

Producción de pimiento en sustrato

Juan José Magán Cañadas
Estación Experimental de la Fundación Cajamar

1. Introducción

El inicio de los cultivos sin suelo en Almería data de principios de los años ochenta. Durante esa década se produjo un tímido aunque progresivo desarrollo del cultivo en lana de roca y perlita en invernaderos comerciales de la zona, aunque no fue hasta mediados de los noventa cuando tuvo lugar una fuerte expansión, como consecuencia del encarecimiento de la ejecución del sistema enarenado tradicional, lo que significó que en muchos de los nuevos invernaderos que se construyeron en aquella época se empezase a utilizar directamente la técnica de cultivo sin suelo con el fin de abaratar costes. Asimismo algunos agricultores se vieron obligados a utilizar dicha técnica como consecuencia del aumento en la incidencia de enfermedades radiculares, derivado del monocultivo y del escaso mantenimiento del suelo enarenado. No obstante, a partir de finales de los noventa empezó a observarse una ralentización en el crecimiento del cultivo sin suelo ya que se produjo un notable descenso en el ritmo de expansión de la superficie invernada y dicha expansión se trasladó a zonas con aguas de peor calidad, en donde prevalece el cultivo en suelo enarenado. Aunque en la actualidad el cultivo sin suelo permanece estancado en Almería, su superficie podría superar las 5000 ha, por lo que esta zona constituye uno de los núcleos más importantes a nivel mundial en lo que a la implantación de dichos sistemas de cultivo se refiere.

Inicialmente el pimiento resultó ser una especie difícil de cultivar en sistemas sin suelo en Almería ya que, al llevarse a cabo su plantación en pleno verano (julio y agosto) en condiciones de alta temperatura, resultaba frecuente que se produjesen problemas de podredumbre radicular en los sacos de sustrato, lo que a su vez conllevaba un escaso desarrollo del cultivo. Con el fin de paliar esta situación, la empresa QUASH (de gran importancia en la zona en aquel momento) desarrolló un contenedor de cultivo a base de poliestireno que se rellenaba con perlita estratificada. Este sistema presentaba mayor inercia térmica que el saco de polietileno tradicional, lo que ayudaba a que se registrasen temperaturas menos extremas a nivel radicular. De este modo fue posible paliar los problemas existentes con el cultivo hidropónico del pimiento y conseguir un buen desarrollo del mismo. Posteriormente se ha perfeccionado el manejo de los sustratos en sacos de polietileno, de forma que resulta perfectamente viable el cultivo de pimiento en los mismos, a pesar de las condiciones extremas que tienen lugar tras el trasplante.

En la actualidad el pimiento es la tercera especie más cultivada en hidropónico en Almería tras tomate y pepino, posición que difiere de la que ocupa cuando se incluye el cultivo en suelo, ya que en este caso es la especie más importante junto con el tomate. La menor evolución experimentada por el pimiento en cultivo sin suelo en comparación con el tomate y el pepino es consecuencia de varias razones:

-Requiere mayor especialización del agricultor ya que es una especie con un sistema radicular débil que se trasplanta en un periodo de condiciones climáticas extremas, por lo que hay que afinar el manejo para evitar un desarrollo excesivamente generativo y una mortandad elevada de raíces.

-Con el fin de abaratar costes, se ha venido utilizando una baja densidad de sacos de cultivo, lo que determina una inadecuada distribución para el pimiento que impide lograr el máximo potencial productivo.

-El cultivo en suelo enarenado ofrece buenos resultados. Además, como se cultiva de cara a invierno, el fruto permanece en la planta mucho tiempo consumiendo energía necesaria para el sistema radical, de forma que no se aprecian diferencias significativas con respecto al suelo.

No obstante, utilizando un adecuado marco de plantación se puede aumentar la producción del pimiento en hidropónico, como consecuencia de que el agua está más fácilmente disponible para el cultivo y de que se logra un mejor control nutricional que en el cultivo en suelo. Esto a su vez permite incrementar la calidad del fruto y su precocidad en la maduración. Además, el cultivo hidropónico no requiere preparación del suelo previa a la plantación y presenta menores costes de desinfección, a la vez que origina la proliferación de menos malas hierbas. Finalmente, ofrece la posibilidad de recircular la solución nutritiva, lo que determina un ahorro de agua y fertilizantes y una reducción de la contaminación ambiental.

Las posibilidades que ofrece el cultivo hidropónico de pimiento han permitido el desarrollo de este sistema en otras zonas de España fuera de la provincia de Almería, principalmente en Murcia y Alicante, donde ha supuesto una alternativa al uso del bromuro de metilo en cultivo en suelo.

En la presente comunicación se indican una serie de consideraciones a tener en cuenta para el éxito del pimiento en cultivo sin suelo.

2. Preparación del invernadero

Cuando la plantación se lleva a cabo en condiciones de alta temperatura, como ocurre en los invernaderos de Almería, resulta fundamental mitigar al máximo posible su efecto sobre el cultivo. Por tanto, todas aquellas medidas que permitan reducir la temperatura resultan aconsejables con el fin de conseguir un adecuado desarrollo del mismo.

Una operación habitual es el blanqueo intenso de la cubierta, permitiendo una transmisividad a la radiación tan sólo del 25%. Con esto se consigue reducir la temperatura del agua de riego existente en las tuberías, así como la del cultivo. Dicho blanqueo se mantendrá hasta que sea necesario fomentar el cuajado de los frutos o bien aumentar la radiación incidente sobre el cultivo para favorecer su desarrollo. La operación de limpieza de la cubierta debe hacerse de forma gradual (en dos veces), con el fin de conseguir una mejor aclimatación del cultivo a las nuevas condiciones y evitar que sufra un estrés acusado. Otra táctica aconsejable es ocultar las tuberías de riego (por ejemplo enterrándolas) para que no incida sobre ellas la radiación solar.

Previo a la plantación se deben tener en cuenta otras consideraciones propias del cultivo en sustrato en general. Un aspecto de vital importancia es comprobar la uniformidad de la instalación de riego ya que el volumen de sustrato en el que quedan confinadas las raíces es muy pequeño, por lo que se debe asegurar un aporte homogéneo de la solución nutritiva con el fin de evitar un desarrollo dispar del cultivo. En todo caso el coeficiente obtenido mediante la evaluación correspondiente debe situarse en torno al 95% o más y, si no es así, habrá que revisar el estado de los goteros, el diseño hidráulico de la instalación de riego, etc.

