EVALUACIÓN DEL LAVADO DE NITRATOS EN FUNCIÓN DE LA DÓSIS Y FRECUENCIA DE RIEGO EN UN CULTIVO DE TOMATE PARA INDUSTRIA

N. Vázquez, M. Quemada*, A. Pardo, M.L. Suso
Centro de Investigación y Desarrollo Agrario. Ctra. Mendavia – Logroño NA 134. 26071 Logroño.
* Dpto de Producción Vegetal: Fitotecnia. U.P. Madrid.

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo han sido evaluar el lavado de nitratos, optimizar el riego y reducir las pérdidas de nitrógeno en un cultivo de tomate de industria en riego por goteo y acolchado plástico en las condiciones del valle medio del Ebro. Para ello se establecieron en un suelo Xerochrept calcixerollico de la finca Valdegón (C.I.D.A., La Rioja) dos ensayos en los años 2000 (ensayo 1) y 2001 (ensayo 2).

En el ensayo 1 se compararon dos sistemas de manejo del suelo: desnudo (S1) y acolchado plástico (S2) y dos dosis de riego por goteo R1 y R2 ajustadas a la evapotranspiración del cultivo (ETc) de cada sistema, generándose cuatro tratamientos, S1R1 y S2R2 con las dosis de riego ajustadas a sus necesidades y S1R2 y S2R1 con las dosis de riego ligeramente excedentaria y deficitaria respectivamente. En el ensayo 2 se compararon cuatro sistemas de manejo del riego: riego tradicional con aportaciones masivas en trasplante y un riego diario en el cultivo en base a la ETc (T1R1), riego masivo en trasplante y alta frecuencia durante el cultivo del 80% de la ETc (T1R2), alta frecuencia en el trasplante y durante el cultivo del 100% de la ETc (T2R3) y alta frecuencia en el trasplante y durante el cultivo del 80% de la ETc (T2R2).

Para cuantificar el lavado de nitrato a 1 m de profundidad, se multiplicó el volumen de drenaje por la concentración de nitratos de la solución del suelo a esa profundidad. El drenaje se estimó midiendo el contenido de agua en el perfil del suelo semanalmente y resolviendo la ecuación de balance de agua del suelo. La solución del suelo a 1 m se extrajo con cápsulas de cerámica conectadas a cañas de vacío. Se calcularon el drenaje y las pérdidas de nitrato en dos fases del cultivo: trasplante y cultivo.

En el ensayo 1, los valores del drenaje sobre el total de agua aplicada, representaron el 24,9% en S1R1, 32,3% en S1R2, 29,6% en S2R1 y 31,6% en S2R2. Las pérdidas de nitrógeno sobre el inicial más el aportado en la fertilización fueron del 62,8; 91,4; 59,0 y 43,5% respectivamente. Más del 65% de las pérdidas se produjeron en la fase de trasplante. En los tratamientos de aporte masivo de agua en la fase de trasplante del ensayo 2, se ha aplicado el 26% (T1R1) y 31% (T1R2) del total de agua de riego frente al 15% (T2R3) y 17% (T2R2) en los tratamientos de riego de alta frecuencia. En el periodo de cultivo el riego tradicional (en forma de un riego diario) drenó un 16% del agua de lluvia y del riego, mientras que los riegos de alta frecuencia al 80% de la ETc no se obtuvo un drenaje significativo. El lixiviado de nitrógeno en la fase de trasplante constituyó el 73% del nitrógeno lavado en T1R1 y prácticamente la totalidad en el resto.

Las mayores pérdidas de agua y nitrógeno ocurrieron en la fase de trasplante. Aumentar la frecuencia de riego permitió reducir la aportación de agua manteniendo la producción y optimizando el uso de agua y nitrógeno. Se discute el valor de los coeficientes Kc en los sistemas con acolchado plástico.

Palabras clave: *Lycopersicon sculentum*, riego por goteo, acolchado plástico.

SUMMARY

INFLUENCE OF IRRIGATION DOSE AND FRECUENCY IN NITRATE LEACHING IN CROP PROCESSING TOMATO

The objective of this study was to evaluate nitrate leaching, to optimise water use and to reduce nitrate leaching in tomato cropped with drip irrigation and plastic mulch, and following the management techniques of the medium Ebro valley. To achieve our goal we conducted in Valdegón (La Rioja), over a Xerochrept calcixerollic soil two fields experiments in 2000 (experiment 1) and 2001 (experiment 2) years with tomato cv. Brigade.

