

Productividad física del agua y la tierra

Estrategias agronómicas para optimizar la eficiencia en el uso del agua y los nutrientes de los sistemas agrarios intensivos

Diego S. Intrigliolo^a, A. Pérez-Pastor^b y A. Quiñones^c

^aConsejo Superior de Investigaciones Científicas,

^bUniversidad Politécnica de Cartagena

y ^cInstituto Valenciano de Investigaciones Agrarias

1. El uso del agua y los nutrientes en la agricultura mediterránea

La agricultura sostenible está basada en el uso eficiente de los recursos naturales con el fin de salvaguardar el medio ambiente y proporcionar rendimientos productivos que permitan satisfacer la necesidad de alimentos de una población en continuo aumento (Tilman *et al.*, 2002), objetivo prioritario de la nueva agenda de la ONU sobre desarrollo sostenible (UN 2015).

De todos los recursos naturales e insumos que se emplean en la agricultura, el agua es probablemente el factor más determinante de la productividad de los cultivos (Matson *et al.*, 1997). En la agricultura mediterránea, donde el clima es semiárido, la disponibilidad de agua en el suelo es además la principal limitación para la práctica de una agricultura económicamente sostenible; de ahí que España posea la mayor superficie de cultivo en regadío de la Unión Europea con cerca de 3,5 millones de ha (Eurostat, 2013). En este contexto, el manejo del riego es el principal determinante de la calidad y cantidad de las cosechas obtenidas. Además, una incorrecta gestión de los recursos hídricos disponibles puede tener también graves repercusiones medioambientales y socioeconómicas.

En los últimos años se han realizado grandes esfuerzos económicos para dotar a las comunidades de regantes (conjunto de parcelas que comparten infraestructuras para el uso colectivo del agua de riego) con instalaciones hidráulicas eficientes. Además, se han introducido nuevas tecnologías como el riego localizado o a presión, superficial o subterráneo, lo cual, aunque ha ido acompañado de un aumento de las necesidades energéticas, ha contribuido a

incrementar la eficiencia en el uso del agua (EUA) en las parcelas, ya que se ha conseguido reducir la componente de evaporación de la evapotranspiración del cultivo (Ferer *et al.*, 2003). Sin embargo, no se ha hecho tanto hincapié en optimizar la programación del riego (dosis y frecuencia del agua a aportar) para utilizar los recursos hídricos disponibles de una forma más eficiente. Este aspecto es hoy en día particularmente importante debido al gran incremento de los costes energéticos asociados al riego, los cuales repercuten directamente sobre el coste del agua utilizada.

Junto con el manejo del riego, las prácticas agrícolas desarrolladas desde el siglo pasado orientadas a aumentar la producción, además de requerir un elevado consumo energético, han provocando graves daños medioambientales; los dos más significados son, sin duda, la degradación del suelo y la redistribución y empeoramiento de la calidad de las aguas continentales. En este sentido, el principal problema de degradación del recurso hídrico es la contaminación por nitratos, siendo la contaminación difusa de los acuíferos por lixiviación del nitrato procedente de la sobrefertilización nitrogenada en zonas agrícolas de cultivo intensivo la que provoca un mayor impacto, con serias implicaciones medioambientales, sanitarias y económicas (Fernández Ruiz *et al.*, 2005).

En este contexto de agricultura sostenible, los esfuerzos deben ir encaminados a la optimización de la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en las plantas, dado que es el nutriente que es aplicado en mayor proporción y da lugar a mayores problemas medioambientales que el resto de macronutrientes (fósforo y potasio). Una cuidadosa selección de la dosis y tipo de abono nitrogenado, una correcta distribución temporal de las necesidades nutritivas, un manejo del riego preciso y el empleo de nuevos fertilizantes menos contaminantes son factores de gran importancia para incrementar la eficiencia de absorción del nitrógeno aportado y, por tanto, reducir las pérdidas de nitrato por lixiviación.

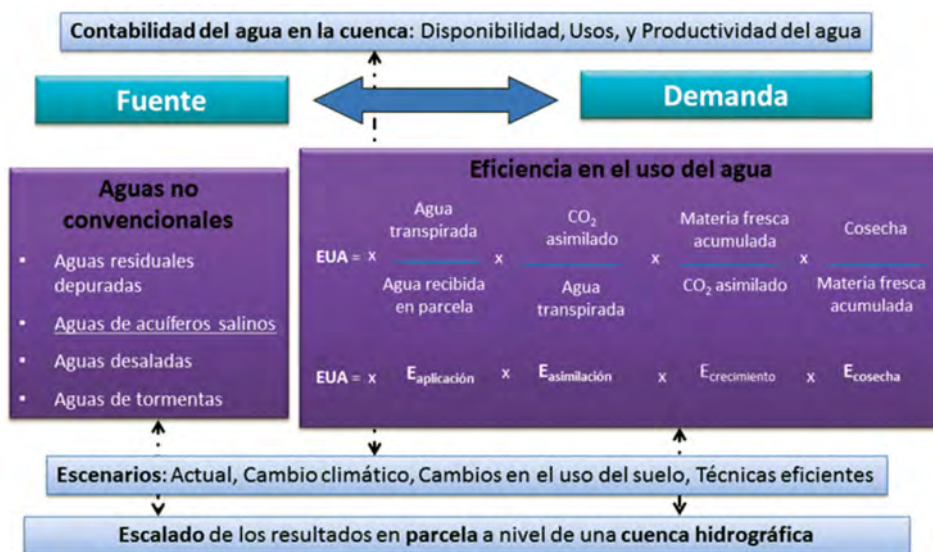
Además del nitrógeno, otros elementos son importantes y necesarios para el correcto desarrollo de las plantas. Por lo tanto, para mejorar la rentabilidad de los cultivos en la agricultura mediterránea se debe de realizar una gestión eficiente, no solo del agua de riego y del abonado nitrogenado, sino también establecer códigos de buenas prácticas agrarias, que consideren también el aporte del resto de nutrientes esenciales para los cultivos. Una práctica que mejoraría la eficiencia de uso, tanto del agua como del riego, es el Riego Deficitario. Sin embargo, el impacto de la aplicación del riego de-