Cuando se va a utilizar sustrato nuevo, en primer lugar hay que colocarlo en su posición definitiva, y para ello hay que tener en cuenta la pendiente del terreno. La pendiente a lo largo de la bolsa de sustrato no debería superar el 1%, especialmente cuando se utilizan sustratos que retienen el agua a baja tensión, como por ejemplo la lana de roca, para evitar que la zona más alta se seque excesivamente. No obstante, cuando se usan sustratos como la perlita o la fibra de coco, que retienen el agua a mayor tensión, pendientes del 2-3% resultan tolerables. Para evitar pendientes excesivas, se pueden calzar los sacos de cultivo o bien disponer éstos perpendicularmente a la pendiente. En este caso, si las líneas de cultivo deben situarse a favor de dicha pendiente, puede optarse por plantar en los extremos del saco y establecer líneas pareadas. Frecuentemente la bolsa de polietileno que envuelve el sustrato presenta un pequeño orificio con el fin de evitar que reviente durante su transporte. Dicho orificio debe colocarse hacia arriba para que el sustrato pueda saturarse perfectamente.

A la hora de colocar el sustrato sobre el terreno, hay que tener en cuenta el marco de plantación a utilizar. En pimiento este aspecto es de especial importancia ya que, al ser una planta leñosa, no puede tumbarse y abrirse para ocupar un mayor espacio, como ocurre con el tomate o el pepino. Por tanto, la disposición inicial establecida va a influir sobre la superficie ocupada por el cultivo, afectando a su productividad. Debido al coste de los sustratos, tradicionalmente las líneas de cultivo se han dispuesto con una separación de 2 m entre sí, estableciendo dos líneas pareadas por cada una de ellas, de forma similar a como se hace con otras especies. Sin embargo esto determina una separación excesiva en pimiento. Por ello la tendencia actual es hacia la utilización de un mayor número de sacos de cultivo, de forma que las líneas se sitúan cada 1,6 m. En invernaderos altamente tecnificados incluso se reduce aún más esta separación, estableciéndose en 1,33 m, ya que se trata de aprovechar al máximo el espacio.

Una vez colocado el sustrato el siguiente paso consiste en la apertura de los huecos de plantación en la bolsa de cultivo mediante cúter u otro sistema y en la colocación de las piquetas de los goteros en el sustrato. Posteriormente hay que aportar solución nutritiva hasta rellenar al máximo la bolsa, finalizando el riego cuando empiece a desbordarse el agua. Es conveniente que el sustrato permanezca en saturación durante 48 horas con el fin de que alcance un alto nivel de humedad y que adquiera unas buenas propiedades hidráulicas, de forma que posteriormente ya se pueden abrir los orificios de drenaje. Esto debe llevarse a cabo en la parte más baja del saco para evitar que haya agua estancada ya que, de lo contrario, se favorece la proliferación de patógenos radiculares. En sustratos que pueden presentar problemas por una alta retención de agua, como puede ocurrir con la fibra de coco, resulta aconsejable abrir varios orificios de drenaje a lo largo del saco para favorecer la evacuación.

Si se va a reutilizar el sustrato, será necesario rehidratarlo en el caso de que se hubiese dejado secar al final del cultivo anterior o en el periodo entre cultivos. Para ello hay que dar riegos cíclicos de corta duración, aunque en el caso de sustratos de escasa capilaridad esto no resulta suficiente y hay que cerrar los orificios de drenaje y saturar nuevamente con el fin de alcanzar una humedad satisfactoria, o bien hay que aportar un caudal grande con manguera saco a saco. Posteriormente se deberá tomar una muestra de solución del sustrato con el fin de medir su conductividad eléctrica (CE) y saber si resulta excesiva (superior a 4 dS m^{-1}), en cuyo caso habrá que seguir lavándolo. Lo ideal sería que dicha CE fuese igual o inferior a la del taco de trasplante procedente del semillero, para que así se vea facilitada la colonización del sustrato por parte de la raíz del cultivo. Asimismo, con suficiente antelación a la plantación, resulta conveniente

llevar a cabo algún tipo de desinfección del sustrato, pues puede contener patógenos procedentes del cultivo anterior. Frecuentemente se emplea metam-sodio a una dosis de 100 L ha⁻¹, aunque también pueden emplearse otros desinfectantes como hipoclorito sódico, enzono, etc. En cualquier caso tras la aplicación debe lavarse el sustrato durante varias semanas para evitar que queden residuos que originen fitotoxicidad en el cultivo.

3. Plantación

En la plantación, el cepellón procedente del semillero se coloca encima o dentro del sustrato, dependiendo del tipo de material del que se trate. Así por ejemplo, en lana de roca el trasplante se suele hacer en taco de 7,5 x 7,5 cm del mismo material y va protegido lateralmente por una lámina de plástico, de forma que dicho taco se coloca directamente sobre la tabla y se sujeta a ésta con la piqueta del gotero correspondiente. Una vez conseguido el enraizamiento, dicha piqueta se debe sacar un poco del taco para evitar que las raíces del cultivo taponen la salida del agua. Normalmente la piqueta se mantiene sobre el taco y no se suele pinchar directamente sobre la tabla ya que así se dispone de más altura y el cono de hidratación del gotero es mayor.

En el caso de sustratos más sueltos (perlita, fibra de coco, etc) se pueden utilizar distintos materiales en semillero, aunque se debe evitar que éste retenga notablemente más agua que el sustrato definitivo para evitar una humedad excesiva en la base del tallo. Si también se emplean tacos de lana de roca con envoltura de plástico, éstos se colocan igualmente sobre el sustrato procurando que el contacto sea lo más íntimo posible pero, si la planta viene en un cepellón orgánico o de perlita, hay que enterrarlo y la piqueta se debe colocar junto al taco, separándola una vez enraizado el cultivo para evitar problemas de podredumbre de cuello. En este caso la planta debe enterrarse hasta los cotiledones, con el fin de evitar que se origine “pie de elefante”. Esta fisiopatía consiste en la formación de un callo en la base del tallo en donde se insertan las raíces, que finalmente se agrieta como consecuencia del carácter leñoso del pimiento, de forma que tiene lugar una disminución del vigor por obstrucción de los vasos y sirve de puerta de entrada de múltiples microorganismos, que terminan provocando pudrición. Al enterrar el hipocotilo, aparece en éste una doble fila vertical de raíces y no se forma el callo en la corona, por lo que desaparece el riesgo (Cánovas, 1999). En el caso de que el trasplante se realice en taco de lana de roca esta precaución hay que tenerla en el semillero, de forma que a la hora de realizar el repicado, el hipocotilo de la plántula debe doblarse e introducirse en el orificio del taco.