In the experiment 1 tomato was cultivated under two different management techniques: bare soil (S1), and plastic mulch (S2), and two different water doses of drip irrigation: R1 and R2, both estimated from the crop evapotranspiration (ETc) calculated for each soil management technique. Therefore, we had two treatments where the irrigation dose was adjusted to crop needs, S1R1 and S2R2, one treatment with water limitation, S2R1, and one treatment that received excess of water. In the experiment 2 tomato was cultivated under four different irrigation strategies: large dose at planting followed by daily irrigation equal to the ETc during the cropping period (T1R1), large dose at planting followed by daily irrigation equal to the 80% ETc (T1R2), reduced dose and high frequency at planting followed by high frequency during the cropping period (T2R3 if water applied was 100% ETc, and T2R2 if it was 80% ETc).

To evaluate nitrate leached to 1 m depth, the drainage volume was multiplied by the nitrate concentration of the soil solution at that depth. Drainage was calculated by weekly measuring the water content of the soil profile and applying the water balance equation. The soil solution at 1 m depth was extracted by porous ceramic cups and was analysed for nitrate. Drainage and nitrate leaching were evaluated for two different crop periods: planting, and cropping.

In the experiment 1, cumulative drainage accounted for 24,9% of total water applied for S1R1, 32,3% for S1R2, 29,6% for S2R1 and 31,6% for S2R2. Nitrate leaching was 62,8% of the initial plus the applied as fertilizer for S1R1, 91,4 for S2R1, 59,0 for S2R1 and 43,5 for S2R2. The larger water and nitrate losses took place during the period of planting.

Most of the water applied at planting in the experiment 2, was lost by percolation, probably due to the high soil permeability. During the cropping period, cumulative drainage accounted for 16% of total water applied for T1R1, while it was not relevant for the other treatments. Nitrate leaching for all treatments was only significant during the planting period, except for T1R1 were 27% of the total nitrate leached took place during the cropping period. Increasing frequency irrigation allowed to reduce water application, maintaining yield and optimising water and nitrogen use.

The Kc values in mulched crop systems are discussed.

Key words: *Lycopersicon sculentum*, drip irrigation, plastic mulch.

INTRODUCCIÓN

El uso del riego localizado y del acolchado con plástico negro es una técnica cuyo uso se ha incrementado notablemente en los últimos años en los cultivos hortícolas al aire libre del valle del Ebro. En algunos cultivos, como el tomate de industria en Navarra, se aplica en más del 80% de la superficie. El acolchado plástico es una técnica antigua, muy extendida en la producción hortícola entre cuyos efectos caben destacar el incremento de la temperatura del suelo así como el aumento de la precocidad

y producción (Tarara, 2000). Otra técnica ampliamente utilizada en el cultivo de hortícolas es el riego localizado (Hartz, 1996), habiendo sido descritos sus efectos sobre el tomate de industria por Prieto *et al.* (1998) y Pardo *et al.* (2001). El acolchado plástico potencia las ventajas del riego localizado; el riego por goteo y acolchado en tomate de industria proporciona una mejor eficiencia en el uso del agua, pero su manejo ha de contemplarse en función de las características del suelo (Pardo *et al.*, 2001).

Además en el riego por goteo se pueden suministrar nutrientes disueltos en el agua, con lo que se permite su distribución uniforme en el tiempo y en el espacio. De esta forma, se puede reducir el uso de fertilizantes mejorando la calidad del agua drenada (Hartz y Hochmuth, 1996).

Las prácticas habituales en los cultivos hortícolas de trasplante en el valle del Ebro que utilizan sistemas de riego por goteo y acolchado plástico, consisten en la aplicación de riegos masivos en la fase del transplante. Se trata de riegos excedentarios destinados a humectar la parte superior del perfil del suelo y asegurar de esta forma la supervivencia de las plántulas. Una vez asegurada ésta, el cultivo se mantiene mediante riegos de frecuencia entre uno y dos días hasta poco antes de la recolección. La mayor parte de la superficie del cultivo de tomate para industria se realiza actualmente con estas técnicas.

Con el fin de estudiar este sistema de cultivo y optimizar la aplicación de agua y nutrientes de modo que permita mejorar las pautas de manejo a los usuarios, se estableció un ensayo en el año 2000 para evaluar el lavado de nitratos en un cultivo de tomate en riego por goteo y acolchado plástico y otro ensayo en el año 2001 para optimizar el riego y reducir las pérdidas de nitrógeno en este sistema de cultivo, a través de un manejo más adecuado de la frecuencia y dósis de riego.