ficitario sobre la nutrición de las plantas ha sido poco analizado y discutido. Aunque, en principio, la respuesta pueda depender estrictamente del cultivo, es posible que los resultados obtenidos en plantas de una determinada especie puedan extrapolarse a otras que tengan características comunes.

2. Gestión integral de los recursos hídricos en los sistemas agrarios

La gestión de los recursos hídricos se basa en un balance entre la fuente y la demanda de agua. Así pues, para llevar a cabo una correcta gestión de los recursos hídricos, es necesario tener en cuenta ambos componentes de este balance, las distintas escalas de trabajo y las posibilidades de actuación (Figura 1). Se debe además tener presente el marco global de gestión del agua en una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta tanto las disponibilidades de agua como los límites de su uso y las productividades económicas y las externalidades ambientales derivadas del empleo del agua de riego en los distintos agroecosistemas existentes en una determinada cuenca hidrográfica o distrito de riego.

Figura 1. Esquema de los aspectos a tener en cuenta para la gestión de los recursos hídricos en la agricultura



* Incluye las actuaciones posibles para incrementar la fuente de agua disponible o para optimizar la eficiencia en el uso del agua (EUA).

2.1. Posibilidades agronómicas para incrementar la fuente de agua

En la actualidad se están llevando a cabo diversas investigaciones en esta línea y ensayos agronómicos de larga duración que han demostrado los límites y las posibilidades del empleo de aguas residuales en la citricultura (Nicolás *et al.*, 2016). El principal problema en su empleo continuado radica en la elevada salinidad que este tipo de agua pueden contener y sus efectos negativos, a medio plazo, sobre el cultivo y, a más a largo plazo, sobre la estructura y permeabilidad del suelo. Sin embargo, este tipo de agua puede constituir en ocasiones una posibilidad para paliar los efectos negativos de la sequía extrema, además de constituir la única fuente de agua disponible para el riego en algunas zonas de litoral de la horticultura intensiva del Levante.

2.2. Demanda de agua. Eficiencia en el uso

Para incrementar la eficiencia en el uso del agua pueden llevarse a cabo actuaciones a distintas escalas de trabajo considerando la EUA desde una aproximación sistemática y cuantitativa (Hsiao *et al.*, 2007) que comprende desde la eficiencia hidráulica hasta llegar a lo que puede definirse como eficiencia de cosecha, en el sentido de optimizar el reparto de biomasa hacia los órganos cosechables de las plantas (Figura 1). Algunas de las líneas de actuación que pueden llevarse a cabo son:

- Optimizar la eficiencia en la aplicación del agua de riego diseñando estrategias de programación del riego basadas en modelos semiempíricos para determinar la transpiración del cultivo.
- Optimizar la eficiencia en la asimilación, es decir la cantidad de materia seca que es capaz de producir un cultivo a partir del agua transpirada, manipulando para ello el dosel vegetal con el fin de que intercepte la mayor cantidad de radiación posible en los momentos del día cuando la EUA a nivel de intercambio gaseoso es mayor.
- Optimizar la eficiencia en la cosecha, es decir incrementar el ratio de materia seca dirigida hacia los órganos cosechables con respecto al total de biomasa producida. Esto puede conseguirse mediante técnicas de riego deficitario controlado (RDC) adaptadas a los nuevos materiales vegetales existentes en particular en referencia a los portainjertos.

3. Eficiencia en la aplicación del agua de riego

En la actualidad el método más utilizado para la programación del riego de los cítricos se lleva a cabo siguiendo las recomendaciones de la FAO (Allen *et al.*, 1998), estimando las necesidades hídricas mediante un procedimiento que tiene en cuenta: las variables climáticas que influyen en la demanda evaporativa o evapotranspiración de referencia (ET_0) y un factor ligado al cultivo, denominado coeficiente del cultivo (K_c).

Las necesidades hídricas o evapotranspiración del cultivo (ET_c) se calculan como:

$$ET_c = ET_0 * K_c.$$

Sin embargo, el procedimiento arriba descrito para estimar las necesidades hídricas puede tener ciertas incertidumbres dado que una plantación, incluso de la misma especie y variedad, posee necesidades hídricas distintas en función de muchos factores relacionados tanto con el manejo de la parcela como de las características agronómicas de las variedades. En pocas palabras, cada parcela tiene su propio K_c y por lo tanto los que están disponibles en los servicios de asesoramiento pueden servir, en principio, de una primera indicación, pero no tienen por qué informar de forma exacta sobre las necesidades hídricas reales de las plantaciones. Además, el procedimiento descrito de la ET_0 y K_c no informa acerca de la frecuencia y dosis a aplicar en cada riego, es decir, no permite establecer cómo aplicar los volúmenes de riego calculados, ya que esto depende de factores ligados a las características del suelo y al equipamiento de riego de cada parcela. Por todo ello, en la actualidad es de gran interés profundizar en el uso de nuevas tecnologías para el manejo del riego, basadas en la medida del estado hídrico del suelo y/o planta, y de modelos de simulación específicos y semi-mecanicistas que, en todo caso, deben entenderse como estrategias complementarias y nunca excluyentes de la programación en base a información del clima (ET_0 y K_c).

