



Manejo de tomate hidropónico

5

Kris A. G. Wyckhuys y Hugo Escobar

Introducción

Aunque literalmente hidroponía significa “la producción de cultivos en agua”, en la actualidad se considera como la ciencia de producir plantas “sin suelo”. A lo largo de la historia de la humanidad, la hidroponía ha sido adoptada por varias culturas. Ejemplos de ésta son los jardines colgantes de Babilonia, el cultivo de plantas en agua en el antiguo Egipto y los jardines flotantes de los Aztecas, en México, igual que en la China imperial. Todas esas culturas ensayaron con la producción de plantas sin suelo y libremente adoptaron esas estrategias en sus sistemas agrícolas. Sin embargo, esto duró hasta fines de 1920 cuando la industria de invernaderos mostró interés en adoptar sistemas hidropónicos a escala comercial. Después de varias décadas de ensayos, se observó el despegue definitivo de cultivos sin suelo en Japón y Europa.

Hoy en día, la hidroponía se ha vuelto una realidad para productores de hortalizas en varias partes del mundo, está ampliamente adoptada en virtualmente todas las zonas climáticas y fundamentada en una ciencia bien desarrollada. Con el desarrollo de los plásticos, la automatización y los sistemas de fertirriego, la producción de hortalizas

por hidroponía se ha convertido en una opción relativamente barata, eficaz y conveniente. Ha hecho posible la producción de hortalizas en zonas áridas o bajo condiciones adversas; ya está siendo evaluada esta producción en submarinos y estaciones espaciales. A pesar de sus antecedentes históricos y méritos actuales, la hidroponía es relativamente joven y su potencial ha sido apreciado paulatinamente. También, aunque la (aparente) complejidad de sistemas hidropónicos le crea una imagen de ser sólo apta para el mundo desarrollado, tiene bastante potencial de contribuir a la seguridad alimentaria en países en desarrollo. De hecho, en la actualidad en varias zonas del mundo en vías de desarrollo se están promoviendo prácticas de hidroponía "simplificada" para producción de lechuga, tomate y zanahoria, entre otras plantas, en zonas urbanas. Vale también destacar la creciente competitividad de la producción hortícola en el mundo en vías de desarrollo considerando los altos costos de mano de obra y creciente precio de calefacción de invernaderos en Europa y EE.UU., en la cual la adopción de cultivos hidropónicos debería jugar un rol importante. En Colombia, la hidroponía está adaptada principalmente a la producción de flores en la Sabana de Bogotá y Antioquia, pero sigue siendo una rareza en los demás sistemas agroproductivos. Falta más difusión sobre sus múltiples ventajas y más asistencia técnica para establecerla en nuevos cultivos.

En general, se notan grandes incrementos de rendimiento para cultivos hidropónicos, en comparación con cultivos en suelo. Ese incremento de niveles de producción se debe a varios factores, entre ellos la disminución de problemas con plagas y enfermedades, especialmente a nivel radicular y la facilidad para hacer una fertilización dirigida y ajustada a las necesidades de la planta. Aparte de los beneficios en rendimiento, existen otras ventajas de uso de hidropónicos. Sin embargo, hay también ciertas desventajas de su uso, como son el costo inicial para adecuar la infraestructura (por ejemplo, los sistema de riego, bombas, inyectores, equipos de monitoreo, entre otros), la presencia de ciertas enfermedades que pueden proliferar por el sistema de fertirriego y la complejidad en el manejo de la nutrición vegetal. No obstante, las ventajas –nutrición más eficiente, potencial de agroproducción en condiciones adversas, uso eficiente de agua, fertilizante y espacio, y más altos rendimientos– superan con creces las desventajas.

Componentes del sistema hidropónico

Los principales componentes de todo sistema hidropónico son: 1) la solución nutritiva, 2) el sustrato o medio de cultivo y 3) la infraestructura o sistema de cultivo. A continuación se describe cada uno de estos componentes y las características de los sistemas comúnmente usados a nivel mundial y de aquellos con alto potencial para ser adoptados en Colombia en cultivos de tomate bajo invernadero.

La solución nutritiva

La solución nutritiva es, sin duda, uno de los componentes claves de cualquier sistema hidropónico y su principal función es proveer de agua y nutrición mineral a las plantas establecidas. Como solución nutritiva generalmente se usa una solución de agua con sales de nitrógeno (N), fósforo (P), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg), con la adición de múltiples microelementos.

Para elegir la solución nutritiva apropiada para el sistema de producción, hay que tomar en cuenta: calidad de agua, nutrición hídrica y nutrición mineral del cultivo.