MATERIAL Y MÉTODOS

Los ensayos se han realizado durante los años 2000 y 2001 en la finca del CIDA en Valdegón, situada en el valle del Ebro, con la capa freática a una profundidad superior a cuatro metros. Las características más relevantes del suelo, clasificado como Xerochrept calcixerollico (franco-gruesa, mezclada, mésica), aparecen en el Cuadro 1.

Cuadro 1- Propiedades físico-químicas del suelo.

Arena (2,0 – 0,02 mm) (%)	9	pH (1:2,5)	8,1
Limo (0,02 – 0,002 mm) (%)	43	C.E. ($mSxcm^{-1}$)	0,3
Arcilla (< 0,002 mm) (%)	48	Humedad 0,3 bar (%)	30
Textura I.S.S.S.	Arcilloso fina	Humedad 15 bar (%)	18
M.O. oxidable (%)	1,8	Permeabilidad ($cmxh^{-1}$)	4

Ensayo 1

En el año 2000 y en un cultivo de tomate (*Lycopersicon sculentum* Mill) var. Brigade, se compararon dos sistemas de manejo del suelo, desnudo (S1) y acolchado con plástico negro (S2) y dos dosis de riego diferentes calculadas en función de la ETc del cultivo en ambos sistemas como se presenta en el cuadro 2. Una información más detallada sobre los volúmenes de agua aplicados aparecen en los cuadros 9 y 11.

Siguiendo las técnicas agronómicas habituales en la zona, en los períodos trasplante se realizaron riegos masivos de 20 h para humectar el perfil superior del suelo.

El trasplante se realizó el 16 de Mayo a una densidad de 33.333 plantas/ha, en mesetas de 1 m, separadas 1,5 m entre ejes. La parcela elemental constaba de cuatro mesetas de 30 m de longitud. El plástico utilizado fue PE negro de 0,015 mm de espesor y 1,20 m de anchura. La cinta de goteo con emisores cada 0,2 m y un caudal unitario de 1 lh^{-1} a 0,55 bar.

La fertilización consistió en la aplicación de 110-120-180 kg ha^{-1} de NPK. En fondo se aplicaron a todas las parcelas 60-120-180 kg ha^{-1} de NPK en forma de complejo 9-18-27. En cobertera se aplicaron 50 kg ha^{-1} de N en forma de fertilizante líquido N32, realizándose seis aplicaciones semanales a partir de la cuarta semana desde el trasplante.

La recolección del tomate se realizó cuando se había alcanzado aproximadamente el 80% de frutos maduros, cosechándose 10 m de longitud (15 m^2) en la linea central. Se controló la producción total y comercial. En el suelo acolchado la recolección se efectuó el 7/09 y en suelo desnudo el 15/09/2000.

Ensayo 2

En el año 2001 y utilizando la misma especie y variedad con acolchado plástico negro y riego localizado por goteo, se ensayaron los tratamientos de riego que se presentan en el cuadro 2, siendo el T1R1 el correspondiente a la práctica habitual en la zona y equivalente al tratamiento S2R2 del ensayo 1. Una información más detallada sobre los volúmenes de agua aplicados aparecen en los cuadros 10 y 12. El trasplante se realizó el 17 de Mayo con un diseño similar al presentado en el ensayo 1.

La fertilización consistió en la aplicación de 50-190-90 kg ha^{-1} de NPK teniendo en cuenta la fertilidad existente en el suelo. En fondo se aplicaron a todas las parcelas 0-190-90 kg ha^{-1} de NPK en forma de complejo 0-14-7. En cobertera se aplicaron 50 kg ha^{-1} de N de modo similar al ensayo 1.

La recolección del tomate se realizó cuando se había alcanzado aproximadamente el 80% de frutos maduros (29/08/2001), cosechándose tres parcelas de 5 m de longitud (7,5 m^2) en las dos lineas centrales. Se controló la producción total y comercial. El nitrógeno absorbido por la planta se calculó como la suma del absorbido en frutos, hojas y tallos, siendo éste el resultado de multiplicar la concentración de nitrógeno determinado por Kjeldahl (AOAC, 1990) en cada una de las partes de la planta, por la materia seca producida.