En este sentido, las líneas de investigación actuales persiguen poner a punto, implementar y validar en condiciones de campo sistemas integrales de asesoramiento virtual (*online*) que pongan a disposición de los usuarios finales un sistema de toma de decisiones sobre el riego, centrado en cultivos hortofrutícolas típicos de la agricultura intensiva del Levante. Para ello se pueden

desarrollar e implementar una serie de herramientas de predicción de variables climáticas que permitan estimar la evapotranspiración de referencia y la precipitación efectiva, además de desarrollar un modelo semimecánico para estimar el balance hídrico del suelo, cuantificando por separado la evaporación de agua desde el suelo mediante el modelo de Ritchie (1972), y la transpiración de las plantas, readaptando la formulación de Katerji y Rana (2006). Se considerará que la energía disponible será aquella que recibe y absorbe el cultivo. Para calcular la evaporación de agua desde el suelo, se modelizará la radiación neta recibida teniendo en cuenta el índice de área foliar del cultivo y, por lo tanto, su porcentaje de cobertura y su estado de desarrollo fenológico. El modelo puede también hacer uso de las técnicas de teledetección para estimar el vigor vegetativo de las plantaciones, utilizando en particular el índice de vegetación de diferencia normalizada o NDVI (del inglés, *Normalized Difference Vegetation Index*) obtenido a partir de imágenes de los satélites Landsat y Sentinel u ortofotos aéreas para parcelas de muy pequeño tamaño.

4. Técnicas de riego deficitario controlado

Una de las técnicas de riego cuyo uso ha dado los resultados más prometedores para incrementar la EUA es el riego deficitario controlado (RDC). Esta técnica, en definitiva, es una práctica cultural con la que manejamos la disponibilidad de agua en el suelo, imponiendo en periodos predeterminados déficit hídrico, tanto en el suelo como en la planta, que no deriven en pérdidas en la productividad final del cultivo o que incluso mejoren los beneficios económicos. Esta estrategia supone, por lo tanto, aplicar al suelo menos agua de la que en condiciones de disponibilidad óptima es capaz de evapotranspirar un determinado cultivo únicamente en algunas etapas fisiológicas muy concretas del árbol frutal.

En realidad el riego deficitario controlado fue desarrollado en primera instancia con otros objetivos distintos al del ahorro de agua. De hecho, en Australia, esta práctica cultural se llevó a cabo, por primera vez, para controlar el desarrollo vegetativo de árboles frutales.

Los primeros ensayos se desarrollaron en melocotoneros tardíos (Chalmers *et al.*, 1981) y, posteriormente, en perales (Mitchell *et al.*, 1984). En estos experimentos, el déficit hídrico fue establecido en aquellos momentos en los que la planta experimenta altas tasas de crecimiento de sus estructuras vegetativas y reducidas tasas de crecimiento del fruto. Durante estos periodos

bien determinados, los árboles fueron regados con cantidades inferiores a su ET_c potencial, mientras que se restablecieron dosis de agua normales justo antes del comienzo de la fase de crecimiento rápido del fruto. Estas estrategias permitieron reducir el desarrollo vegetativo del árbol sin mermas en la productividad final del cultivo.

Este concepto de RDC fue posteriormente exportado a otros países con el objetivo añadido de intentar minimizar los gastos hídricos. Si bien es cierto que el RDC es hoy día una técnica ampliamente extendida, menos información existe acerca de la práctica de fertilización que deberá llevarse a cabo en condiciones de RDC. Bajo condiciones de estrés hídrico las necesidades nutritivas pueden ser inferiores con respecto a cuando el riego se lleva a cabo para cubrir la totalidad de las necesidades hídricas del árbol.

5. Balance de energía en los huertos frutales. Técnicas para incrementar la eficiencia en la asimilación

La productividad y el consumo de agua de las plantaciones dependen en gran medida de la cantidad de radiación solar que intercepta el dosel vegetal. En cultivos con un grado de cobertura vegetal del suelo inferior al 100 %, la luz capturada por la vegetación depende tanto del desarrollo vegetativo como del sistema de conducción y del diseño de las plantaciones. Por otro lado, la respuesta fisiológica de las plantas, en particular la estomática, se ve influenciada también por las condiciones ambientales, repercutiendo de forma directa en el intercambio gaseoso. A escala temporal diaria, el nivel de fotosíntesis, la transpiración y por lo tanto la eficiencia en el uso del agua, no solo son función del nivel de radiación interceptada sino también del momento del día en el que dicho nivel se alcanza. Por ejemplo, Corelli-Grappadelli (2003) demostró en manzano que la fotosíntesis de todo el árbol era menor por la tarde que por la mañana, a pesar de que los niveles de radiación interceptada en esos momentos eran iguales. Esto es debido a que, en general, en las horas centrales del día y durante la tarde, la temperatura y el déficit de presión de vapor del aire son mayores que por la mañana, lo que tiene un efecto directo sobre la tasa de evaporación de agua en las hojas. Así pues, al contrario de lo que ocurre con cultivos bajos y tupidos, como en el caso del césped, alrededor de la copa de los viñedos y frutales es menos probable que se formen espesas capas límites de aire que puedan almacenar el agua transpirada por las hojas (Jarvis, 1985).