La calidad del agua es de primordial importancia puesto que el buen crecimiento del cultivo afecta los niveles de producción y calidad del fruto. Básicamente, en sistemas hidropónicos y con riego por goteo es posible el uso de aguas que serían inutilizables bajo otros sistemas de riego (aspersión, inundación). Sin embargo, la presencia de elementos tóxicos en el agua (p.ej., sodio, cloruros, boro) condicionan el tipo de cultivo y su manejo, mientras que la presencia de metales pesados tiene repercusiones para la inocuidad del producto. La calidad del agua –y la presencia de ciertos nutrientes (nitrógeno, fósforo)– determinará también las cantidades de sales de fertilizante que se debe aplicar en la solución nutritiva (antes de hacerla circular por el cultivo). La calidad del agua también afecta la factibilidad de ciertos tipos de sistema. Por ejemplo, con aguas de pobre calidad –como aguas salinas, con altos niveles de cloruro y sodio– se hace difícil la adopción de sistemas cerrados por problemas de fitotoxicidad debido a la acumulación rápida de elementos indeseables. Para elegir el cultivo apropiado y determinar

la idoneidad del agua para uso en sistemas hidropónicos, se recomienda un análisis de ésta donde se determina, como mínimo, el pH (dureza), la salinidad y el contenido de calcio, magnesio, hierro, carbonatos, sulfatos y cloruro. En general, no se recomienda el uso de aguas con cloruro de calcio $-\text{CaCl} > 50 \text{ ppm}-$.

Uno de los objetivos de sistemas de riego y la provisión de una solución nutritiva dentro de aquellos, es responder a la demanda de agua por parte de la planta. El suministro de agua a la planta debe ser acorde a las demandas por evapotranspiración y al estado fenológico del cultivo, pero también depende del medio de cultivo y las especificidades del sistema de riego adoptado. La evapotranspiración depende tanto de las condiciones climáticas (temperatura, brillo solar, humedad relativa) como de las características del cultivo (etapa fenológica y el área foliar, entre otros). El medio de cultivo determina igualmente la duración y frecuencia de ciclos de irrigación. Los sustratos con partículas finas (turba, lana de roca) generalmente retienen más agua que aquellos que son gruesos (arena, grava, cascarilla de arroz, vermiculita).

El suministro de agua debe ser ajustado frecuentemente, tanto para impedir el estrés hídrico de la planta (falta de agua), como para evitar el sobre uso de la solución nutritiva (agua y fertilizantes).

En sistemas hidropónicos, la nutrición mineral de la planta se aporta por completo a través de la solución nutritiva (con eventuales correcciones mediante aplicaciones foliares), lo cual permite un control preciso de la fertilización para obtener mayor rendimiento en la producción. Sin embargo, equivocaciones en el control de la fertilización (o ajuste del pH) pueden causar serios problemas en todo el cultivo. Al igual que el aporte de agua, la necesidad de nutrientes minerales depende del tipo y estado fenológico del cultivo, del tipo de sustrato y de las condiciones climáticas. Sin embargo, en la preparación de la solución nutritiva debe considerarse el contenido de minerales y sales en el agua de entrada.

Para monitorear la solución nutritiva, se aconseja hacer análisis frecuentes del sustrato de siembra. También, se pueden hacer análisis foliares para determinar ciertas deficiencias de nutrientes en la planta y hacer los ajustes ne-

cesarios en la solución nutritiva. Se aconseja así mismo analizar la solución de drenaje con cierta frecuencia, para determinar si la solución nutritiva tiene la composición requerida y detectar la eventual acumulación de elementos tóxicos. Para ajustar los esquemas de fertilización, de igual forma es muy importante observar los síntomas específicos de deficiencia de ciertos nutrientes y tomar medidas correctivas. También es primordial detectar los síntomas de toxicidad por exceso de sales: enanismo del cultivo con hojas pequeñas de color verde oscuro, quemazón de los márgenes de las hojas y clorosis (o cambio a color azul) del tejido vegetal.

En sistemas cerrados (cuando se reutiliza la solución nutritiva), la duración de ésta normalmente es de 2-3 semanas y depende de la etapa fenológica y las condiciones climáticas. Sin embargo, si hay buen conocimiento de los niveles de absorción de ciertos nutrientes –y se hace un monitoreo seguido de la solución–, se pueden adjuntar aquellos elementos deficientes y aumentar la vida útil de la solución nutritiva. Además de ajustar la concentración de nutrientes, debe mantenerse la conductividad eléctrica de la solución nutritiva dentro de cierto rango (lo cual se determina usando un medidor de conductividad). La concentración total de nutrientes en una solución nutritiva debe ser de 1,000-1,500 ppm (o de 1,5-3,5 mMho), con un rango de 2,5-3,5 mMho preferido para cultivos de tomate.