La ET_0 en ambos ensayos fue calculada por el método de FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1994). La evapotranspiración del cultivo, ETc, se ha calculado diariamente a través de la expresión: $ETc = Kc \times ET_0$. Los coeficientes de cultivo Kc utilizados en ambos ensayos aparecen en el cuadro 3 y para su aplicación fueron corregidos en función de la velocidad del viento, la humedad relativa mínima y la altura de la planta; se ha realizado una corrección en función de la fracción de suelo mojada y debido a la presencia del acolchado se han considerado los coeficientes basales, según la propuesta de Allen *et al.* (1997), Pereira *et al.* (1998) y Luc (1998). Se ha considerado la lluvia útil aquella superior a 10 mm en sucesos aislados o superior a 15 mm en períodos de tres días. A efectos de programación del riego se ha utilizado un tercio del valor de la lluvia útil (Luc, 1998).

El corte del riego se produjo 11 y 7 días antes de la recolección en los sistemas con suelo desnudo y acolchado respectivamente (ensayo 1). En el ensayo 2 el corte del riego se produjo 8 días antes de la recolección. La eficiencia en el uso del agua se

cálculo como la relación entre la cosecha comercial obtenida y el volumen de agua aportado (riego más lluvia).

Cuadro 2.- Tratamientos de riego aplicados al cultivo de tomate.

a) Ensayo 1

Trat.	Manejo del suelo	Fase de trasplante	Fase de cultivo
S1R1	Desnudo	Riegos masivos (20 horas)	1 riego diario al 100% de la ETc para suelo desnudo.
S1R2	Desnudo	Riegos masivos (20 horas)	1 riego diario al 100% de la ETc para suelo acolchado (excedentario).
S2R1	Acolchado	Riegos masivos (20 horas)	1 riego diario al 100% de la ETc para suelo desnudo (deficitario).
S2R2	Acolchado	Riegos masivos (20 horas)	1 riego diario al 100% de la ETc para suelo acolchado.

b) Ensayo 2 (Todos los tratamientos con suelo acolchado)

Trat.	Fase de trasplante	Fase de cultivo
T1R1	Riegos masivos (8 a 10 horas)	1 riego diario al 100% de la ETc
T1R2	Riegos masivos (8 a 10 horas)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 80% de la ETc
T2R3	Riegos de alta frecuencia (8 riegos diarios de 15 minutos)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 100% de la ETc.
T2R2	Riegos de alta frecuencia (8 riegos diarios de 15 minutos)	Riego de alta frecuencia (4 a 8 riegos diarios) al 80% de la ETc.

En cada una de las parcelas se instalaron seis tubos hasta 1 m de profundidad para el acceso de una sonda TDR. Los tubos se colocaron transversalmente a la línea de goteo en una anchura de 1,25 m y separados 0,25 m entre sí. Las medidas se realizaron semanalmente y con los datos obtenidos se ha cuantificado la variación de la reserva (VR) de agua en el suelo en el periodo estudiado.

Así mismo se instalaron seis cañas de vacío por parcela (Lord y Shepherd, 1993), provistas de una cápsula cerámica para la recogida de muestras de solución del suelo a 1 m de profundidad. Tres de ellas estaban situadas en la línea de goteo y las otras tres en una línea paralela a la misma a 0,75 m, en el centro de la calle. Semanalmente se recogió la solución del suelo y se analizó su contenido en nitratos por colorimetría, previa reducción en columna de cadmio (Keeney y Nelson., 1982).

Cuadro 3.- Coeficientes de cultivo (Kc) aplicados al cultivo de tomate en riego por goteo con suelo desnudo y suelo acolchado.

Estado de desarrollo del cultivo	Suelo desnudo	Suelo acolchado
Trasplante-10% suelo cubierto	0,15	0,15
10-30% suelo cubierto	0,30	0,30
30-50% suelo cubierto	0,60	0,55
50-80% suelo cubierto	1,00	0,90
80% sc-10% frutos maduros	1,20	1,10
10-50% frutos maduros	1,05	1,00
50-80% frutos maduros	0,75	0,70

Al inicio y al final del ensayo se realizó un perfil de contenido de nitratos y amonio del suelo en 1 m de profundidad, tomándose las muestras cada 0,2 m. Se realizó un extracto con ClK 1 M y se analizó el contenido en nitratos por colorimetría, previa reducción en columna de cadmio (Keeney y Nelson, 1982).

Para el cálculo de los balances de agua y nitrógeno se ha dividido el cultivo en dos fases. La fase de trasplante, hasta el 6 de junio en en ensayo 1 y hasta el 24 de mayo en el ensayo 2, y la fase de cultivo desde estas fechas hasta la recolección. Se ha realizado un balance de agua en el suelo hasta 1 m de profundidad según la expresión:

$$P+R = ETc \pm VR + D$$

donde P es la precipitación, R el agua aplicada en el riego, ETc la evapotraspiración del cultivo calculada, VR es la variación de la reserva de agua en el suelo y D es el drenaje.