Para el caso de viñedos en espaldera y los huertos de frutales en palmeta, mayoritariamente plantados en dirección de las filas norte-sur, existe la posibilidad de modificar fácilmente el nivel de radiación interceptada por las plantas a lo largo del día, aumentándolo o disminuyéndolo en función del grado de inclinación de la vegetación con respecto a la dirección de la radiación incidente. En los ambientes mediterráneos, caracterizados por veranos secos y despejados, buena parte de la radiación incidente es de forma directa lo cual justifica la adopción de estas prácticas. La hipótesis de partida es que en aquellas plantaciones de vid y/o frutales en palmeta con orientación de las filas norte-sur, la inclinación de la vegetación hacia el oeste puede incrementar la EUA ya que se reduciría la radiación interceptada por los cultivos en las primeras hora de la tarde, cuando la demanda evaporativa es mayor que a primeras horas de la mañana. Las investigaciones iniciadas recientemente en el marco del proyecto NITROGRAPE AGL2017-83738-C3-3-R han arrojado unos resultados preliminares esperanzadores dado que en la primera campaña de ensayos se pudo incrementar la EUA en un 16 % en plantas inclinadas 30° hacia el oeste frente a verticales (Buesa *et al.*, 2017). Estos resultados se han obtenido en condiciones de riego deficitario y será, por lo tanto, importante corroborarlos durante más años de estudio también en condiciones de secano.

6. Casos de estudio

A continuación se describen ensayos realizados en condiciones de campo donde se evalúa el efecto de la reducción de agua de riego sobre diferentes parámetros.

6.1. Efecto de riego deficitario controlado en paraguayó

Partiendo de la hipótesis de que es posible reducir el riego y los fertilizantes durante periodos fenológicos no críticos sin afectar negativamente a los parámetros productivos del cultivo y de calidad del fruto, debido principalmente a la disminución de la pérdida de nutrientes por debajo del sistema radicular ocasionado por la lixiviación, se planteó un ensayo experimental llevado a cabo en una explotación comercial localizada en el término Municipal de Molina de Segura. El ensayo se realizó en el cultivo del paraguayó, variedad Carioca, de 4 años de edad, injertado sobre patrón híbrido GF677, con un

marco de plantación de 5,5 x 3,5 m. El agua de riego utilizada no superó una conductividad eléctrica de 2 dS/m, durante el período experimental.

Durante 2 años consecutivos (2015/16 y 2016/17) se aplicaron los siguientes tratamientos de riego: un control (T_{CTL}), regado para satisfacer las necesidades hídricas y nutricionales del cultivo; y dos tratamientos de riego deficitario controlado (T_{RDC1} y T_{RDC2}), regados como T_{CTL} durante los periodos críticos (segunda fase de crecimiento rápido del fruto y poscosecha inicial) y al 50 % de T_{CTL} durante la fase poscosecha final (desde mediados de julio a finales de octubre). T_{RDC2} se regó de igual forma que T_{RDC1} , pero reduciendo los fertilizantes en la misma proporción que el riego, por lo tanto la concentración de fertilizantes en el agua de riego fue la misma que en T_{CTL} . La tabla 1 muestra la reducción anual de aportes nutricionales aplicada en el tratamiento T_{RDC2} , respecto al resto de tratamientos, que promedian entre un 32 % de disminución para el fósforo, 19 % para el nitrógeno y un 13 % en el caso del potasio.

Tabla 1. Unidades fertilizantes de los macronutrientes principales aplicadas a los tres tratamientos de riego ensayados durante el período experimental

	Unidades fertilizantes (kg/ha)					
	T_{CTL} y T_{RDC}			T_{RDC2}		
	N	P_2O_5	K_2O	N	P_2O_5	K_2O
2015/2016	94	64	124	75 (-21 %)	45 (-30 %)	104 (-16 %)
2016/2017	94	64	124	77 (-18 %)	43 (-34 %)	110 (-11 %)

El volumen medio de agua aplicado en el tratamiento control fue de unos 7.000 m³ ha-año⁻¹ y el ahorro de agua derivado de la aplicación de los tratamientos de RDC osciló entre 34 y 33 %, para los dos años ensayados, respectivamente (Tabla 2).

Durante el período experimental el estado hídrico del cultivo resultó ser sensible al déficit hídrico aplicado durante el período poscosecha final (a partir de mediados de julio hasta finales de octubre). En el tratamiento control, el potencial hídrico de tallo (Ψ_t , energía con la que es retenida el agua en el tallo) presentó valores medios en torno a -1,00 MPa durante los meses de ma-

yor demanda climática (Gráfico 1), lo que sugiere la ausencia de condiciones limitantes a la transpiración en los árboles de este tratamiento (Pérez-Pastor *et al.*, 2009). Los dos tratamientos de RDC mostraron valores de Ψ_t inferiores al control durante los períodos de riego deficitario; Ψ_t alcanzó valores de -1,50 y de -2,00 MPa, para 2015 y 2016, respectivamente; siendo muy similares en los dos tratamientos de RDC. Ψ_t no presentó diferencias significativas entre tratamientos el resto del año. La máxima contracción diaria del tronco (MCD) también mostró una elevada sensibilidad al déficit hídrico; así, mientras que el control alcanzó valores inferiores a 400 μm durante el período experimental, los dos tratamientos de RDC incrementaron sus valores por encima de 600 μm , en los períodos deficitarios (Gráfico 1).