En sistemas cerrados es necesario tratar la solución para hacerla apropiada nuevamente para uso en el sistema productivo. Normalmente se hace una aireación (con bomba de aire) y una refrigeración, para luego realizar un tratamiento de esterilización (para eliminar posibles patógenos). Los tratamientos con mayor potencial en sistemas hidropónicos son el uso de calor, ozono y la esterilización ultra violeta (UV). Los equipos UV, cuyo costo depende de su capacidad, generalmente son efectivos contra bacterias, hongos, ciertos virus y nemátodos. La efectividad de equipos de esterilización UV ha sido comprobado contra *Botrytis cinerea*, *Cladosporium sp.*, *Fusarium spp.*, *Sclerotinia sclerotiorum*, *Verticillium albo-atrum* y otros. Sin embargo, los tratamientos UV pueden reducir el contenido de manganeso y molibdeno en la solución nutritiva hasta en un 20% y causar la precipitación de casi el 100% de hierro como óxido hídrico de hierro. Existe la posibilidad de que

una solución apropiada del tipo de quelato de hierro pueda resolver ese problema.

El medio de cultivo (sustrato)

El medio de cultivo o sustrato es otro componente crucial del sistema hidropónico, del cual depende el anclaje de la planta y el desarrollo del sistema radical del cultivo. También se constituye en el medio de almacenamiento de agua y reserva de nutrientes. La selección del sustrato depende de su disponibilidad local, el costo, sus propiedades físicas, químicas y biológicas, y del sistema hidropónico en el cual se usará. Al mismo tiempo, su selección dependerá de las características del cultivo y de ciertas variables ambientales. Aunque no existe un sustrato ideal –cada medio de cultivo tiene sus ventajas y desventajas–, sí hay un manejo adecuado para cada sustrato.

En la selección del sustrato deben considerarse también criterios medioambientales, siendo posible utilizar subproductos agrícolas y forestales (corteza, aserrines, fibra de coco, cascarilla de arroz), materiales contaminantes del medio ambiente (algas) o materiales de desecho (ladrillo molido, plástico molido, escorias, cenizas y residuos sólidos urbanos). Todo sustrato debe ser esterilizado o desinfectado para eliminar o disminuir los riesgos fitosanitarios del cultivo. También debe tenerse en cuenta el posible impacto ambiental de ciertos sustratos después de su utilización. Por ejemplo, la lana de roca es un sustrato popular en algunos países, pero no es biodegradable y sus residuos son nocivos para la salud humana, mientras que los sustratos orgánicos sí son biodegradables.

Hay diferentes formas de clasificar los sustratos que pueden utilizarse en sistemas hidropónicos. Una primera clasificación esta basada en el *origen del producto*, con sustratos de origen natural y sintético. Los sustratos de origen natural pueden ser orgánicos (de procedencia animal o vegetal) o inorgánicos desde el punto de vista químico, incluidos productos no procesados como grava, arena y productos procesados como lana de roca, perlita, vermiculita. Una segunda clasificación esta basada en la *granulometría* –que se basa en el tamaño de las partículas–. Existen sustratos con partículas de tamaño menor a 3 mm de diámetro (arena, perlita, lana de roca) y partículas mayores a 3 mm de diámetro (grava, basalto). Una tercera clasificación se basa

en la *actividad química*: existen sustratos inertes que no interactúan con la solución nutritiva, como la lana de roca, grava y arena silícea, y otros químicamente activos que van liberando y/o reteniendo nutrientes, como la turba, el compost y la vermiculita. Falta destacar que muchos de esos productos se mezclan para así obtener las adecuadas condiciones físicas, químicas y/o biológicas del sustrato.

La retención de la humedad en el sustrato está principalmente determinada por la forma y tamaño de las partículas y por el porcentaje de espacio poroso entre ellas. Las partículas de forma irregular tienen un área superficial mayor que las partículas lisas, y así pueden retener más agua. Sin embargo, un sustrato también debe permitir un buen drenaje y el movimiento de oxígeno, para lo cual deben evitarse sustratos con partículas muy finas.