El lavado de nitrato por debajo de 1 m., se ha calculado multiplicando el drenaje estimado (según la ecuación anterior) por la concentración media de nitratos de cada periodo en la solución del suelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros de la cosecha más representativos del ensayo 1, aparecen en el cuadro 4. La producción en los sistemas con acolchado fue superior debido principalmente al mayor número de frutos, aunque de menor tamaño. Estos resultados son similares a los obtenidos en un trabajo anterior (Pardo *et al.*, 2001).

En el ensayo 2, todos los tratamientos se mostraron más productivos que el considerado como práctica habitual en la zona (T1R1) dentro de una escala de rendimientos muy elevada (Cuadro 5). Las diferencias significativas en la producción comercial son atribuibles al mayor número de frutos por m^2 y el tratamiento habitual en la zona, con un única aplicación diaria de riego, presentó el menor número de frutos aunque de mayor tamaño. Por tanto los tratamientos de alta frecuencia en el trasplante y el fraccionamiento del riego durante el cultivo, incluso con una reducción del aporte de agua equivalente al 80% de la ETc, han sido suficientes para asegurar el arraigo de las plantas, al igual que los riegos masivos, y obtener las mayores producciones y eficiencias en el uso del agua (Cuadros 5 y 6).

Cuadro 4. Resultados de la cosecha de tomate var. Brigade en el ensayo 1 (año 2000).

Parcela	Comercial t/ha	No comercial t/ha	Peso fruto comercial g/fruto	N° frutos comerciales frutos/m^2
S1R1	104,2	26,3	65,7	159
S1R2	109,0	40,1	66,0	165
S2R1	113,5	27,7	59,8	190
S2R2	127,3	46,8	61,2	208

Cuadro 5. Resultados de la cosecha de tomate var. Brigade en el ensayo 2 (año 2001).

Parcela	Comercial t/ha	No comercial t/ha	Peso fruto comercial g/fruto	N° frutos comerciales Frutos/m2
T1R1	112,9 b	32,3	67,1 a	168 b
T1R2	126,7 ab	31,2	58,7 b	216 a
T2R3	134,0 a	41,7	62,6 b	214 a
T2R2	121,5 ab	29,0	60,0 b	203 a

Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos dentro de cada columna según la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 6.- Eficiencia del uso del agua en los diferentes sistemas de cultivo.

Parcela	Eficiencia en el uso del agua $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$	Parcela	Eficiencia en el uso del agua $kg.ha^{-1}.mm^{-1}$
S1R1	123,7	T1R1	158,1
S1R2	117,1	T1R2	201,4
S2R1	152,8	T2R3	211,6
S2R2	161,1	T2R2	226,4

El contenido de nitrato del suelo en todas las parcelas del ensayo 1, era muy elevado al inicio del experimento (Cuadro 7), a pesar de lo cual se aplicó fertilización mineral nitrogenada para reproducir las técnicas agronómicas de la zona. Al final del ensayo el contenido de nitrato del suelo disminuyó drásticamente. Las pérdidas de nitrato por lixiviación expresadas como porcentaje del inicial más el N mineral aportado en la fertilización fueron del 62,8% en S1R1, 91,4% en S1R2; 59,0% en S2R1 y 43,5% en S2R2.

Los resultados del balance global de nitrógeno durante el período completo de cultivo en el ensayo 2, aparecen en el cuadro 8. El lavado de nitratos, muy elevado en el caso del riego tradicional (T1R1), se redujo casi en dos tercios mediante la utilización de riegos de alta frecuencia en las dos fases del cultivo y reducción de la dósis durante el cultivo (T2R2). El contenido de nitrógeno en forma amoniacal en el suelo fue similar

al inicio y al final del ensayo, mientras que el contenido en nitrato disminuyó considerablemente. Al comparar las salidas de N del sistema (absorbido por planta más lixiviado) con el N aplicado como fertilizante más la variación de reserva en el suelo, se deduce que el suelo aportó una gran cantidad de N por mineralización. Este hecho, observado en el ensayo 1 hizo que no se aplicase fertilización nitrogenada de fondo en el ensayo 2.

Aunque no se determinó el N en la planta en el ensayo 1, un balance del mismo teniendo en cuenta las extracciones observadas en el ensayo 2, justificaría la fuerte disminución del contenido en $N\text{-}NO_3$ desde el inicio al final del cultivo. La alta mineralización de nitrógeno en estos suelos relativamente ricos en materia orgánica, se ve estimulada por las elevadas temperaturas bajo acolchado plástico (Tarara, 2000) y por las óptimas condiciones de humedad que proporciona el riego localizado.