Tabla 2. Producción, número de frutos (F) por árbol, peso del fruto de paraguay Carioca, riego aplicado y eficiencia del uso del agua de riego (EUA) en los tres tratamientos de riego durante el período experimental

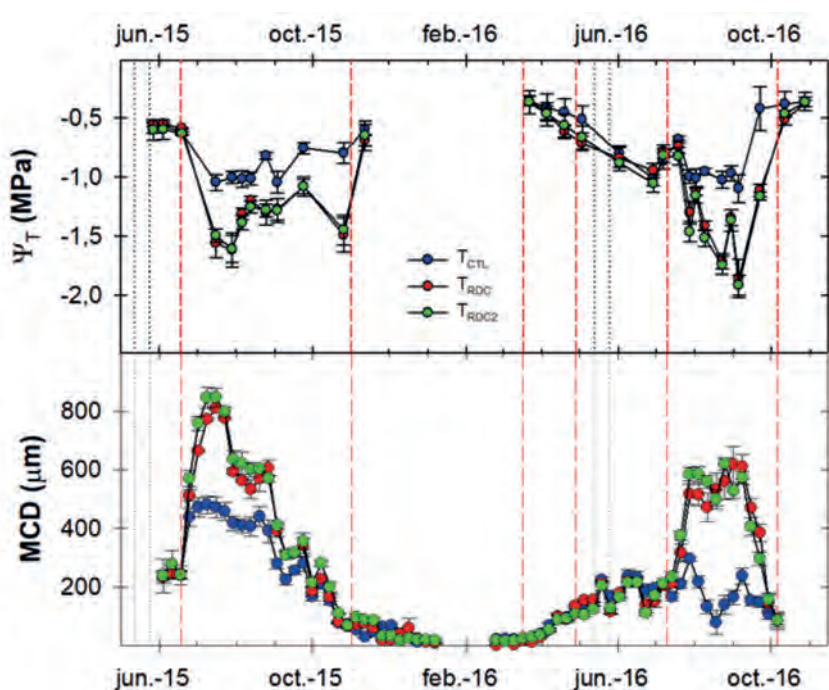
	Tratamiento	Producción (kg/árbol)	Núm. de frutos (núm. fruto/árbol)	Peso fruto (g/F)	Riego (m^3/ha)	EUA (kg/m^3)
2016	T _{CTL}	37,0	425	87,4	6.774	3,3
	T _{RDC}	37,8	435	87,1	4.448 (-34 %)	5,2
	T _{RDC2}	37,5	438	85,7	4.448 (-34 %)	5,1
	Anova	ns	ns	ns	-	-
2017	T _{CTL}	46,8a	561	83,7	7.260	3,9
	T _{RDC}	47,7ab	550	86,6	4.863 (-33 %)	5,9
	T _{RDC2}	53,1b	641	83,2	4.863 (-33 %)	6,6
	Anova	0,045	ns	ns	-	-

La evolución de la sección del tronco durante el período experimental se muestra en Gráfico 1, donde queda clara la influencia del déficit hídrico continuado sobre el tamaño del tronco de los árboles de los tratamientos de RDC, produciendo una disminución significativa de su sección del tronco desde el principio del ensayo. Sin embargo, durante el segundo año, al retrasar el período de aplicación del déficit unos 20 días, la reducción del tronco en los tratamientos deficitarios fue menor, tal y como se observa tanto en la tasa de crecimiento semanal del tronco, como en el crecimiento acumulado (Gráfico 2).

La producción obtenida en los árboles de los tratamientos ensayados se muestra en la Tabla 2. Durante los dos años de estudio (2015/16 y 2016/17),

con un ahorro de agua en torno al 33 %, la producción total y el número de frutos por árbol de los tratamientos de RDC fueron similares a la del control, presentado además T_{RDC2} valores ligeramente superiores al control en el segundo año. La eficiencia en el uso del agua (EUA, kilogramos por m^3 de agua aplicada) mostró valores superiores (25 %) a los del tratamiento control (Tabla 2).

Gráfico 1. Potencial hídrico de tallo (Ψ_T) y máxima contracción diaria del tronco (MCD) para el paraguayo Carioca, en los tres tratamientos de riego durante el período experimental

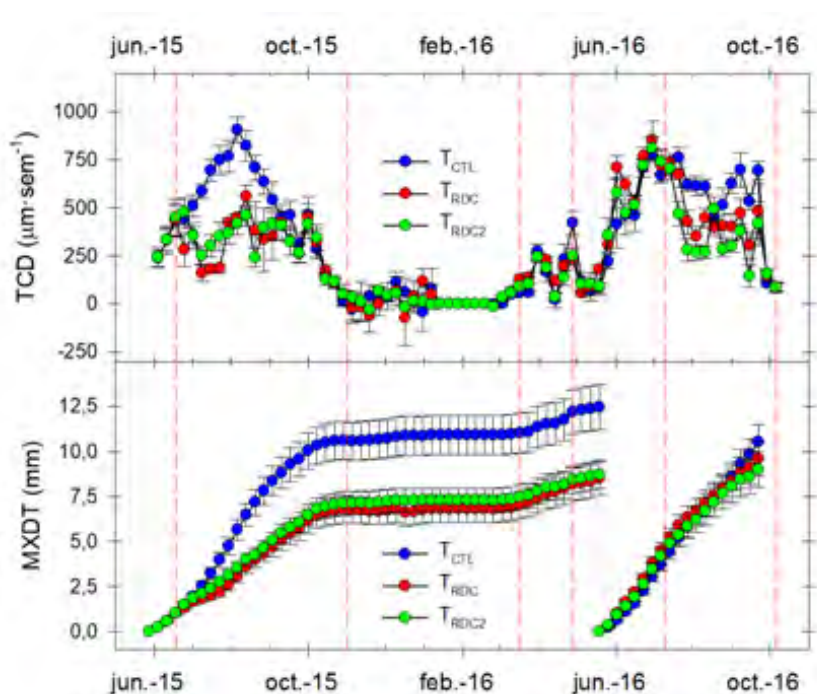


El efecto de los tratamientos de riego sobre las características físicas y químicas estudiadas (firmeza, sólidos disueltos, acidez e índice de madurez) de los frutos no fue significativo, excepto el primer año, en el que se presentaron valores ligeramente más elevados de sólidos disueltos en el tratamiento T_{RDC2} .