En pimiento resulta especialmente importante el estado de la planta procedente del semillero, con el fin de conseguir una rápida adaptación a las nuevas condiciones y minimizar el estrés tras el trasplante. Para ello la planta debe presentar un tallo recio que evite el vuelco prematuro, el cual es mal soportado por el pimiento, y no debe estar excesivamente tierna ni endurecida, para que no sufra una parada tras el trasplante. Asimismo, debe tener un elevado volumen de raíces (aunque no deben salir mucho del taco), que deberán encontrarse en buen estado.

Si el cepellón se coloca sobre el sustrato, es posible abrir los orificios de drenaje después de la plantación, con lo que hay más tiempo para la saturación del sustrato. En cambio, si se entierra, habrá que realizar los agujeros previamente a la plantación con el fin de que salga el agua sobrante. En cualquier caso, una vez realizada la plantación, se debe dar un riego para asegurar el íntimo contacto entre el taco y el sustrato y facilitar el anclaje de las raíces en éste.

4. Inicio del cultivo

En los primeros días después del trasplante, dado que el cultivo aún no ha enraizado y es sensible al estrés hídrico, debe regarse a diario, de forma que el aporte de agua resulta bastante excedentario. Sin embargo, el objetivo que se debe perseguir posteriormente es lograr la máxima colonización posible del sustrato por parte de las raíces, de forma que casi todo el volumen disponible resulte útil. Esto debe lograrse antes de que el cultivo muestre una gran fructificación ya que, a partir de ese momento, los fotoasimilados generados se dirigen preferentemente hacia los frutos en detrimento de la raíz.

Una vez que las raíces salen del taco y se anclan en el sustrato resulta conveniente restringir el riego, especialmente si el sustrato está muy hidratado, ya que eso tenderá a incentivar el desarrollo radicular y reducirá el riesgo de un ataque fitopatógeno. No obstante, a la hora de llevar a cabo dicha restricción hay que evitar que el sustrato se seque excesivamente ya que eso no sólo afecta negativamente al cultivo, sino que puede impedir la adecuada hidratación posterior del sustrato. Esto resulta especialmente importante en lana de roca, que es un sustrato con escasa capilaridad. Otra táctica que puede ayudar a mejorar la colonización del sustrato consiste en cambiar de posición las piquetas de los emisores ya que las raíces muestran predilección por las zonas en las que existe una mayor disponibilidad de agua (siempre que la aireación no resulte limitante) y de baja salinidad, de forma que resulta frecuente que la máxima concentración de raíces se encuentre debajo del gotero, mientras que la zona situada entre goteros esté poco colonizada. No obstante, a la hora de mover las piquetas hay que tener cuidado con el posible desplazamiento del frente salino.

Otro aspecto de gran importancia que influye decisivamente en el manejo del riego es la temperatura de la solución nutritiva y del sustrato. En plantaciones de verano coinciden un área foliar baja y temperaturas extremas y el agua alcanza en ellas temperaturas muy elevadas (más de 40 °C) durante el mediodía y la tarde. En tales condiciones resulta preferible no regar ya que de lo contrario facilitaríamos la muerte de las raíces. Hay que tener en cuenta que temperaturas radiculares superiores a 30 °C pueden ser perjudiciales, especialmente en pimiento, aunque son mejor toleradas si van acompañadas de un contenido hídrico en el sustrato relativamente bajo. Por tanto, el riego quedará restringido al final de la tarde, la noche y primeras horas de la mañana, cuando la temperatura no es tan elevada. Conforme crece el cultivo, se incrementan las necesidades hídricas, por lo que deberemos aumentar el tiempo de riego, aunque limitándonos al horario mencionado. Esto puede implicar la necesidad de dar riegos largos en comparación con lo que sería teóricamente correcto desde el punto de vista de la retención de agua en el sustrato, pero resulta preferible. Cuando el cultivo alcanza un cierto porte, es capaz de sombrear el sustrato, por lo que se calienta menos, de forma que es posible dar riegos al mediodía. No obstante, conviene que éstos sean suficientemente largos como para garantizar que salga por los goteros solución procedente de la tubería general exterior al invernadero, la cual se encuentra notablemente más fresca que la que estaba en los ramales interiores. De este modo, la temperatura media de la solución aportada se reducirá. Además, con riegos largos disminuirémos el número de riegos necesario y el contenido hídrico medio del sustrato.

En plantaciones realizadas al final del otoño e inicios del invierno se presenta la situación inversa, de forma que la temperatura de la solución es baja (menor de 15 °C). En este caso debemos regar al mediodía, cuando ya se ha calentado dicha solución en las tuberías. Asimismo puede ser interesante cubrir el sustrato con un acolchado plástico, con el fin de aumentar la temperatura de la raíz.

5. Desarrollo posterior del cultivo

Tras conseguir una buena colonización del sustrato, es conveniente no limitar el aporte de agua al cultivo, con el fin de que éste se desarrolle rápidamente y alcance un vigor suficiente que asegure una alta productividad. Resulta básico obtener un equilibrio adecuado entre el desarrollo vegetativo y generativo del cultivo, de forma que se eviten problemas de cuajado y a su vez se consiga una planta fuerte que sea capaz de soportar una buena carga de fruto. En pimiento hay que evitar un cuajado prematuro ya que en este caso la planta no tendría un porte suficiente como para satisfacer la demanda de fotoasimilados de los frutos y quedaría bloqueada, lo que repercutiría sobre la productividad final. De este modo se aconseja eliminar los frutos de la cruz lo antes posible, así como los de los dos primeros nudos de cada tallo. A partir del tercer nudo la planta debe tener suficiente vigor como para garantizar un buen desarrollo del fruto.