Cuadro 7. Contenido inicial y final de N-NO3 y N-NH4 (kg/ha) en el perfil del suelo hasta 1 m de profundidad y pérdidas por lixiviación en los diferentes sistemas de cultivo. Ensayo 1.

	Fertilizante	Inicial		Final		Lixiviado
Parcela	kg N/ha	N-NO3 kg/ha	N-NH4 kg/ha	N-NO3 kg/ha	N-NH4 kg/ha	N-NO3 kg/ha
S1R1	110	814 ± 236	31 ± 10	29 ± 7	24 ± 2	580
S1R2	110	814 ± 236	31 ± 10	43 ± 14	28 ± 5	844
S2R1	110	814 ± 236	31 ± 10	43 ± 12	28 ± 9	545
S2R2	110	814 ±236	31 ± 10	148 ± 80	19 ± 1	402

Cuadro 8. Contenido inicial y final de N-NO3 y N-NH4 (kg/ha) en el perfil del suelo hasta 1 m de profundidad y pérdidas por lixiviación en los diferentes sistemas de cultivo. Ensayo 2.

	Fertilizante	Inicial		Final			Lixiviado
Parcela	kg N/ha	N-NO3 kg/ha	N-NH4 kg/ha	N-NO3 kg/ha	N-NH4 kg/ha	N-planta kg/ha	N-NO3 kg/ha
T1R1	50	116 ± 7	18 ± 8	37 ± 35	15 ± 4	445 ± 58	135 ± 56
T1R2	50	116 ± 7	18 ± 8	57 ± 51	17 ± 6	423 ± 40	111 ± 49
T2R3[†]	50	116 ± 7	18 ± 8	32 ± 8	19 ± 2	441 ± 100	--
T2R2	50	116 ± 7	18 ± 8	34 ± 23	18 ± 3	437 ± 28	51 ± 32

[†] No fue posible establecer el balance debido a un problema técnico con el riego.

Los resultados obtenidos de la aplicación del balance de agua y pérdidas de nitrógeno en la fase de trasplante aparecen en los cuadros 9 y 10 respectivamente.

En la fase de trasplante del ensayo 1, se trató de asegurar, mediante riegos masivos por goteo, según las prácticas habituales de la zona, el mejor arraigo de las plantas. En ella se superaron ampliamente las necesidades y se incrementó la reserva de agua del suelo. En todos los tratamientos el volumen del drenaje fue muy importante y

también el lavado de nitrógeno que osciló entre el 65,3 y el 100 % del lixiviado total (Cuadros 7 y 9).

En los tratamientos de aporte masivo de agua en la fase de trasplante del ensayo 2, se aplicó el 26% (T1R1) y 31% (T1R2) del total de agua de riego, frente al 15% (T2R3) y 17% (T2R2) en los tratamientos de riego de alta frecuencia (Cuadro 10). El lixiviado de nitrógeno siguió la pauta del agua drenada. En esta la fase se lixivió el 73% del nitrógeno lavado en el sistema tradicional (T1R1) y prácticamente la totalidad en los sistemas de alta frecuencia (Cuadro 10).

Cuadro 9. Balance de agua hasta 1 m de profundidad y lixiviado de nitrógeno en los diferentes sistemas de cultivo del tomate durante el período de trasplante. Ensayo 1.

Parcela	Riego	Lluvia	ETc	VR	Drenaje	$N\text{-}NO_3$ lixiviado
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/ha
S1R1	219,5	80,6	67,8	37,2	195,2	559
S1R2	215,2	80,6	67,8	42,4	185,6	551
S2R1	209,1	80,6	32,6	37,4	219,7	545
S2R2	206,6	80,6	32,6	33,8	228,8	343

Cuadro 10. Balance de agua hasta 1 m de profundidad y lixiviado de nitrógeno en los diferentes sistemas de cultivo de tomate durante el periodo de trasplante. Ensayo 2.

Parcela	Riego†	Lluvia	ETc	Drenaje†	N-NO3 lixiviado
	mm	mm	mm	mm	kg/ha
T1R1	160,6	4,2	13,8	84,1	99 ± 73
T1R2	162,4	4,2	13,8	86,3	111 ± 49
T2R3	78,8	4,2	13,8	23,1	18 ± 9
T2R2	73,9	4,2	13,8	24,9	51 ± 32

† El riego se inicio el día 13 de mayo y la cuantificación del drenaje el día 18 de mayo.