Los resultados obtenidos después de 2 años consecutivos, en los que se redujo tanto el agua aplicada como los nutrientes en los porcentajes indicados, han mostrado cómo los principales parámetros productivos estudiados no se

vieron afectados negativamente, tan solo el crecimiento vegetativo sufrió una reducción significativa debido al momento en el que se redujo el agua aplicada (a partir de la segunda quincena del mes de junio) durante el primer año, ya que esta reducción fue de menor importancia en el segundo año, al retrasarse la aplicación del déficit hídrico hasta mediados de julio.

Gráfico 2. Tasa de crecimiento del tronco (TCD) y máximo crecimiento diario del tronco (MxDT) para el paraguayo Carioca, en los tres tratamientos de riego durante el período experimental



Hay que tener en cuenta que en este cultivo la reducción de agua y nutrientes tuvo lugar durante el período poscosecha final, momento en el que aunque existe una elevada demanda climática las necesidades nutricionales del cultivo no son tan elevadas como en otras fases fenológicas, aunque se deben de asegurar la acumulación de reservas en los tejidos para el inicio del siguiente ciclo de cultivo.

6.2. Efecto de riego deficitario controlado en cítricos

En este contexto de optimización del consumo de agua de riego y reducción de la contaminación por nitrato de los acuíferos se realizó un ensayo en una parcela comercial de la variedad clementina de Nules (*Citrus clementina*, Hort ex Tan) injertados sobre citrange Carrizo (*Citrus sinensis*, Obs X *Poncirus trifoliata* L., Raf) de 10 años de edad (diámetro de copa de 3,25 m) y con un marco de plantación 3,5 m x 4,8 m. La parcela tenía un suelo básico (pH = 8,2) y textura franco-arenosa, con bajos contenidos en materia orgánica y caliza activa. El agua de riego presentaba una conductividad eléctrica de 2,0 mS cm⁻¹, un contenido medio en nitrato de 273 mg L⁻¹ y altas concentraciones de calcio y magnesio, 211 y 103 mg L⁻¹, respectivamente.

Con el objetivo de evaluar el efecto del RDC aplicado mediante dos sistemas de riego a goteo, superficial (S) y enterrado (E) sobre la producción, calidad del fruto y estado nutritivo del arbolado, se realizaron diferentes reducciones de la dosis de agua necesaria para cubrir las necesidades hídricas de las plantas:

- 1) Riego convencional (RC), 100 % de ET_c durante todo el ciclo vegetativo.
- 2) Riego deficitario controlado (RDC) con la aplicación del 100 % ET_c desde el inicio de la brotación-floración de primavera (marzo) hasta el cuajado del fruto (principio de julio) y el 70 % ET_c desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo.
- 3) Riego deficitario controlado (RDC) con la aplicación del 100 % ET_c desde el inicio de la brotación-floración de primavera (marzo) hasta el cuajado del fruto (principio de julio) y riegos alternativos con el 40 o 100 % ET_c desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo.

Dando lugar a los seis tratamientos detallados en la Tabla 3. En cada uno de los tratamientos se realizaron tres réplicas de 18 árboles cada una, aunque en algunos de los mismos una de las repeticiones tan solo tenía 15 árboles.

El riego enterrado disponía de goteros especialmente diseñados para esta aplicación, que fueron enterrados a 30 cm de profundidad. Ambos sistemas de riego se aplicaban mediante dos líneas portagoteros por hilera situadas a

una distancia de 100 cm del tronco y ocho emisores autocompensantes por árbol (caudal de 4 L h⁻¹).

La ETc se determinó según Penman-Monteit (Allen *et al.*, 1998) con los datos procedentes de la estación agroclimática del IVIA y el coeficiente de cultivo (Kc) se obtuvo de acuerdo al porcentaje de área sombreada (Castel, 1991). La ETc dio lugar a unas necesidades hídricas teóricas de 5.319 m³ ha-año⁻¹ en RC y de 4.422 m³ ha-año⁻¹ en RDC (Tabla 4). En ninguno de los tratamientos realizados se disminuyó el aporte de nutrientes, aplicándose en todos ellos 570, 120, 475 y 1,5 g árbol-año⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O y Fe, respectivamente. En el caso del N, el aportado por el agua fue del 42,6 % de la dosis de N.

Tabla 3. Tratamientos realizados en función de la dosis de agua aportada y el sistema de riego utilizado

Tratamientos	Sistema Riego	% ETc	Número de árboles
S-RC	Superficial	100	51
E-RC	Subterráneo	100	54
S-RDC ₇₀	Superficial	70	54
E-RDC ₇₀	Subterráneo	70	51
S-RDC _{40/100}	Superficial	40-100	51
E-RDC _{40/100}	Subterráneo	40-100	54

Tabla 4. Reducción de los aportes de agua en los diferentes tratamientos

Tratamientos	ETc (m ³ ha-año ⁻¹) ^Z	Riego (m ³ ha-año ⁻¹)	RC/RDC Riego (%) ^Y	RC/RDC Total (%) ^X
S/E-RC	5.319	3.350	0,0	0,0
S/E-RDC ₇₀	4.424	2.511	25,0	16,8
S/E-RDC _{40/100}	4.420	2.507	25,2	16,9

Z: Dosis de agua aportada por la precipitación (1913) y agua de riego.