Para controlar el desarrollo vegetativo/generativo del cultivo, existen diferentes estrategias, tanto a nivel del riego y la fertirrigación como del clima. Los parámetros sobre los que se puede actuar son (Tortosa, 1999):

-Temperatura media diaria: su aumento induce el desarrollo vegetativo, salvo que resulte excesiva, en cuyo caso originaría un estrés en la planta.

-Diferencia de temperatura entre el día y la noche: al aumentar se favorece la floración.

-Déficit de presión de vapor: su reducción origina una planta más vegetativa.

-Temperatura de raíz: actúa en el mismo sentido que la temperatura media diaria.

-Radiación: a mayor radiación la planta es más generativa.

-CE en el sustrato: al aumentar se produce una acción generativa.

-Disponibilidad de agua: su aumento supone una acción vegetativa. Por ello empezar a regar antes por la mañana y terminar después por la tarde, así como incrementar la frecuencia de riego tienen un efecto vegetativo.

-Nutrición: los iones Ca^{++} , NO_3^- y NH_4^+ dan lugar a una acción vegetativa y K^+ , SO_4^- , Na^+ y Cl^- originan una acción generativa.

-Cualquier estrés actúa generativamente.

Los aspectos morfológicos de la planta de pimiento que permiten apreciar si el desarrollo de la misma es vegetativo o generativo son (Tortosa, 1999):

-Crecimiento longitudinal: si es de 5 cm por semana, la planta presenta un desarrollo vegetativo y, si es de menos de 3 cm, lo es generativo.

-Número de brotes laterales: si la planta presenta muchos brotes laterales vigorosos, muestra un desarrollo vegetativo.

-Floración: cuando las flores abren cerca del ápice de la planta, ésta se muestra generativa.

-Forma de las hojas: si son redondeadas, la planta está vegetativa y, si son afiladas, está generativa.

-Color del ápice: si es claro por la mañana, la planta se encuentra vegetativa.

-Crecimiento del fruto: si es rápido y fuerte, la planta tiene una actitud vegetativa.

-CE de la solución del sustrato: si tiende a aumentar (manteniendo constante la CE de aporte y la humedad del sustrato, así como las condiciones ambientales), la actitud es generativa.

-pH de la solución del sustrato: cuando tiende a disminuir (manteniendo constante la composición de la solución nutritiva de aporte), la planta presenta un desarrollo generativo.

-Número de frutos: para una densidad de plantación de 2,5 plantas m^{-2} , si hay menos de 20 frutos m^{-2} , la planta muestra un desarrollo vegetativo y, si hay más de 30 frutos m^{-2} , tiene una actitud generativa.

Cuando el cultivo entra en fructificación, resulta más sensible al estrés hídrico ya que pueden aparecer frutos con necrosis apical. De este modo, si las condiciones ambientales lo permiten, conviene dar riegos cortos y frecuentes ya que así se agotará menos el contenido hídrico del sustrato y la raíz tendrá el agua más fácilmente disponible. Hay que tener en cuenta que el principal factor limitante a nivel del sustrato para la absorción de agua por el cultivo es la conductividad hidráulica, que es un parámetro que nos da una idea de la capacidad de dicho sustrato para transportar agua a través de sus poros hacia la raíz y reemplazar así la solución absorbida que se encontraba en el entorno radicular. Sin embargo, la conductividad hidráulica no es constante para un material dado, sino que disminuye drásticamente conforme se reduce el contenido de humedad. Esto es debido a que, conforme se seca el sustrato, hay más poros rellenos de aire por los que no puede circular el agua y, además, ésta queda confinada en poros pequeños, que tienen una superficie específica mayor, por lo que oponen mayor resistencia a la circulación del agua. Pasar tan sólo de 0 a 5 c.c.a. de tensión matricial puede significar una reducción de la conductividad hidráulica de casi 100 veces. Por tanto, sólo se deben permitir pequeñas oscilaciones del contenido hídrico del sustrato con el fin de optimizar el riego. Generalmente se acepta el criterio de regar cuando se ha agotado el 5% del agua fácilmente disponible más el agua de reserva, que es el contenido hídrico del sustrato retenido a una tensión comprendida entre 10 y 100 c.c.a. (Martínez y García, 1993).

Por otro lado, resulta necesario aplicar un exceso de agua en relación a la absorción del cultivo con el fin de evitar problemas derivados de las diferencias de transpiración entre plantas, la desuniformidad del riego y la acumulación de sales en el sustrato. Aunque se emplee agua de excelente calidad, se aconseja un porcentaje de drenaje mínimo del 15% para tener una cierta facilidad de manejo (Lorenzo y col., 1993). En condiciones de campo este valor se suele aumentar a un 20-25% para gozar de mayor seguridad. Lógicamente, cuanto peor sea la calidad del agua de riego, mayor deberá ser el drenaje establecido con el fin de evitar que se sobrepasen ciertos niveles de salinidad en el sustrato que sean limitantes para el cultivo. En cultivo de pimiento generalmente se considera un nivel de salinidad máximo en torno a 3 $dS m^{-1}$ con el fin de no tener pérdidas productivas, aunque en invierno resulta tolerable una CE de hasta 4 $dS m^{-1}$. Además no resulta aconsejable superar una concentración de Cl^{-} y Na^{+} de 12 $mmol L^{-1}$.

El volumen de riego a aplicar (V) será la suma del agua agotada en el sustrato (A) más el exceso que se pretende aportar (L), de forma que:

$$V = A + L = \frac{A}{1 - FL}$$

La fracción de lixiviación (FL) necesaria se calcula en función del ion más limitante existente en el agua de riego usando la siguiente expresión (González, 2001):

$$FL = \frac{C_s - C_a}{C_m - C_a}$$

donde:

C_s es la concentración del ion limitante en la solución nutritiva

C_a es la concentración de absorción para ese ion, es decir, la cantidad del mismo absorbida por cada volumen de agua absorbido

C_m es la concentración máxima permitida para ese ion en el lixiviado.

En pimiento la concentración de absorción de Na^+ y Cl^- es muy baja, en torno a $0,5 \text{ mmol L}^{-1}$ a las concentraciones que se permite su acumulación en el entorno radicular (Sonneveld y van der Burg, 1991), por lo que éstos suelen ser los iones más limitantes y sobre los que suele realizarse el cálculo de la fracción de lixiviación.

