

RECIRCULACIÓN DEL AGUA DE RIEGO EN LA AGRICULTURA PARA CULTIVOS DESARROLLADOS EN SUSTRATO EN AMBIENTE PROTEGIDO



INFORME FINAL

RD-0832

SUBCOORDINACIÓN DE INGENIERÍA DE RIEGO COORDINACIÓN DE RIEGO Y DRENAJE

Juan Manuel Angeles Hernández
Luciano Sandoval Yoal
Pedro Pacheco Hernández
Armando De Los Santos García
Helene Unland Weiss
Juan Carlos Herrera Ponce

Leslie Vital González
Sandra Acosta Hernández
Javier Martínez Reyes

DIRECTORIO

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Director General

Dr. Polioptro Martínez Austria

Coordinador de Riego y Drenaje

M.C. Fernando Fragoza Díaz

Subcoordinador de Ingeniería de Riego

M.C. Juan Carlos Herrera Ponce

Jefe de Proyecto

M.C. Juan Manuel Angeles Hernández

ÍNDICE

RESUMEN.....	4
I. INTRODUCCIÓN.....	6
II. OBJETIVOS	7
III. REVISIÓN DE LITERATURA	8
3.1 Componentes de un sistema de cultivo sin suelo	9
3.2 Clasificación de los sistemas de cultivo sin suelo	10
3.2.1 <i>Sistemas con recirculación del agua drenada en cultivos sin suelo</i>	13
3.2.2 <i>Fertirrigación de los sistemas con sustrato</i>	24
3.2.3 <i>Control microbiológico en sistemas de cultivo con recirculación</i>	38
3.2.4 <i>Patógenos infecciosos radiculares que pueden afectar a los cultivos sin suelo.</i>	38
IV. METODOLOGÍA.....	40
4.1 Rehabilitación del invernadero y construcción de infraestructura faltante	40
4.1.1 <i>Construcción de la ventana cenital del invernadero del IMTA.</i>	40
4.1.2 <i>Construcción de tanques de captación del agua de riego</i>	42
4.1.3 <i>Líneas de tubería de PVC para recoger el agua lixiviada, y conducirla a los tanques de captación.</i>	42
4.1.4 <i>Instalación del sustrato de fibra de coco y del sistema de riego</i>	43
4.1.5 <i>Instalación del filtro de rayos Ultravioleta.</i>	43
4.2 Sistema de riego.....	44
4.3 Muestras y análisis de la calidad del agua de riego.....	45
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	49
5.1 Volumen de agua aplicado	49
5.2 Fertilizante aplicado.....	49
5.3 Cosecha	53
5.4 Productividad del agua	54
5.5 Manejo del sistema de riego con aguas residuales	54
VI. REFERENCIAS	56
Anexo 1. Volumen y productividad del agua en cuatro ciclos de cultivo con y sin recirculación del agua de riego lixiviada.....	57
Anexo 2. Ejemplo de recirculación del lixiviado del agua de riego, considerando una sola recirculación y dos recirculaciones del respectivo lixiviado:	58

RESUMEN

En el invernadero del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ubicado en Jiutepec, Morelos, en una superficie de 126 m², se llevó a cabo un trabajo utilizando el cultivo de jitomate tipo salades, variedad Cid, con sustrato de fibra de coco, empleando en dos tratamientos aguas residuales tratadas, uno con recirculación del agua lixiviada y el otro sin recirculación, y en otro tratamiento con agua de pozo, recirculando el agua lixiviada; cada uno en una superficie de 42 m². Se cuantificó el volumen de agua aplicado y la recirculación del agua drenada, así como la cantidad de fertilizante comercial utilizado. El agua captada lixiviada se almacenaba en un tanque de polietileno, y antes de ser incorporada nuevamente al riego, ésta pasaba por un proceso de desinfección por medio de un equipo de radiación ultravioleta.