La calidad del sustrato también está determinada por sus características químicas, como la capacidad de intercambio iónico (retención y/o liberación de nutrientes), el pH y la presencia de sustancias fitotóxicas. Por ejemplo, el aserrín, las algas o la arena (marina) pueden tener altos contenidos de sal que podrían afectar el cultivo. Otros sustratos como la grava o la arena pueden tener altos contenidos de carbonato de calcio, lo cual podría aumentar demasiado el pH. Todas estas consideraciones deben preverse antes de establecer un sistema y/o cultivo con cierto tipo de sustrato, para prevenir dificultades de manejo más adelante.

Cualquier tipo de sustrato, cuando es utilizado por varios ciclos de cultivo, puede ir acumulando organismos patógenos, causando enfermedades en él. Por eso es necesario esterilizar el medio de cultivo con cierta frecuencia (preferiblemente después de cada ciclo de cultivo). La esterilización puede hacerse con vapor y con esterilizantes químicos. Para esterilizar con vapor se inyecta éste a una temperatura de 82 °C (durante media hora) en las camas de cultivo. Su eficacia depende del tipo de medio, siendo efectivo hasta una profundidad de 20 cm en aserrín, pero sólo hasta 10 cm en mezclas de aserrín con arena. Para la esterilización química hay varios productos disponibles. El formaldehído es un producto muy eficiente contra hongos, pero no actúa contra nemátodos o insectos. Se recomienda cubrir las áreas tratadas por 24 horas con un material impermeable.

Sustratos de mayor uso en Colombia

En Colombia, son varios los sustratos que además de su disponibilidad permanente y costo razonable, ofrecen características físicas adecuadas para la producción de tomate en hidroponía. En la mayoría de los casos la preparación del sustrato implica la mezcla de dos o más materiales en diferentes proporciones.

Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es un subproducto de la industria molinera. En Colombia, es abundante en las regiones destinadas a la producción de arroz. Entre sus ventajas como sustrato hidropónico están sus propiedades físicas como baja densidad aparente lo que lo hace muy liviano, con buen drenaje y buena aireación. Es considerado como un sustrato orgánico con la ventaja de que tiene una baja tasa de descomposición. A nivel nacional, es el sustrato más empleado para los cultivos hidropónicos. Se utiliza en tres modalidades: entera, molida o parcialmente quemada. Sus principales desventajas son los costos de transporte, la posibilidad de contaminación por herbicidas utilizados en el cultivo de arroz y la baja capacidad de retención de humedad, por lo cual se recomienda mezclarla con otros sustratos para mejorar algunas de sus propiedades físicas. Otra de sus limitaciones es la fijación inicial de algunos elementos nutritivos, por lo cual se recomienda acondicionar la cascarilla con algunos fertilizantes unos días antes de ser usada como sustrato de siembra.

Escoria

La escoria es un subproducto de la purificación de metales mediante la fundición en la cual las impurezas se separan del metal fundido y se pueden retirar. Está compuesta por una mezcla de óxidos y sulfuros metálicos. Su uso como sustrato de siembra se aconseja en mezclas con otros sustratos en donde la proporción de escoria no sobrepase el 30 %.

Fibra de coco

La fibra de coco se obtiene del fruto de la palma de coco (*Cocos nucifera*) y contiene fibras cortas y partículas más o menos finas. Se utiliza comúnmente en mezclas para

sustratos de semillero o plantas ornamentales, como *mulching* de suelos, y como sustrato en sistemas hidropónicos para hortalizas o flores de corte. Algunas de las características interesantes de la fibra de coco son su alta capacidad de retención hídrica (puede retener hasta 8 veces su peso en agua), su elevada capacidad de intercambio catiónico, su eventual contenido de sales y su resistencia a la degradación microbiana. Las ventajas de la fibra de coco frente a otros sustratos son: inercia térmica, alto poder de retención hídrica, mayor durabilidad, densidad aparente baja, ausencia de efectos negativos hacia la producción y ser ambientalmente amigable. Entre las desventajas está su alto costo, para lo cual comúnmente se usa en mezclas con otros materiales. Otra desventaja es la necesidad de una solución nutritiva con contenido relativamente alto de nitrógeno y fósforo –por lo menos al inicio del cultivo– (considerando la actividad microbiana, típica para sustratos orgánicos).

Ceniza de carbón mineral

Este material se obtiene como subproducto de la generación térmica de algunas termoeléctricas del país. Se caracteriza por su alta densidad aparente y alta retención de humedad. Por tanto, se utiliza en mezcla con otros materiales muy livianos como la cascarilla de arroz con el fin de mejorar sus propiedades físicas, especialmente la retención de humedad.

Sistemas hidropónicos: diseño e infraestructura

Existe una gran variedad en sistemas hidropónicos que varían según su diseño, el medio en el cual se desarrollan las raíces (aire, agua o sustrato), el manejo de la solución nutritiva y el nivel de automatización del sistema.