Conforme crece el cultivo, aumenta la absorción de agua y disminuye paulatinamente el volumen lixiviado si se mantiene constante el aporte. Por tanto, dicho volumen de lixiviación debe controlarse desde un inicio para evitar situaciones de deficiencia. Para ello se utiliza la denominada bandeja de drenaje, que permite recoger el lixiviado de varias unidades de cultivo representativas de la parcela y acumularlo en un recipiente para cuantificarlo diariamente. Al mismo tiempo se recoge el agua arrojada por un gotero y, comparando ambos volúmenes, se calcula el porcentaje de drenaje, que es el tanto por ciento de agua sobrante con respecto a la aportada. Este valor se intentará mantener próximo a la fracción de lixiviación calculada teóricamente, la cual será corroborada mediante los análisis químicos que se realicen de la solución lixiviada.

Cuando el porcentaje de drenaje medido resulta menor que el que se pretende mantener, será necesario incrementar el número de riegos diario. Este aumento será progresivo conforme crece el cultivo. Los riegos habrá que repartirlos adecuadamente a lo largo del día para ajustarlos lo mejor posible a las necesidades hídricas de la planta, sin que se produzcan riegos claramente excedentarios y otros con escaso drenaje. En definitiva, el lixiviado deberá ser homogéneo a lo largo del día.

Este tipo de programación se denomina horaria y es la que se suele emplear cuando la planta es pequeña. En ella se estiman las necesidades de agua del cultivo en base a los datos del día anterior y las previsiones realizadas para el día actual y, dividiéndolas por el volumen establecido para cada riego, se calcula el número de riegos necesario. Finalmente se indica al programador la hora de inicio de los mismos teniendo en cuenta lo comentado anteriormente. No obstante, este sistema puede sufrir importantes desajustes ya que las condiciones ambientales pueden variar bruscamente de un día a otro. Por ello, cuando la planta adquiere un cierto porte, se suelen emplear automatismos de control que resultan mucho más precisos. De ellos se hablará posteriormente.

Al igual que es importante mantener una hidratación del sustrato suficiente para que el cultivo no sufra estrés hídrico, resulta fundamental disponer de un volumen suficiente de aire (al menos el 25% del volumen de poros) que evite problemas de

asfixia radicular, especialmente en pimiento que es una planta que tiende a perder raíz con facilidad. Si el balance aire-agua es inadecuado (excesiva o escasa retención de agua), se debe actuar sobre el riego con el fin de corregir dicha situación. Así, se darán riegos más cortos de lo habitual pero con mayor frecuencia, si el sustrato se secó en exceso, para fomentar su rehidratación, y más largos pero más espaciados si retiene demasiada agua, a la vez que se acortará por la tarde el periodo de riego, para conseguir su desecación.

Conforme avanza el ciclo de cultivo y se acortan los días, tiene lugar una bajada de la temperatura tanto de la solución nutritiva como del sustrato, lo cual condiciona el manejo del riego con el fin de minimizar su efecto sobre la muerte radicular. De cara a este periodo resulta interesante reducir el contenido hídrico del sustrato ya que, al disminuir los niveles de transpiración del cultivo, no existe tanto riesgo de que éste sufra estrés hídrico y la raíz soportará mejor las bajas temperaturas. Por otro lado, hay que poner especial cuidado a la hora de definir el periodo de activación de los riegos durante el día. Así, por la mañana no se debe empezar a regar hasta que la temperatura del sustrato haya superado, al menos, 12°C pues, por debajo, la raíz apenas muestra actividad. Por la tarde se debe terminar de regar pronto (en torno a las 14-15 horas solares, aunque esto depende del contenido de agua del sustrato), con el fin de que se agote parcialmente el agua del sustrato de cara a la bajada de temperatura durante la noche. El objetivo es conseguir una reducción del contenido hídrico del 5-10%, de forma que no se obtenga drenaje alguno en el primer riego del día siguiente y sí a partir del segundo. Aunque esto supone un ascenso notable de la conductividad eléctrica de la solución radicular a lo largo de la noche, resulta perfectamente tolerado por el cultivo. Además de disminuir el riesgo de ataque de hongos a nivel radicular (especialmente *Phytium*), con ello se consigue reducir la presión de raíz a primera hora de la mañana, por lo que habrá menos probabilidad de rajado del fruto. En días fríos y lluviosos es conveniente parar el riego ya que la demanda evaporativa es escasa y no hay ningún problema en aprovechar la reserva de agua del sustrato.

Si el ciclo de cultivo se adentra en la primavera e incluso en el verano, las condiciones ambientales determinarán una fuerte transpiración y será necesario mantener una buena hidratación del sustrato para satisfacer la demanda hídrica, de forma que puede resultar conveniente dar algún riego por la noche para evitar que se deseque excesivamente, lo cual podría acarrear problemas de insuficiente conductividad hidráulica durante el periodo diurno. En este periodo no se alcanzan bajas temperaturas nocturnas, por lo que no hay problema en llevar a cabo este manejo. Por otro lado el cultivo presenta un buen desarrollo y no es de esperar que se registren temperaturas excesivamente elevadas a nivel radicular aunque, como consecuencia de la fuerte actividad respiratoria radicular, podrían producirse acontecimientos de hipoxia, por lo que puede ser conveniente mantener un alto nivel de oxigenación en la solución nutritiva aportada.

Al final del ciclo de cultivo, si no se va a plantar inmediatamente después sino que se pretende dejar un cierto tiempo de reposo, puede resultar conveniente secar el sustrato para que se conserve mejor. Esto resulta imprescindible cuando se utilizan sustratos orgánicos ya que, si se mantiene la humedad, se permite la actividad de microorganismos que van a continuar la degradación biológica del material por lo que su vida será menor. Por lo que respecta a la lana de roca, al ser de origen mineral, no sufre esta degradación biológica pero su estructura se mantiene mejor si se deshidrata. Por el contrario, en el caso de la perlita no se observa una clara ventaja con esta operación, que sin embargo puede originar problemas de acumulación de sales, las

cuales son difíciles de lavar posteriormente y pueden originar graves problemas en el cultivo siguiente, por lo que conviene mantener hidratado este sustrato en el periodo entre cultivos. Para secar el sustrato simplemente hay que parar el riego durante unos días antes de arrancar el cultivo, de forma que muera por marchitez. Con el fin de reducir la acumulación de sales en el proceso de secado, conviene regar con agua sin fertilizantes durante la última semana de cultivo.

