robusta y consistente que la del ψ de una hoja iluminada (Shackel et al., 1997) hace que el ψ_t sea un indicador prometedor para diagnosticar déficits hídricos, al menos en especies frutales. Si a esto unimos que el Prof. Shackel ha diseñado una nueva bomba de presión (Shackel, comunicación personal) mucho más portátil y que no requiere fuente de aire comprimido, parece que la medida de ψ puede ser de gran utilidad para diagnosticar problemas en la práctica e incluso para calibrar programas de riego a nivel finca. Para ello es necesario determinar valores umbrales de ψ_t para las distintas especies y simplificar aún más la metodología para estimar el ψ_t del huerto (Goldhamer y Fereres, en preparación).

Desde que Huck y Klepper publicaron en 1976 un trabajo en el que se demostraba la relación entre el estado hídrico de plantas de algodón y las contracciones del tallo, muchos investigadores han intentado utilizar las medidas de contracción como indicadores del estado hídrico de una planta. En el caso de árboles frutales, las oscilaciones diurnas del tronco se asocian al movimiento de agua del floema al xilema o viceversa, siguiendo la evolución diaria de la corriente transpirativa.

Uno de los primeros estudios para usar las oscilaciones del diámetro del tronco (ODT) en programación de riegos de frutales fue el de Garnier y Berger (1986) en melocotonero. Ginestar y Castel (1996) evaluaron recientemente esta técnica para detectar estrés hídrico en mandarinos.

La medida de las oscilaciones del tronco se ha perfeccionado con el uso de sensores de desplazamiento variable y respuesta lineal, que detectan cambios micrométricos en el diámetro del tronco y cuya medida se puede registrar de forma continua y automática. Precisamente han sido los últimos avances en electrónica y manejo de la información los que han facilitado el uso de estos sensores en condiciones de campo durante periodos largo de tiempo. La información que se recoge de estos sensores puede generar varios parámetros basados en medidas de las ODT, como muestra la Figura 3. Por un lado, la diferencia entre diámetros máximos de un día a otro nos da la tasa de crecimiento del tronco. Por otro lado, la diferencia entre el máximo y el mínimo diario nos da la máxima oscilación del diámetro (MOD) que se relaciona directamente con el estado hídrico (Huck y Klepper, 1976). En general, en muchas especies de árboles frutales, a medida que se incrementa el estrés hídrico aumenta la oscilación diurna. Por ejemplo, Goldhamer et al. 1999 encontraron que cuando el ψ de melocotoneros bajó de -0.99 a -2.1 MPa, la MOD aumentó de 0.27 a 0.63 mm.

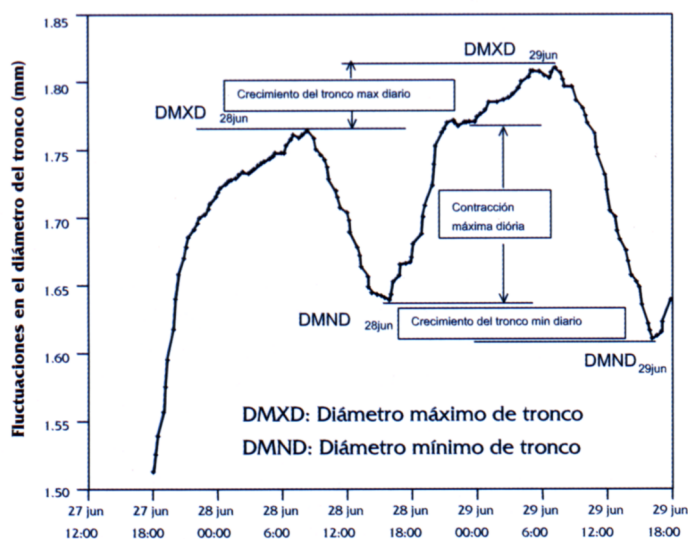


Figura 3. Registros de variaciones del diámetro del tronco en almendro, indicando los parámetros que pueden derivarse de los mismos. (adaptado de Goldhamer y Fereres, 2000)

La interpretación de la evolución con el tiempo de los distintos parámetros que se muestran en la Figura 3 puede dar información útil respecto a las respuestas del árbol. Las diferencias entre dos valores consecutivos de MXD de la tasa de crecimiento del tronco mientras que los valores de MXD acumulados también indican la evolución del crecimiento. La interpretación de los cambios en MND es más compleja aunque se ha visto que en melocotoneros la tendencia a decaer el MND en el tiempo es uno de los primeros síntomas de estrés (Goldhamer et. al., 1999). La elevada sensibilidad del MND probablemente refleja los efectos combinados del suministro de agua del suelo y de la demanda evaporativa en la contracción máxima, mientras que el MXD se debe ver afectado casi exclusivamente por la rehidratación que depende sobre todo del suministro de agua del suelo (Goldhamer y Fereres, 2000).