Con respecto al manejo de la solución nutritiva existen dos tipos de sistemas hidropónicos: sistemas abiertos –donde los drenajes provenientes del cultivo son desechados– y sistemas cerrados –donde la solución nutritiva se recircula aportando de manera casi continua la nutrición que requiere la planta–. En los sistemas cerrados, la solución nutritiva de drenaje es recogida y reajustada con agua y fertilizantes para ser nuevamente recirculada en el sustrato. En este sistema, a diferencia del verdadero NFT (ver más

adelante), el riego no es continuo y ni siquiera intermitente a intervalos periódicos, sino puntual, en función de las necesidades del cultivo a lo largo del día, aportando cada vez una determinada dosis de agua para conseguir la rehidratación del sustrato y la renovación de la solución contenida en él. La renovación continua de la solución nutritiva en el entorno de la raíz permite un suministro adecuado de nutrientes minerales y oxígeno, siempre y cuando se realice un correcto manejo del sistema.

A nivel mundial, se ha notado cierta tendencia a adoptar sistemas cerrados, lo cual está relacionado con la escasez de recursos hídricos, al aumento en el precio de los fertilizantes químicos y la creciente necesidad de evitar los problemas ambientales propios de los sistemas abiertos. En general, los sistemas cerrados son más eficientes y menos costosos. En Colombia, la ausencia de legislación sobre la reutilización de aguas residuales y la falta de conocimiento sobre los sistemas cerrados, hacen que la producción hidropónica de tomate se haga principalmente con sistemas abiertos.

Los sistemas totalmente hidropónicos se basan en el cultivo de plantas en agua, lo cual incluye los sistemas aeropónicos y el sistema denominado "técnica de la lámina nutriente" –*Nutrient Film Technique*, conocido como NFT, por sus siglas en inglés–. En los sistemas aeropónicos, las raíces de las plantas se suspenden dentro de cámaras oscuras en las cuales se mantiene una humedad relativa de casi 100%, vaporizando una solución nutritiva adecuada. Aunque estos sistemas son muy comunes a nivel de laboratorio, todavía no han sido adoptados ampliamente a nivel comercial a pesar de su alto potencial.

La NFT es una técnica de recirculación de nutrientes y por tanto se utiliza en sistemas cerrados. Consiste en mantener las raíces del cultivo inmersas en una corriente de solución nutritiva, continua o intermitente de muy alta frecuencia, sin que exista ningún sustrato de sostén. La mayor ventaja es que el agua se encuentra muy fácilmente disponible para las plantas y se minimiza el gasto energético que éstas deben hacer para la absorción de nutrientes. En un sistema NFT sencillo los principales elementos son: a) el tanque colector, b) una bomba hidráulica, c) las tuberías de distribución, d) los canales de cultivo y e) la tubería y el tanque de recolección de la solución nutritiva.

Otro sistema promisorio es el sistema "Ariel", desarrollado a mediados de los años 80. En este sistema, las plantas crecen con las raíces expuestas para así asegurar un buen intercambio de nutrientes entre planta y solución nutritiva. Las plantas se siembran en tapetes de un material absorbente – los cuales se colocan en forma de crestas dentro de bandejas o canales con recirculación de solución nutritiva–. Encima de cada canal se coloca una capa de polietileno de color blanco (en la parte externa) y negro (en la parte interna), la cual se enrolla para formar 2 tubos dentro de los cuales circulará la solución nutritiva y crecerán las raíces. La solución nutritiva se recircula alternadamente entre ambos canales, con un canal recibiendo una solución de alto contenido de nutrientes y otra de bajo contenido. Durante cada ciclo, la solución de alto contenido circula por 15 minutos, mientras que la solución de bajo contenido circula por 3 horas y media. Esa circulación alternativa separa los componentes gaseosos y acuosos del ambiente radicular. Con ese sistema se han reportado incrementos de hasta 10% en la producción.

El sistema "Ariel" efectivamente elimina uno de los problemas importantes de los sistemas NFT –la falta de oxígeno–, por lo cual se mueren las raíces y la planta se marchita o muestra síntomas como podredumbre apical.

Por otra parte, están los sistemas de producción hidropónica que utilizan un sustrato para el anclaje de la planta (cascarilla de arroz, perlita, turba, o fibra de coco, entre otros). Estos sistemas de producción pueden ser abiertos o cerrados. Entre los sistemas hidropónicos existe la producción en arena, un método de hidroponía muy popular en desiertos y ambientes muy arenosos. Aunque esos sistemas han caído en desuso y están siendo remplazados por la NFT o sistemas en lana de roca, pueden ser aptos para ciertas zonas colombianas.