Y: Ahorro de agua de riego con el RDC con respecto al riego convencional con ambos sistemas de riego.

X: Ahorro de agua aportada a la plantación con el RDC con respecto al riego convencional con ambos sistemas de riego.

Al final del ciclo vegetativo, la aplicación de déficit hídrico del 70 % o con riegos alternos 40/100 %, desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo, dio lugar a un ahorro de agua cercano al 17 % frente al riego convencional, si

tenemos en cuenta el agua total de riego aportada (lluvia y riego) y del 25 % del volumen de agua de riego aplicado.

La concentración foliar de P, K, Ca, S, Na, Fe, Cu y B se encontró dentro de los rangos considerados óptimos según las tablas de referencia establecidas en cítricos (Quiñones *et al.*, 2010). Sin embargo, el N no alcanzó el nivel óptimo, posiblemente debido a la alta producción obtenida, y el Zn y el Mn tampoco, principalmente debido a el bajo aporte de micronutrientes realizado. Por otro lado, el Mg presentó un nivel ligeramente alto debido, principalmente, a la elevada concentración de este elemento en el agua de riego. La disminución en el aporte de agua no originó, en general, diferencias significativas en el estado nutritivo de la plantación (Tabla 5). En la concentración foliar de fósforo, las plantas que recibieron déficit hídrico del 70 % en momentos no críticos del ciclo vegetativo, presentaron una concentración foliar de K significativamente superior al del resto de tratamientos. Además, los dos sistemas de riego deficitario mostraron un valor más elevado de Na foliar, aunque muy inferior al considerado tóxico para las plantas (< 0,16 %) y de Zn, siendo la concentración de este elemento superior, también, en los árboles regados con riego a goteo enterrado.

Tabla 5. Concentración de macros y microelementos en las hojas de brotación de primavera muestreadas en noviembre

Tratamiento	SR	% (peso seco)						ppm (peso seco)					
		N	P	K	Mg	Ca	S	Na	Fe	Zn	Mn	Cu	B
RC	S	2,25	0,12	0,76	0,49	3,6	0,24	0,06	56,1	12,5	20,3	5,4	58,4
	E	2,28	0,11	0,71	0,46	3,5	0,24	0,05	68,5	13,1	22,7	6,1	69,1
RDC ₇₀	S	2,27	0,12	0,85	0,53	3,5	0,24	0,07	64,7	13,1	20,8	5,8	65,3
	E	2,22	0,12	0,86	0,48	3,5	0,23	0,06	72,1	14,4	21,7	6,0	62,9
RDC _{40/100}	S	2,20	0,11	0,75	0,48	3,3	0,21	0,07	59,2	13,8	21,1	6,0	59,1
	E	2,27	0,12	0,75	0,48	3,5	0,24	0,06	62,8	15,0	20,9	6,8	60,2
	SR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
	DR	ns	ns	*	ns	ns	ns	*	ns	*	ns	ns	ns

ns: diferencias no significativas entre tratamientos, debidas a los distintos factores analizado (SR o DR).

* Diferencias significativas para $p < 0,05$.

En cuanto a la producción y número de frutos por árbol, el sistema de riego empleado afectó significativamente, obteniéndose una mayor cosecha (kg y número frutos) en los árboles regados mediante riego enterrado. Esto dio lugar a una mayor eficiencia de absorción tanto del agua aportada como de uso del nitrógeno (Tabla 6).

Tabla 6. Producción y eficiencia de uso del agua de riego (EUA) y del nitrógeno aportado (EUN) al final del ciclo

Tratamiento	SR	Producción Kg árbol ⁻¹	Peso fruto (g)	Núm. frutos árbol ⁻¹	EUA (kg m ⁻³) ^Z	EUN (kg kg ⁻¹) ^Y
RC	S	44,5	111	402	4,98	78,07
	E	53,0	104	521	5,93	92,98
RDC ₇₀	S	35,9	107	334	4,83	62,98
	E	47,9	105	482	6,44	84,04
RDC _{40/100}	S	29,9	101	296	4,03	52,46
	E	46,3	106	439	6,23	81,23
SR		*	ns	**	*	*
DR		ns	ns	*	ns	ns

Z: Eficiencia del uso del agua (EUA) calculada como producción obtenida (kg)/ volumen de agua aportada (m³).

Y: Eficiencia del uso del nitrógeno (EUN) calculada como producción obtenida (kg)/N aportado (kg).

La mayor EUA se obtuvo en el tratamiento E/RDC₇₀, mientras que la mayor EUN se observó en el tratamiento E/RC. En cuanto al riego deficitario, la producción tendió a disminuir (aunque sin ser significativo el efecto) cuando se realizan aportes alternantes de 40 y 100 % de la ET_c, en mayor medida que del 70 %, frente al riego convencional. Esto es debido a que el número de frutos fue significativamente inferior en estos tratamientos.

El análisis de los resultados de todas las campañas de desarrollo del ensayo permitiría corroborar si los resultados obtenidos se repiten en el tiempo. Además, dado que se observan diferencias en la EUN, se deberían hacer aportes diferenciales para comprobar si se mantiene estas diferencias.