El cultivo de jitomate se trasplantó a una densidad de 4 plantas/m², utilizando 480 plantas en total. El material empleado como sustrato, fue fibra corta y polvillo de coco, con un pH que varía de 6.3 a 6.7, en bolsas de polietileno con un peso de 5 kg y un tamaño de 10 x 30 x 100 cm, una densidad de la fibra de 294 kg/m³, una conductividad eléctrica que varía de 1.2 a 1.7 dS/m (decisiemen/m). Se estableció un sistema de riego por goteo, utilizando goteros (incluye tubín y estaca) de gasto nominal de 2 litros por hora, insertados en manguera de polietileno de 16 mm de diámetro, instalando un gotero por planta. El gasto de emisión promedio de los goteros es de 2.5 litros por hora a una presión de 1.7 kg/cm². Para la solución fertilizadora se empleó un tanque de polietileno, accionado el sistema de riego mediante una electrobomba de una capacidad de 0.5 HP. Para el sistema de filtrado se instalaron filtros de malla de 120 MESH. Para la esterilización del agua drenada previo a la recirculación, ésta se sometió a un proceso de desinfección mediante un equipo de radiación ultravioleta, el cual elimina patógenos tales como hongos, bacterias y virus. La desinfección de agua por radiación ultravioleta es un proceso físico que no altera su composición química, su olor, ni su sabor. El caudal del equipo utilizado de radiación ultravioleta utilizado es de 30 litros por minuto, funciona a una presión máxima de 3.5 kg/cm², y la temperatura recomendada de trabajo varía de 10 a 38 °C.

Durante la recirculación del agua de riego drenada, se cuantificó, mediante muestreo y análisis fisicoquímico la calidad del agua de riego y el nivel de fertilizantes que drenan con el agua de riego. Se realizaron los muestreos y análisis fisicoquímico de la calidad del agua de riego, tanto del agua nueva como del agua lixiviada recirculada.

Los volúmenes de agua utilizados en cada uno de los tratamientos de una superficie individual de 42 m², fueron de 32.36 m³, 30.85 m³ y de 40.81 m³ de agua para los tratamientos de agua de pozo con el lixiviado recirculado, agua residual tratada con y sin el lixiviado reutilizado, respectivamente. Las láminas de riego acumuladas variaron desde 77 hasta 97.17 cm, observándose que para el caso del agua residual tratada, recirculando el lixiviado se tiene un ahorro de 23.7 cm.

En el cuadro siguiente se observa una productividad del agua que varía de 40.1 a 51.3 litros de agua requeridos para producir un kilogramo de jitomate, es decir, de 24.9 a 19.5 kg/m³, es decir, que para producir 24.9 kg de jitomate se requirió un volumen de agua de 1,000 litros, equivale a que para producir un kg de jitomate se requirió un volumen de agua de 40.1 litros. Con fines comparativos, Sánchez (2005) cita a World Water Resources Institute (2003), para producir 1 kg

de naranja se requieren de 350 a 416 litros de agua, 1 huevo de 458 a 568 litros, 1 litro de leche de 500 a 3500 litros, y 1 kg de carne 26,500 litros de agua.

Cuadro 5.6. Volumen de agua, rendimiento, fertilizante y productividad del agua en el cultivo de jitomate.

Parámetro	Agua de pozo Recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada sin recircular el lixiviado	
	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Tirada
Volumen (m ³)	32.36	10.61	8.495	30.85	9.625	7.21	40.81	16.57
Rendimiento (kg)	807.2			763.3			795.8	
Productividad agua (lt/kg)	40.1			40.4			51.3	
Fertilizante aplicado (kg)	43.243			36.518			46.848	
Fertilizante, en ton, extrapolado a 1 ha.	10.3			8.7			11.15	

El rendimiento en los tres tratamiento fue muy similar, obviamente al recircular el agua de riego lixiviada se disminuye el volumen de agua utilizada, en este caso en alrededor de un 25 % de agua que se está en posibilidades de ahorrarse. Sin embargo, es notorio que dentro de la misma recirculación del agua de riego comparando el agua de pozo y el agua residual tratada, existe una diferencia significativa con respecto a la cantidad de fertilizante que se dejó de aplicar al utilizar el agua residual tratada, en este caso, extrapolado a la superficie de 1 ha le corresponden 1.6 ton de fertilizante comercial que se dejaría de aplicar simplemente porque se aprovechan los nutrientes que contiene esta última.

También se observa que al recircular el agua residual tratada se ahorrarían todavía mayor cantidad de fertilizantes, considerando que el agua lixiviada reutilizada no se le apliquen fertilizantes, en este caso nos da una diferencia de 2.45 ton/ha.

Como recomendación con base en información adicional analizada, se puede comentar que para un porcentaje de lixiviado (drenaje) del 25 %, una primera y única recirculación del agua de riego lixiviada es suficiente puesto que se ahorra un 20 % del agua, con una segunda recirculación solamente se ahorra un 5 % adicional, para llegar a un 25 % acumulado, sin embargo, las desventajas en cuanto a su operación y manejo, y calidad del agua son muy significativas, por lo que se recomienda para fines prácticos una sola recirculación del agua de riego lixiviada.