También existen sistemas de producción en medios de aserrín y lana de roca. En general, los sistemas con aserrín son populares en zonas de industria forestal (como Canadá), mientras que los cultivos en lana de roca predominan a nivel mundial. Aunque los cultivos en aserrín no tienen mucho potencial en Colombia, sistemas muy similares como por ejemplo aquellos que usan cascarilla de arroz y/o fibra de coco son frecuentemente usados en cultivos de tomate bajo invernadero. Otros sistemas como

la producción en grava fueron muy importantes entre las décadas de 1940 y 1970, y sigue siendo popular en áreas con abundancia de roca volcánica, aunque han sido reemplazados por el NFT.

Diseño

Por lo general, en Colombia los sistemas hidropónicos se diseñan de acuerdo a la disposición de las plantas en el cultivo. El método más común es hacer eras o camas de cultivo que pueden estar a nivel del suelo o a una altura mayor. En cualquier caso, la principal modalidad para hacer las camas consiste en elaborar contenedores de polietileno negro que se ubican longitudinalmente. Cuando se hacen a nivel del suelo, generalmente se ubican sobre una zanja previamente abierta en éste con una profundidad no mayor a 20 cm. En los sistemas elevados, las láminas de polietileno se fijan a unos alambres longitudinales que a su vez están soportados por una estructura de madera, formando contenedores semicirculares en los cuales se coloca el sustrato de cultivo (Foto 9). En la parte inferior se colocan otras láminas de polietileno con el fin de recolectar la solución nutritiva drenada. En ambos diseños, el ancho de las camas varía entre 60 y 80 cm con dos surcos por cama y una profundidad de hasta 20 cm de cada contenedor. Se estima que el volumen de sustrato ocupado por cada planta es de 0,009 m³.

Otra modalidad son los sistemas de producción en contenedores individuales para cada planta, generalmente en bolsas de polietileno o macetas con volumen de entre 10 y 20 litros, con pequeños agujeros en la parte inferior, que se colocan sobre el suelo a distancias de entre 35 y 50 cm formando los surcos de cultivo.

El sistema de riego más utilizado es la cinta de riego con emisores de bajo caudal, ubicados cada 10 o 20 cm. Los sistemas con contenedores individuales para cada planta requieren de un sistema de riego localizado donde se coloca un gotero de mayor caudal por cada planta.

Manejo de sistemas hidropónicos

En sistemas hidropónicos con aserrín o cascarilla se recomienda hacer un monitoreo frecuente de la conductividad

eléctrica del medio de cultivo. Se considera que una conductividad mayor a 4 millimhos/cm atrasará el crecimiento de la planta, lo cual se puede prevenir con el uso de una solución nutritiva con volumen 15% superior a los requerimientos de la planta. Una vez la conductividad sobrepasa los niveles críticos, se puede diluir la solución nutritiva al 25%, incrementar el volumen con 30% o aplicar agua pura por varios días hasta que se normalice nuevamente la conductividad dentro del sustrato.

Estudio de caso: producción de tomate hidropónico en la Sabana de Bogotá

En el Centro de Investigaciones y Asesorías Agroindustriales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano CIAA, (Chía, Cundinamarca) se adelantó un estudio sobre producción de tomate hidropónico con el híbrido larga vida Daniela 593 (Hazera-Israel), en un invernadero tipo Richel de 300 m².

Para el riego se construyó un tanque con capacidad de 10.000 litros para el almacenamiento de la solución nutritiva. El tanque se ubicó a 2,5 m de altura y a unos 35 metros del invernadero con el fin de hacer riego por gravedad. También se utilizó una bomba de 0,25 HP y un temporizador para la programación de riegos.

Para el sistema de riego se utilizó cinta de riego con emisores ubicados cada 10 cm y con un caudal aproximado de 1 l/h-1. Para cada hilera o surco de plantas se utilizó una línea de riego.

La densidad de siembra fue de 2,5 plantas por metro cuadrado. Se hicieron camas dobles con distancia de 1,60 m entre centros de las camas y 0,6 m entre los dos surcos de cada cama. La distancia entre plantas a lo largo del surco fue de 0,5 m. Para cada surco se utilizaron bolsas tubulares de 13,5 m de longitud x 0,3 m de ancho y 0,12 m de altura, con un volumen aproximado de 0,5 m³. En total se tuvieron 12 camas, es decir, 24 líneas de bolsas tubulares con 27 plantas cada una. Al final de las líneas se instaló un sistema de drenaje para la evacuación de los excedentes de solución nutritiva. Las plántulas se trasplantaron con cuatro semanas de desarrollo.