6. Automatización del riego

Cuando el cultivo alcanza un cierto porte y es necesario dar varios riegos al día, resulta muy útil el empleo de sistemas de control automáticos, los cuales detectan el consumo de agua de la planta a tiempo real e indican el momento de inicio del riego de forma bastante ajustada.

Sin lugar a dudas, el sistema más empleado en el sureste peninsular es la bandeja de demanda. Ésta incorpora un canalón lateral relleno de solución en el que existe un tornillo regulable, que manda una señal eléctrica cuando queda fuera del agua, comenzando así el riego. La planta absorbe la solución del canalón a través de una manta higroscópica y, de este modo, desciende el nivel de agua. Se trata, por tanto, de un sistema de control directo.

La bandeja de demanda es un automatismo muy útil y práctico, aunque el ajuste del riego que realiza no es totalmente perfecto. Así, en los momentos del día de mayor demanda hídrica (mediodía) se consigue un drenaje menor que en aquéllos con demanda más baja (por la tarde). Como ya se comentó anteriormente, esta situación no es la ideal y por ello se han tratado de usar otros sistemas de control del riego.

El método de radiación es un sistema indirecto ya que utiliza un solarímetro para medir la radiación global incidente y el riego se activa en función de este parámetro. Cuando se alcanza un cierto valor de radiación acumulada que previamente habrá sido indicado al programador, comienza el riego y el contador se pone a cero para iniciar un nuevo ciclo. El problema de este método es que la correlación entre radiación y transpiración del cultivo no es perfecta y, al no tener en cuenta el déficit de presión de vapor, que también influye sobre dicha transpiración, se producen importantes desajustes a lo largo del día, que no son tolerables en cultivo sin suelo.

Para evitar este problema, se ha tratado de mejorar el sistema de radiación incorporando algunas modificaciones. Una posibilidad consiste en dividir el día en varios periodos y asignar un factor de radiación acumulada distinto para cada uno de ellos. Sin embargo, aunque el ajuste a lo largo del día resulta mejor, es necesaria una reprogramación diaria de dichos factores, ya que dependen de las condiciones ambientales existentes. Otra posibilidad consiste en combinar el solarímetro con una bandeja de drenaje “inteligente”, la cual mide el lixiviado producido de forma automática mediante pulsos. De esta forma el programador es capaz de modificar por sí mismo y mediante el software adecuado el factor de radiación y ajustarlo a lo largo del día. El problema es que este sistema actúa a posteriori, es decir, trata de corregir los desajustes ya producidos.

Otro método de automatización del riego muy interesante, aunque apenas se ha utilizado en el sureste peninsular, es el empleo de modelos de estimación de la transpiración. Consisten en medir a tiempo real los diferentes parámetros ambientales que influyen sobre dicho proceso y en integrarlos en un programa informático adecuado, capaz de calcular la transpiración del cultivo. De esta forma, cuando se

alcanza un cierto valor que previamente se habrá establecido como consigna, se activa el riego. Este sistema puede actuar con gran precisión pero requiere de investigación previa para ajustar el modelo a la zona concreta donde va a ser usado.

Otros sistemas de automatización del riego tales como la medida del potencial matricial del sustrato mediante tensiómetros, del contenido volumétrico de agua mediante sensores tipo FDR o de la transpiración del cultivo mediante balanza lisimétrica también pueden emplearse en cultivo sin suelo, aunque igualmente presentan sus inconvenientes, por lo que no han llegado a implantarse de forma generalizada a nivel comercial.

7. Diseño de la solución nutritiva

Dado que los sistemas de cultivo sin suelo presentan una baja inercia debido al escaso volumen de sustrato en el que se desarrollan las raíces y a que frecuentemente utilizan materiales con una capacidad de intercambio iónico pequeña o nula (lana de roca, perlita, etc), resulta fundamental aportar todos los nutrientes minerales que necesita el cultivo junto con el agua de riego en forma de solución nutritiva. Dicho aporte deberá realizarse en la cantidad y proporciones adecuadas para evitar posibles deficiencias o toxicidades y competencias entre iones.

Dado que las concentraciones de absorción de nutrientes por parte de la planta no son iguales que las concentraciones iónicas existentes en la solución radicular, tampoco tienen que serlo las de la solución de aporte. Éstas serán mayores o menores que en el entorno de la raíz dependiendo de la facilidad de la planta para tomar cada ion. Así por ejemplo, el amonio, los fosfatos o el potasio, que son iones de fácil absorción, se pueden aportar a una concentración inferior a la concentración de absorción, lo que va a reducir su nivel en la raíz sin que se afecte el cultivo y a disminuir las pérdidas por lixiviación. En cambio, en el caso de aquellos iones que la planta absorbe de forma pasiva o con dificultad, como ocurre con el calcio, habrá que aportarlos a una concentración superior a su concentración de absorción para que se acumulen en la rizosfera y se “fuerce” su entrada en la planta, lográndose así su máximo potencial de absorción.

La concentración de cada ion en la solución de aporte se puede calcular matemáticamente mediante la siguiente expresión (González, 2001):

$$C_s = C_a * (1 - FL) + C_d * FL = \frac{C_a * (1 - FL)}{1 - R * FL}$$

en donde:

C_s es la concentración del ion para el que se realiza el cálculo en la solución de aporte

C_a es la concentración de absorción para ese ion

C_d es la concentración del ion en el drenaje

FL es la fracción de lixiviación establecida

R es el cociente entre C_d y C_s

Las concentraciones de absorción no son constantes a lo largo del cultivo, sino que varían en función de la etapa de desarrollo y de las condiciones ambientales, fundamentalmente. Es sabido que dichas concentraciones tienden a disminuir al aumentar la tasa de transpiración del cultivo, de forma que se debe reducir la

concentración en la solución de aporte con el fin de evitar una excesiva acumulación en el drenaje y unos mayores requerimientos de lixiviación. Es por ello que las soluciones aportadas en primavera-verano son más diluidas que en invierno. En lo que se refiere a la etapa de desarrollo del cultivo, ésta también influye decisivamente en las concentraciones de absorción de nutrientes. Así, durante la fase inicial, el cultivo muestra un fuerte desarrollo vegetativo por lo que la concentración correspondiente al nitrógeno resulta alta. Sin embargo, conforme avanza la fructificación, se reduce el crecimiento y aumentan las necesidades en potasio, por lo que se incrementa la concentración de absorción de este elemento y disminuye la de nitrógeno.