Una de las ventajas de los dendrómetros es su alta sensibilidad al estrés hídrico en relación con otros parámetros o indicadores convencionales de estrés. La figura 4 muestra la respuesta relativa de la OMD en melocotoneros durante un período de riego deficitario (Fereres et. al., 1999). La desviación de la OMD del tratamiento de déficit respecto de la del control, comienza antes y es más pronunciada que la que se midió en tres indicadores de estado hídrico; el potencial del tronco (ψ_t), el potencial de la hoja del mediodía (ψ_m) y el potencial de la hoja al amanecer (ψ_a). Nótese que el ψ_t es más sensible que los dos otros indicadores de estado hídrico de la hoja. La comparación del OMD con otros indicadores como la tasa de crecimiento del fruto, la fotosíntesis y la conductancia estomática del melocotonero también demostró que el OMD es más sensible que estos últimos parámetros, con la ventaja adicional de que su medida puede automatizarse sin problemas (Goldhamer et. al., 1999).

El uso de dendrómetros para programar los riegos puede plantear inconvenientes. Uno es la variabilidad que se observa en las medidas de contracción del tronco entre árboles. En una comparación realizada en almendro, Goldhamer y Fereres (2000) demuestran que en ese caso, aunque la variabilidad en OMD es superior a la del parámetro ψ_t , la fracción: señal/ruido es superior en el indicador derivado de los dendrómetros que en el ψ_t , debido a que la desviación de la señal respecto de los valores de referencia es relativamente mayor que la variabilidad (ruido) que tiene la señal entre árboles.

Otro de los problemas es la necesidad de tener un valor umbral de OMD de referencia para poder recomendar el aumento de la frecuencia o la dosis de riego. Existe aún poca información para desarrollar las recomendaciones correctas para cada especie por lo que aún es necesaria una investigación más básica que genere la información necesaria. No obstante, es posible ya avanzar unos protocolos, para el uso de los dendrómetros en programación de riegos en árboles frutales jóvenes y maduros (Goldhamer y Fereres, 2000). No cabe duda que en el futuro, con los avances en sensores y en el desarrollo de software, será posible programar los riegos de forma automática en base a las oscilaciones del tronco.

Conclusión:
Hacia la integración de la programación de riegos en el manejo del agua en la agricultura.

Los recientes avances tecnológicos descritos anteriormente no pueden ocultar que uno de los principales problemas de la programación científica de los riegos es su escasa adopción a nivel global. La gran mayoría de los regantes toman las decisiones sobre el riego sin utilizar, no sólo técnicas sofisticadas como las descritas, sino cualquier otro enfoque cuantitativo.

La situación, no obstante, está cambiando en muchos regadíos donde ya existen incentivos económicos o imposiciones legales que obligan a conservar el agua. Ello va a requerir que cambie la

actitud, en relación al manejo del agua en la agricultura de riego. El desafío real en la actualidad es eliminar los problemas que impiden que todas estas técnicas se difundan y se adopten por la mayoría de los regantes. Para ello es necesario investigar a varias escalas, desde la parcela, finca, área, comunidad de regantes y zona regable, todos los aspectos del manejo del riego y no sólo aquellos directamente relacionados con la programación. Es necesario caracterizar las fuentes y procedimientos de suministro de agua, los sistemas de aplicación incluida su evaluación, las restricciones técnicas y las bases socio-económicas y culturales del regadío en cuestión. Todos estos factores influyen en el éxito o fracaso de un programa de asesoramiento de riegos dirigido a optimizar la dotación y la frecuencia de aplicación. En muchos casos son las restricciones en esos otros aspectos los que limitan el aprovechamiento del agua de riego y sería ocioso intentar introducir, en esos casos, técnicas avanzadas de programación de riegos a nivel de parcela; sería, en expresión popular norteamericana, como “medir con un tornillo micrométrico y cortar con un hacha”. Afortunadamente, cada vez se está avanzando más en la caracterización, análisis y modelización de sistemas y perímetros de riego, lo cual permitirá la selección e integración de la metodología más avanzada en programación de riegos para hacerla compatible con el nivel deseado de manejo del agua en la agricultura de riego.