El sustrato empleado fue cascarilla de arroz quemada (70%) en mezcla con ceniza de carbón mineral (30%). Las

características de la cascarilla de arroz de describen en la tabla 12. Para la adecuación de la fertilización del sustrato se aplicó 1 kg de sulfato de calcio, 1 kg de nitrato de magnesio, 1 kg de superfosfato triple y 30 gramos de quelato de hierro por cada metro cúbico de sustrato.

La fertilización del tomate hidropónico se realizó mediante el suministro de soluciones nutritivas preparadas con fertilizantes de alta solubilidad como el nitrato de calcio, nitrato de potasio, fosfato monoamónico, fosfato monopotásico, sulfato de magnesio, entre otras. Para la preparación de la solución nutritiva se utilizaron dos canecas de 200 litros cada una, denominadas caneca A y caneca B, con el fin de preparar soluciones altamente concentradas. En la caneca A se adicionó nitrato de calcio y la mitad del nitrato de potasio, mientras que en la caneca B se agregaron las fuentes que contienen sulfatos (de magnesio y de potasio), los fosfatos y los elementos menores. Después de calcular la dilución correspondiente, a través de un sistema de dosificadores, una parte de solución nutritiva de cada caneca se disolvió en el tanque de 10.000 litros de agua en el cual se preparó la solución nutritiva final para el cultivo, llamada "solución estándar" cuya composición se presenta en la tabla 13.

Los micronutrientes, por su parte, se aplicaron en la solución estándar con la siguiente concentración –expresada en micromoles por litro ($\mu\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$): hierro (Fe) 15, manganeso (Mn) 10, cobre (Cu) 0,75, zinc (Zn) 5, boro (B) 25 y molibdeno (Mo) 0,5. Inicialmente, se utilizó una solución para la saturación del sustrato antes del trasplante. Esta solución es una modificación de la solución estándar, en la que se disminuyeron 1, 0,5 y 3,5 $\text{mmoles}\cdot\text{l}^{-1}$ de nitrógeno nítrico, nitrógeno amoniacal y potasio, respectivamente, con relación a la solución estándar. Los elementos restantes se mantuvieron con la misma concentración.

Después del trasplante, se aplicó una solución nutritiva durante la fase de enraizamiento de las plantas que consistió en un aumento de 1, 0,1 y 0,5 $\text{mmoles}\cdot\text{l}^{-1}$ en la concentración de nitrógeno nítrico, nitrógeno amoniacal y magnesio; y una disminución de 1 $\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$ de potasio con respecto a la solución estándar. Finalmente, se utilizó la solución estándar hasta la aparición del primer racimo floral. A partir de ese momento, la solución nutritiva se fue modificando en función de los resultados de los análisis del sustrato y de las necesidades de la planta.

Tabla 12. Características físicas de la cascarilla de arroz quemada.

Característica	Unidad	Valor
Humedad	% (peso)	23,2
Cenizas	% (peso)	41,1
Materia orgánica	% (peso)	59
Densidad real	$\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$	1,83
Densidad aparente	$\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$	0,25
Porosidad total	% (vol)	86
Porosidad aire	% (vol)	36
Humedad a capacidad de campo	%	53

Tabla 13. Solución estándar para la producción de tomate hidropónico bajo invernadero.

Elemento	NO3	NH4	P	K	Ca	Mg	SO4
$\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$	13,75	1,25	1,25	8,75	4,25	2	3,5
ppm	192	18	39	341	170	48	112

Fuente: Bemestingsadviesbasis glastuinbouw.

El pH del sustrato presentó un comportamiento parecido al de la solución nutritiva y al del agua de drenaje, pero muy atenuado si se comparan las curvas respectivas. El promedio de pH en el ciclo de cultivo fue de 6,4, con un mínimo de 5,7 y un máximo de 7,4. El pH promedio durante este ciclo de cultivo fue significativamente superior al del ciclo anterior, en donde el promedio estuvo en 4,7. Esto se logró gracias al incremento en la fertilización con cal dolomítica durante la preparación del sustrato, evitándose también la adición de potasa cáustica en la solución nutritiva para mantener elevados los niveles de pH.