7. Conclusiones

La agricultura es en España el principal sector económico demandante de agua dado que utiliza cerca del 60 % de los recursos hídricos disponibles (FAO, 2013). Por lo tanto es necesario buscar fórmulas para optimizar la EUA en la agricultura. En este trabajo se han expuestos distintas alternativas agronómicas para incrementar la EUA de los cultivos leñosos mediterráneos. En el caso de la vid es posible manipular la vegetación y el sistema de conducción para buscar diseños de la plantación que permitan utilizar de forma más eficiente la radiación solar disponible. En cítricos, el riego subterráneo es una técnica de riego que permite notables incrementos en la EUA al anular la evaporación de agua desde el suelo, un componente improductivo del balance hídrico de los frutales. Finalmente en el caso del paraguayo se ha puesto de manifiesto que el riego deficitario controlado, en combinación con una restricción de los aportes de fertilizantes, permite incrementar de forma simultánea tanto la eficiencia en el uso del agua como la de los nutrientes. Aspecto de gran interés para minimizar las externalidades negativas sobre el medio-ambiente de una práctica de riego intensiva.

Referencias bibliográficas

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. y SMITH, M. (1998): «Crop evapotranspiration (gridlines for computing crop water requirements)»; *FAO Irrigation and Drainage. Paper 56*. Roma, FAO.
- BUESA, I.; CACCAVELLO, G.; MERLI, M. C.; PUERTO, H.; RUIZ-CANALES, A.; MOLINA, J. M. y INTRIGLIOLO, D. S. (2017): «Vineyard trellis system orientation and inclination effects on water use efficiency and productivity of potted and field-grown grapevines»; *Acta Horticulturae* 1150; pp. 463-470.
- CASTEL, J. R. (1991): «El riego de los cítricos»; *Hortofruticultura* 5; pp. 41-52.
- CHALMERS, D. J.; MITCHELL, P. D. y VAN HECK, L. (1981): «Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning»; *Journal of the American Society for Horticultural Sciences* 106; pp. 307-312.
- CORELLI-GRAPPADELLI, L. (2003): «Light relations»; en FERREE, D. C. y WARRINGTON, I. A., eds.: *Apples: botany, production and uses*. Reino Unido, Oxon, Wallingford, CAB International; pp. 195-216.

- EUROSTAT (2003): [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY OFFPUB/KS-32-10-283/EN/KS-32-10-283-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-32-10-283/EN/KS-32-10-283-EN.PDF).
- FAO (2013): FAO's Information System on Water and Agriculture ACQUAS-TAT; <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/results.html>.
- FERERES, E.; GOLDHAMER, D. y PARSONS, L. (2003): «Irrigation water management of horticultural crops»; *Hort Science* (38); pp. 1036-1042.
- FERERES, E. y SORIANO, M. A. (2007): «Deficit irrigation for reducing agricultural water use»; *Journal of Experimental Botany* (58); pp. 147-159.
- FERNÁNDEZ RUIZ, L.; DANÉS CASTRO, C. y OCAÑA ROBLES, L. (2005): «Metodología de evaluación preliminar de presiones e impactos en las masas de agua subterránea»; *VI Simposio del Agua en Andalucía. IGME*. Tomo II; pp. 1197-1208.
- HSHAO, T.; STEDUTO, P. y FERERES, E. (2007): «A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency»; *Irrigation Science* (25); pp. 209-231.
- JARVIS, P. G. (1985): «Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor»; *Acta Horticulturae* (171); pp. 187-205.
- KATERJI, N. y RANA, G. (2006): «Modelling evapotranspiration of six irrigated crops under Mediterranean climate conditions»; *Agriculture and Forest Meteorology* (138); pp. 142-155.
- MAGRAMA (2016): *Anuario de estadística agraria 2015*; pp. 1047.
- MATSON, P.; PARTON, W. G.; POWER, A. G. y SWIFT, M. G. (1997): «Agricultural intensification and ecosystem properties»; *Science* (277); pp. 504-509.
- MITCHELL, P. D.; HERIE, P. H. y CHALMERS, D. J. (1984): «The effects of regulated water deficit on pear tree growth, flowering, fruit growth and yield»; *Journal of the American Society for Horticultural Sciences* (109); pp. 604-606.
- NICOLÁS, E.; ALARCÓN, J. J.; MOUNZER, O.; PEDRERO, F.; NORTES, P. A.; ALCOBENDAS, R.; ROMERO-TRIGUEROS, C.; BAYONA, J. M. y MAESTRE-VALERO, J. F. (2016): «Long-term physiological and agronomic responses of mandarin trees to irrigation with reclaimed water»; *Agriculture Water Management* (166); pp. 1-8.
- PÉREZ-PASTOR, A.; DOMINGO, R.; TORRECILLAS, A. y RUIZ-SÁNCHEZ, M. C. (2009): «Response of apricot trees to deficit irrigation strategies»; *Irrigation Science* (27); pp. 231-242.

- QUIÑONES, A.; MARTÍNEZ-ALCÁNTARA, B.; PRIMO-MILLO E. y LEGAZ, F. (2010): «Abonado de los cítricos (193-204)»; en *Guía Práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino.
- RITCHIE, R. (1972): «Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover»; *Water Resource Research* (8); pp. 1204-1213.
- RUIZ-SÁNCHEZ, M. C.; DOMINGO, R. y CASTEL, J. R. (2010): «Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain: a review»; *Spanish Journal of Agricultural Research* (8); pp. 5-20.
- TILMAN, D.; CASSMAN, K. G.; MATSON, P.; NAYLOR, R. y POLASKY, S. (2002): «Agricultural sustainability and intensive production practices»; *Nature* (418); pp. 671-677.
- UNITED NATIONS (2015): *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*; pp. 3-35.