El cociente entre la concentración de un ion en el drenaje y su concentración en la solución de aporte (R) depende de la facilidad con la cual la planta es capaz de absorberlo, tal como se comentó anteriormente. En la tabla 1 se muestran las relaciones que usualmente aparecen entre ambas concentraciones.

Tabla 1 - Relaciones más usuales entre las concentraciones iónicas en las soluciones de aporte y drenaje en un sustrato inerte (Cánovas, 1998; Casas, 1999).

ION	Concentración en la solución de aporte	Concentración en la solución de drenaje
NO₃⁻	100 %	75-125 %
NH₄⁺	100 %	0-50 %
H₂PO₄⁻	100 %	50-75 %
K⁺	100 %	50-75%
Ca⁺⁺	100 %	125-200 %
Mg⁺⁺	100 %	150-250 %
SO₄⁻	100 %	150-250 %
pH	100 %	+ 0,5 Ud
CE	100 %	+ 1-2 Ud

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, no es posible establecer una solución nutritiva concreta que sirva de forma general para un cultivo determinado, sino que ésta habrá que ajustarla en función de las condiciones ambientales y la etapa de desarrollo correspondientes a nuestro caso concreto, de forma que se logren las relaciones indicadas en la tabla 1. No obstante, en la tabla 2 se indican unas soluciones nutritivas que podrían servir como orientación para la nutrición de un cultivo de pimiento con plantación en verano. Inicialmente suele utilizarse una solución nutritiva bastante diluida ya que el déficit de presión de vapor del ambiente resulta extremo y, para no estresar aún más a la planta y facilitar su enraizamiento, conviene mantener en sustrato una conductividad baja (en torno a 2 dS m⁻¹). Evidentemente, si la plantación se realizase en otoño-invierno, la situación sería diferente y habría que emplear una solución más concentrada. En el momento del cuajado es necesario controlar el vigor de la planta, de forma que resulta conveniente aumentar la conductividad e incentivar el aporte de potasio con el fin de hacer frente a la creciente demanda de los frutos. Conforme se acortan los días y desciende la temperatura, se incrementan los problemas de asimilación, especialmente en el caso del magnesio, por lo que conviene aumentar la concentración para “forzar” su entrada en la planta. En el caso de que el cultivo se prolongue hacia la primavera, aumenta la transpiración y es necesario utilizar nuevamente soluciones muy diluidas con el fin de evitar concentraciones en drenaje excesivas. Dado que el pimiento es un cultivo muy sensible a la aparición de necrosis apical, es conveniente no descuidar el aporte de calcio, especialmente en los periodos de alta demanda hídrica. De este modo, se debe procurar que en sustrato la relación Ca/K

no sea menor que 1 y que la relación Ca/Mg se sitúe en torno a 2 ya que potasio y magnesio son elementos antagonistas de la absorción de calcio.

Tabla 2 – Soluciones nutritivas recomendadas por fases de cultivo para pimiento en sustrato con plantación en verano. Las concentraciones correspondientes a los diferentes iones están expresadas en mmol L⁻¹, mientras que las del complejo de microelementos comercial lo están en mg L⁻¹.

FASE DE CULTIVO	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼	Micros	CE
Inicio de cultivo	9,5	1,75	1,25	4,5	3,75	1,5	1,85	25	1,9
Desde cuajado hasta bajada de la temperatura	11	1	1,5	6	4	1,8	2	30	2,1
Invierno	11	0,5	1,5	6	4	2,25	2,2	30	2,2
Primavera	8	1	1	4	3,25	1,5	1,6	25	1,7

Las conductividades indicadas en la tabla 2 son aproximadas y se han establecido para un agua de riego de 0,65 dS m⁻¹ de conductividad y una concentración de cloruro sódico de aproximadamente 2 mmol L⁻¹. La concentración de amonio se deberá ajustar en cada momento, según se explica en el siguiente apartado, con el objetivo de mantener en drenaje un pH adecuado (entre 5 y 6,5). Conviene utilizar un complejo de microelementos comercial que incorpore todos los iones metálicos en forma quelatada y en el que al menos parte del hierro corresponda a quelato EDDHA, con el fin reducir los problemas de asimilación. Puede ser necesario realizar aportaciones extra de boro y zinc, aparte del que incorpora el complejo, con el fin de alcanzar en la solución nutritiva una concentración de dichos microelementos de 0,3-0,4 mg L⁻¹.

8. Seguimiento del cultivo

A diario es conveniente cuantificar el drenaje producido y, al mismo tiempo, medir la conductividad eléctrica y el pH del mismo, así como de la solución nutritiva aportada. Los desajustes de ésta última con respecto a los valores de consigna introducidos en el programador de riego, indican la existencia de alguna anomalía en el cabezal de riego que será necesario corregir (inadecuada calibración o mal estado de las sondas de conductividad eléctrica o pH, cambio de la calidad del agua de riego, preparación equivocada de las soluciones madre, etc). Normalmente ocurre que el pH de la solución de aporte es algo mayor que el valor de consigna y ello se debe a que con la neutralización de los bicarbonatos se produce ácido carbónico, que es inestable y se va a la atmósfera en forma de CO₂. Sin embargo, en el momento mismo del ajuste no se ha marchado totalmente y, al hacerlo con posterioridad, la solución pierde parte de su efecto acidificante y sube ligeramente su pH. Por ello, para conseguir un valor final de 6, se suele indicar al programador otro de 5,3-5,5. En cuanto a la conductividad, no deben existir diferencias importantes entre el valor medido y el de consigna.