A lo largo del período de cultivo el agua aportada se ajustó estrechamente a las previsiones del ensayo 1, de modo que la relación [(Riego+Lluvia)/ETc] osciló entre 0,9 y 1,2 (Cuadro 11). Hubo una disminución de la reserva de agua del suelo y una disminución del drenaje salvo en el tratamiento S1R2 de riego excedentario. Consecuentemente el nitrógeno lixiviado descendió a porcentajes del 0 al 34,7% del total (Cuadros 7 y 11). La disminución de la reserva de agua del suelo se produjo principalmente a causa del corte de riego realizado días antes de la cosecha.

En el periodo de cultivo del ensayo 2, el riego tradicional (T1R1) drenó un 16% del agua de lluvia y del riego, mientras que en los riegos de alta frecuencia al 80% de la ETc no se obtuvo un drenaje significativo (Cuadro 12). El lixiviado de nitrógeno siguió la pauta del agua drenada. En la fase de cultivo se lixivió el 27% del nitrógeno lavado

en el sistema tradicional (T1R1) y no hubo lixiviado en los sistemas de alta frecuencia (Cuadro 12).

Cuadro 11. Balance de agua hasta 1 m de profundidad y lixiviado de nitrógeno en los diferentes sistemas de cultivo del tomate durante el período de cultivo. Ensayo 1.

Parcela	Riego	Lluvia	ETc	VR	Drenaje	$N\text{-}NO_3$ Lixiviado
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/ha
S1R1	487,1	55,0	551,5	-24,1	14,7	21
S1R2	580,0	55,0	548,7	-28,5	114,8	293
S2R1	398,6	54,4	514,9	-30,4	0,0	0
S2R2	448,6	54,4	514,1	-39,7	28,6	58

Cuadro 12. Balance de agua hasta 1 m de profundidad y lixiviado de nitrógeno en los diferentes sistemas de cultivo de tomate durante el período de cultivo. Ensayo 2.

Parcela	Riego	Lluvia	ETc	VR	Drenaje	N-NO3 lixiviado
	mm	mm	mm	mm	mm	kg/ha
T1R1	452,4	94,4	465,7	-7,5	88,6	36 ± 42
T1R2	365,4	94,4	477,9	-6,3	0	0
T2R3[†]	--	--	--	--	--	--
T2R2	361,6	94,4	478,6	-8,0	0	0

[†] No fue posible establecer el balance debido a un problema técnico con el riego.

Por lo tanto, podemos concluir que durante la fase de transplante del ensayo 1, se produjo el mayor drenaje y lixiviado de nitratos. Como se ha indicado en esta fase se pretende crear un horizonte húmedo en la superficie del suelo, de forma que quede asegurada la disponibilidad de agua para las plántulas. En suelos de buena permeabilidad, como son los de este ensayo, esta práctica implica la humectación de buena parte del perfil edáfico y el drenaje del agua aplicada en exceso. En consecuencia, se favorece el lavado de los nitratos almacenados en el perfil y de aquellos que se aplicaron en el abonado de fondo, impidiendo su utilización por el cultivo y deteriorando la calidad del agua drenada. El volúmen drenado se redujo considerablemente aumentando la frecuencia y disminuyendo la dósis en el ensayo 2 sin riesgo para la supervivencia de las plántulas. Aún así en esta fase se lixivió la mayoría del Nitrógeno.

Durante el período de cultivo, el drenaje en el ensayo 1 se redujo considerablemente, llegando a ser nulo en el tratamiento S2R1, considerado como deficitario. Esta tendencia se acentuó en los tratamientos de alta frecuencia del ensayo 2. En ellos el drenaje por debajo de 1 m disminuyó hasta desaparecer manteniéndose en el riego tradicional (T1R1).

Teniendo en cuenta que en riego por goteo y acolchado el sistema radicular del tomate difícilmente explora más allá de 0,5 m (Oliveira *et al.*, 1996), esta agua drenada se debería considerar como no utilizable por el cultivo. Si además tenemos en cuenta que, en el tratamiento S2R1 del ensayo 1 se aplicó un riego ligeramente deficitario y en dos de los tratamientos del ensayo 2 se restringió el riego al 80% de la ETc sin una disminución aparente de la producción, se podría discutir la validez de los valores utilizados de Kc así como la frecuencia de riego utilizada en el riego tradicional. Los valores de Kc recomendados por FAO (1998) son para condiciones estándar de cultivo. En otras condiciones, es decir con acolchado plástico, FAO (1998) sugiere que estos valores podrían reducirse entre un 10 y un 30 % En concreto, en tomate los valores de Kc se podrían reducir hasta un 35% (Haddadin y Ghawi, 1983). El cálculo de la ETc en sistemas de acolchado plástico no está totalmente aclarado y la aproximación más reciente a su solución es el análisis del balance de energía en estos sistemas (Tarara y Ham, 1999).