La conductividad eléctrica (CE) del cultivo se constituyó en un factor de especial importancia para su desarrollo. Debido a la continua aplicación de fertilizantes en la solución nutritiva, la tendencia a la acumulación de sales fue muy elevada y por tanto fue necesario mantener los niveles de CE bajo un control permanente. El valor promedio de la CE fue de 2,5 dS·m⁻¹ y estuvo oscilando entre 1,8 y 2,3 dS·m⁻¹. En las últimas semanas se presentó un incremento de la conductividad, alcanzando valores de hasta de 3,8 dS·m⁻¹, considerados muy altos.

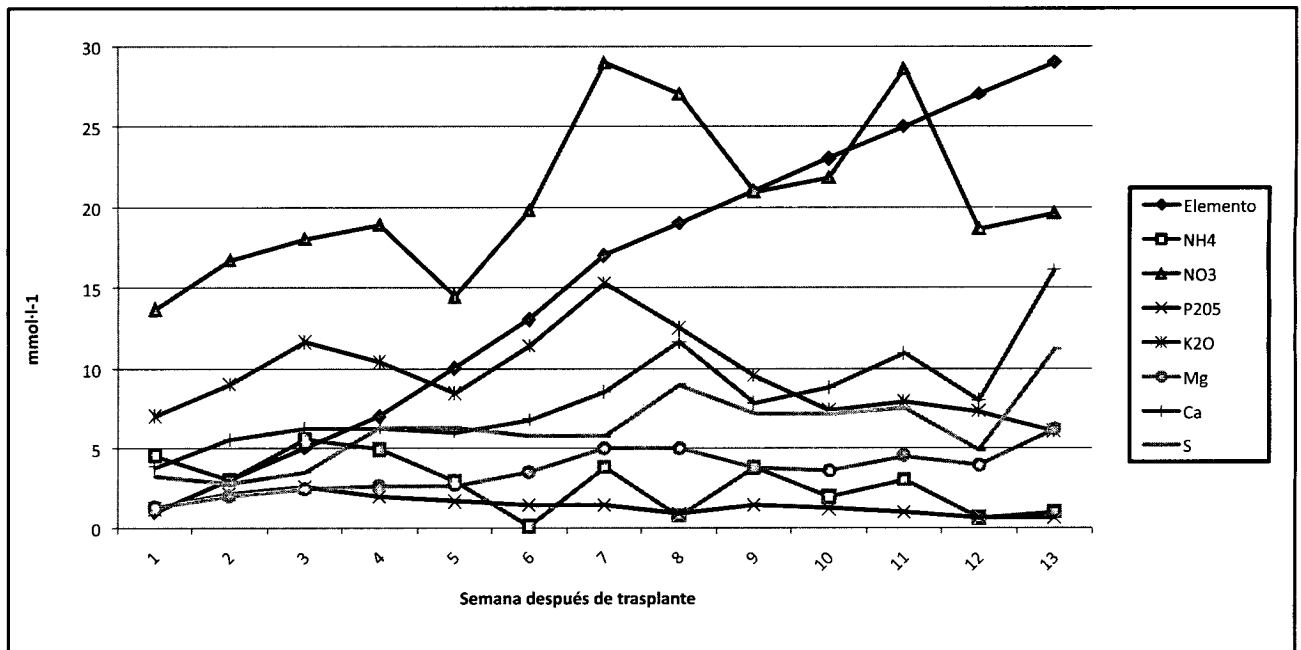
En relación con los elementos nutritivos en el sustrato, en la figura 2 se presenta el comportamiento de los elemen-

tos mayores en los muestreos de la solución nutritiva realizados durante el ciclo de cultivo.

La concentración de los elementos nutritivos está expresada en milimoles por litro. Para convertirlas a partes por millón (ppm), debe multiplicarse por el peso molecular de cada elemento químico. Los pesos moleculares pueden consultarse en una tabla periódica de los elementos.

Con el anterior manejo del sistema hidropónico se alcanzó una productividad de 21,7 kg por metro cuadrado, con una densidad de siembra de 2,5 plantas/m².

Figura 2. Resultados de análisis del sustrato (elementos mayores) durante un ciclo de cultivo de tomate hidropónico bajo invernadero. Método volumétrico.



Bibliografía

ALARCÓN, A.L. 2000. *Tecnología para cultivos de alto rendimiento*. Murcia (España): Novedades Agrícolas S.A.

RESH, H.M. 1998. *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook of Soilless Food-growing Methods*. Santa Barbara, CA: Woodbridge Press Publishing Company.

UJTL. «Producción hidropónica de tomate». 2001. En: *Desarrollo de la producción y el mercadeo de la lechuga, el tomate y la zanahoria dentro del Programa Eurofresh*. Cuarto Informe Técnico. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