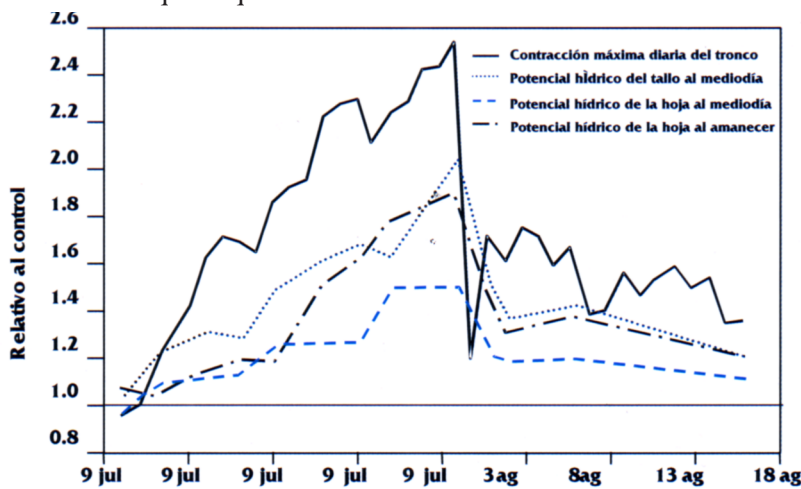


Figura 4. Valores relativos al control de la oscilación del diámetro del tronco y de los potenciales hídricos del tallo y de la hoja, al amanecer y al mediodía. Tomado de Fereres y cols., 1999.

Referencias

- Caja Rural de Almería (ed). 1997. Gestión del regadío en El Campo de Dalías: Las Comunidades de Regantes Sol y Arena y Sol-Poniente. 195p
- Campbell, G.S. y D.J. Mulla, 1990. Measurement of soil water content and potential. p.127-142. In: Irrigation of Agricultural Crops. (B.A. Stewart y D.R. Nielsen, eds.) Amer. Soc. Agric. Engr., Madison, Wis
- Fereres, E. 1996. Irrigation Scheduling and its Impact on the 21st Century. En: Proceedings of the International Conference on ET and Irrigation Scheduling. (Camp, C.R., Sadler, E.J. y Yoder, R.E., eds) ASAE, San Antonio, USA, 547-553
- Fereres, E., D. Goldhamer, M. Cohen, J. Girona y M. Mata. 1999. Continuous trunk diameter recording can reveal water stress in peach trees. California Agriculture. 53(4):21-25.
- Garnier, E. y A. Berger, 1986. Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. J. App. Ecol. 23:193-209.
- Ginestar, C. y J.R. Caster, 1996. Utilización de dendrómetros como indicadores de estrés hídrico en mandarinos jóvenes regados por goteo. Riegos y Drenajes XXI, 89:40-46.
- Goldhamer, D.A. E. Fereres, M. Mata, J Girona y M. Cohen. 1999. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. Journal of the American Society for Horticultural Science. . 124:4:437-444.
- Goldhamer D.A. y E Fereres. 2000. Scheduling fruit tree irrigation using continuous recorded trunk diameter measurements. (enviado a publicación).
- Grimes D.W. y H. Yamada. 1982. Relation of cotton growth and yield to minimum leaf water potential. Crop Sci. 22:134-139.
- Heerman, D.F., D.L. Martin, R.D. Jackson y E.C. Stegman. 1990. Irrigation scheduling controls and techniques. En: Irrigation of agricultural crops (B.A. Stewart y D.R. Nielsen, eds) American Society of Agronomy monograph no.30 p.475-508.
- Huck M.G. y B. Klepper. 1976. Water relation of cotton. II. Continuous estimates of water potential from stem diameter measurements. Agron. J. 69:593-597
- Jackson, R.D., R.J. Reginato y S.B. Idso. 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating crop water requirements. Water Resour Res. 13:651-656.
- Jackson, R.D. 1981. Canopy temperature and crop water stress. Adv. Irrig.,1:43-85.
- Martin, D.L.; E.C. Stegman, y E. Fereres. 1991: Irrigation Scheduling Principles. En: Management of Farm Irrigation Systems. (Hoffman, G.J., Howell, T.A., Solomon, K.H. eds) American Society of Agricultural Engineers., 155-203.
- Mata M., J. Girona, D. Goldhamer, E Fereres, M Cohen y S Johnson. 1999. Water relations of lysimeter-grown peach trees are sensitive to deficit irrigation. California Agricultural. 53(4):17-21.
- Moran, M.S. 1994. Irrigation management in Arizona using satellite and airplanes. Irrig. Sci. 15:35-41
- Paltineanu, I.C., y J.L. Starr. 1997. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory calibration. Soil Sci. Soc. Am. J. 61:1576-1585.
- Shackel, K. A., H. Ahmadi, W. Biasi, R. Buchner, D. Goldhamer, S. Gurusinghe, J. Hasey, D. Kester, B. Krueger, B. Lampinen, G. McGourty, W. Micke, E. Mitcham, B. Olson, K. Pelletrau, H. Philips, D. Ramos, L. Schwankl, S. Sibbett, R. Snyder, S. Southwick, M. Stevenson, M. Thorpe, S. Weinbaum y J. Yeager. 1997. Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. HortTechnology 7(1):23-29.
- Starr, J.L., and I.C. Paltineanu. 1998, Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. Soil Sci. Soc. Am. J. 62:114-122.