En el drenaje, generalmente, la conductividad se sitúa por encima del valor correspondiente a la solución de aporte, y esta acumulación puede llegar a ser de más de dos unidades. No obstante, dependiendo de la especie de la que se trate y de las condiciones ambientales existentes, se fijará un valor de conductividad en el drenaje máximo que no se debe superar con el fin de alcanzar producciones aceptables. En el caso concreto del pimiento dicho valor se sitúa en 3-4 dS m⁻¹, como ya se comentó con

anterioridad. Si resulta mayor, será necesario entonces aumentar el porcentaje de lixiviación o modificar la solución de aporte, disminuyendo las concentraciones de nutrientes.

Aunque resulta menos frecuente, hay ocasiones en las que la conductividad del drenaje es inferior a la de aporte. Esto sucede cuando se emplean aguas de buena calidad y el cultivo se encuentra en la etapa inicial de su desarrollo, de forma que presenta un rápido crecimiento y unas altas concentraciones de absorción.

En lo que se refiere al pH del drenaje, éste puede ser mayor o menor que el de aporte dependiendo del balance iónico de la solución absorbida por el cultivo. De este modo, si se produce una mayor absorción de aniones que de cationes, tiene lugar una absorción neta de H^+ , por lo que sube el pH del medio radicular. Por el contrario, si se absorben más cationes que aniones, se liberan H^+ y baja el pH. La primera situación es típica de cultivos jóvenes con rápido crecimiento ya que absorben muchos nitratos. Para tratar de compensarlo, conviene aumentar el aporte de nitrógeno en forma amoniacal, equilibrándose mejor el balance entre aniones y cationes. En cuanto a la segunda situación, ésta es típica de cultivos en maduración ya que la absorción de potasio es elevada mientras que la de nitratos es reducida debido al escaso crecimiento, y puede llegar a ser crítica, registrándose valores de pH inferiores a 5. Para contrarrestarlo será necesario no incorporar amonio (salvo el que lleva el nitrato cálcico), subir el pH de la solución aportada (aunque no es conveniente que exceda de 6,2 para mantener la estabilidad de los quelatos) e incluso a veces hay que recurrir a aumentar el poder tampón de dicha solución añadiendo hidróxido potásico o bicarbonato potásico.

En lo que se refiere a los análisis químicos, resulta aconsejable analizar conjuntamente las soluciones nutritivas de aporte y drenaje ya que a veces se presentan valores anómalos en ésta última debido a que la primera resulta incorrecta, como consecuencia de un desajuste en la inyección de fertilizantes, en la preparación de las soluciones madre, etc. Asimismo, si se sospecha que ha cambiado la composición del agua de riego, se debe analizar ésta para reestructurar el abonado.

La solución drenada debería analizarse mensualmente para comprobar que el comportamiento del cultivo se ajusta a nuestras previsiones, o por el contrario éste presenta una absorción de nutrientes diferente a la inicialmente supuesta. Dicha comprobación se realizará teniendo en cuenta la solución nutritiva de aporte y el comportamiento normal de los diferentes iones, el cual queda reflejado en la tabla 1. Si la concentración de un determinado ion en el drenaje resulta excesivamente baja o elevada en base a esas referencias, habrá que alterar adecuadamente la solución nutritiva aportada. Resulta especialmente importante realizar una comprobación durante la fase de máxima fructificación ya que, como se ha comentado anteriormente, en ella cambia sustancialmente la absorción de nutrientes. Asimismo, debe llevarse a cabo en el caso de que aparezca cualquier deficiencia nutricional. En tal situación puede resultar muy útil un análisis foliar con el fin de complementar la información.

A veces es posible observar incorrecciones en el desarrollo de la planta que no se pueden detectar mediante análisis químicos de la solución nutritiva ya que se deben a problemas radiculares o ambientales que dificultan la absorción de nutrientes, aunque éstos se encuentren en la solución a dosis correctas (Cánovas, 1995). Por tanto será necesaria la observación atenta del cultivo para detectar rápidamente las posibles alteraciones que puedan producirse y corregirlas a tiempo. En especial, resulta importante controlar el nivel de hidratación del sustrato pues, si es elevado, puede originar problemas de oxigenación en las raíces y la muerte de las mismas, y, por el

contrario, si es bajo, la planta puede sufrir déficit hídrico, lo que repercutiría gravemente sobre el rendimiento del cultivo.

Referencias

- Cánovas, F. 1995. Manejo del cultivo sin suelo. En: El cultivo del tomate. F. Nuez (Ed.) Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 227-254.
- Cánovas, F. 1998. Gestión de riegos y fertirrigación en invernadero. En: Tecnología de invernaderos II. Curso Superior de Especialización. J. Pérez-Parra; I.M. Cuadrado (Ed.) Editado por la Consejería de Agricultura y Pesca, F.I.A.P.A. y Caja Rural de Almería. Almería. 237-250.
- Cánovas, F. 1999. Fisiopatías en cultivos sin suelo. En: Cultivos sin suelo II. Curso superior de especialización (M. Fernández y I.M. Cuadrado). Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería y Caja Rural de Almería: 349-360.
- Casas, A. 1999. Seguimiento analítico de los cultivos: características de la zona que condicionan la solución nutritiva. Ajustes específicos. En: Cultivos sin suelo II. Curso Superior de Especialización. M. Fernández; I.M. Cuadrado (Ed.) Editado por la Consejería de Agricultura y Pesca, F.I.A.P.A. y Caja Rural de Almería. Almería. 267-286.
- González, A.J. 2001. Balance de concentraciones en cultivos sin suelo. Aplicaciones. Editado por el Instituto de Estudios Almerienses de la Diputación de Almería. Almería. 147 pp.
- Lorenzo, P.; Medrano, E. y García, M. 1993. Irrigation management in perlite. *Acta Horticulturae*, 335: 429-434.
- Martínez, E.; García, M. 1993. Cultivos sin suelo: hortalizas en clima mediterráneo. Ediciones de Horticultura. Reus. 123 pp.
- Sonneveld, C.; van der Burg, A.M.M. 1991. Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 39: 115-122.
- Tortosa, F. 1999. Cultivo hidropónico del pimiento. En: Cultivos sin suelo II. Curso superior de especialización (M. Fernández y I.M. Cuadrado). Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, Fundación para la Investigación Agraria en la Provincia de Almería y Caja Rural de Almería: 485-497.