La práctica de la humectación total del perfil del suelo en los riegos iniciales por goteo está muy extendida y probablemente es una adaptación del riego de trasplante que se aplica en los sistemas de riego por inundación. Sin embargo es la causa del mayor lixiviado de nitrógeno. En posteriores trabajos, se debería profundizar más en el modo de humectar la capa superficial del suelo para asegurar la supervivencia de las plantas, del mejor ajuste de los coeficientes Kc en sistemas de acolchado y de la frecuencia de riego para reducir al máximo el drenaje y por tanto el lixiviado de nitrógeno.

CONCLUSIONES

El sistema de riego habitual por goteo y con acolchado plástico en tomate de industria en el valle del Ebro, conduce a unas pérdidas elevadas de agua y nitrógeno fundamentalmente en la fase de trasplante.

Los riegos de alta frecuencia en la fase de trasplante han permitido reducir de modo notable el agua drenada y el lixiviado de nitrato, asegurando el arraigo de las plantas de modo similar a los riegos masivos tradicionales. Así mismo los riegos de alta frecuencia combinados con un ajuste de los coeficientes Kc durante la fase de cultivo han permitido reducir prácticamente a cero los lixiviados de nitrato. Por lo tanto, aumentar la frecuencia de riego permitió reducir la aportación de agua manteniendo la producción y optimizando el uso del agua y del nitrógeno.

BIBLIOGRAFIA

Allen, R.G., M. Smith,, L.S. Pereira, y A. Perrier, . 1994. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin , 43. 35-91.

Allen, R.G., M. Smith,L.S. Pereira, y W.O. Pruitt. 1997. Proposed revision to the F.A.O. procedure for estimating crop water requirements. Acta Hort. 449: 17-33.

AOAC. 1990. Official methods of analysis. 15th Ed. Harwitte W. (Ed). , pp. 127-129. Association of official analytical chemist. Washington (EEUU).

F.A.O. 1998. Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma 1998.

Haddadin S.H. y I. Ghawi. 1983. Effect of plastic mulches on soil water conservation and soil temperature in field growth tomato in the Jordan Valley. Dirasat 13:25-34.

Hartz, T.K. 1996. Water management in drip irrigated vegetable producion. HortTechnology, 6: 165-167.

Hartz, T.K y G.J. Hochmuth. 1996. Fertility management of drip irrigated vegetables. HortTechnology 6: 168-172.

Keeney, D.R., Nelson, D.W. 1982. Nitrogen-inorganic forms. *En* A. L. Page et al. (ed.) Methods of analysis, Part 2. Agronomy 9: 643-698. ASA and SSSA, Madison, WI, EEUU.

Lord, E.I. y M.A. Shepherd. 1993. Developments in the use of ceramic cups for measuring nitrate leaching. Journal of Soil Science 24: 435-449

Luc, J.P. 1998. Réserve en eau des sols et bilan pédoclimatique, approche pratique. En J.R. Tiercelin (ed.), Traité d'irrigation, pp 191-206. Lavoisier, Paris.

Oliveira, M.R.G, A.M. Calado y C.A.M. Portas. 1996. Tomato root distribution under drip irrigation. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121: 644-648.

Pardo, A., M.L. Suso, N. Vázquez, J.I. Macua, I. Lahoz, J. Garnica y R. Calvo. 2001. Efecto del acolchado plástico y del sistema de riego en un cultivo de tomate de industria. Actas del XXII Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas. Cáceres (en prensa).

Pereira, L.S., M. Smith y R. Allen. 1998. Méthode pratique de calcul des besoins en eau. En J.R. Tiercelin (ed.), Traité d'irrigation, pp 206-231. Lavoisier, Paris.

Prieto, M.H., J. López. y R. Ballesteros. 1998. Influence of irrigation system and strategy on the agronomic and quality parameters of the processing tomato in Extremadura. Acta Horticulturae 487, 575-579.

Tarara, J.M., 2000. Microclimate modification with plastic mulch. HortSci. 35: 169-180.

Tarara, J.M. y J.M. Ham. 1999. Measuring sensible heat flux in plastic mulch culture with aerodynamic conductance sensors. Agricultural and Forest Meteorology 95: 1-13.