I. INTRODUCCIÓN

La disponibilidad del agua en cantidad y calidad, es uno de los principales problemas actuales de México. Ante la demanda de agua por parte de sectores no agrícolas, se han buscado fuentes alternas de abastecimiento de agua como son la utilización de aguas residuales municipales tratadas. Afortunadamente, hoy en día para el gobierno federal, el reuso del agua es ya un objetivo esencial de la política hídrica nacional. Estadísticas de la CONAGUA (2005), indican que en México se tiene una capacidad instalada de 1,481 plantas municipales de tratamiento de aguas residuales, con un gasto total de 92.675 m³/s, de éstas, se encuentran en operación 1,300 plantas con una capacidad de 64.542 m³/s, lo que representa un volumen de 2035.4 millones de metros cúbicos al año.

En los últimos años se ha generando un mayor interés por el uso de invernaderos e hidroponía; la razón principal es que representan una alternativa de solución a la problemática agrícola en el aspecto técnico, generando una producción más rentable y segura aún en climas desfavorables, además permite obtener altos rendimientos, mejor calidad del producto y varias cosechas al año de cultivos de alto valor, como las hortalizas y los ornamentales, que pueden comercializarse localmente, a escala nacional o en el extranjero. Además, de utilizar menos agua y hasta de menor calidad que la de los sistemas convencionales cultivados en suelo.

Desde 1998, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), cuenta con un invernadero de una superficie de 126 m² (18 x 7 m) para uso agrícola, utilizando agua residual tratada que se genera en las instalaciones del Instituto. Este invernadero dispone de una cubierta de plástico, con ventanas laterales para la salida del aire caliente, con un sistema de ventilación cenital para la salida del aire caliente que tiende acumularse en la parte superior del invernadero, sin embargo, dispone de un sistema de ventiladores para la regulación parcial de la temperatura.

En años anteriores en el IMTA se ha trabajado con cultivos de rábano, lechuga y jitomate, regados con agua residual tratada de distinta calidad. Los resultados han indicado que los cultivos regados con las aguas residuales tratadas lograron mejores rendimientos agronómicos que aquellos que fueron regados con agua limpia; y en cuanto a la calidad sanitaria, no se observó riesgo a la salud de los consumidores, manteniendo ciertas prácticas de manejo del cultivo, a excepción del cultivo de rábano que es un cultivo de raíz, en donde se observó contaminación microbiológica residual de la cosecha tanto en el agua de enjuague del producto como en la pulpa licuada (IMTA, 1998). El uso de agua residual aún después de un tratamiento secundario o terciario contiene elementos contaminantes, principalmente biológicos, que restringen el consumo de ciertos productos. Al respecto, se indica que existe un bajo riesgo de contaminación desde el punto de vista de los coliformes fecales, sólo cuando el agua de riego no entra en contacto directo con el cultivo y existen las medidas higiénicas mínimas por parte del productor. Sin embargo, el uso del agua residual tratada en la agricultura ahorra la aplicación de ciertos fertilizantes.

La agricultura en invernaderos representa en México una alternativa viable en zonas de escasa disponibilidad y alta demanda de agua, en la cual el reuso de aguas residuales con fines agrícolas es importante, para dedicar el agua de primer uso a otras demandas.

Con la finalidad de utilizar el agua residual tratada para el riego de aquellos cultivos que por su manejo no genere problemas de salud para los consumidores, y con un potencial de aplicación para todas aquellas zonas del país con escasez del recurso agua; en el invernadero del IMTA, se llevó a cabo un trabajo con el cultivo de chile pimiento bajo condiciones de invernadero y de riego por goteo, con el objetivo de cuantificar el volumen de agua aplicado y el volumen de agua lixiviado producto del drenaje y su recirculación al cultivo, estudiar el comportamiento agronómico del cultivo y del sistema de riego empleando aguas residuales municipales tratadas, generadas en las instalaciones del Instituto.

En agricultura protegida se facilita la recirculación del agua drenada logrando con esto incrementar de manera muy significativa la productividad del agua y de los fertilizantes, aunado que en los últimos años el costo de los agroquímicos en general se ha elevado de manera muy importante. En la producción de cultivos bajo condiciones de riego, un alto porcentaje del agua se pierde por percolación al quedar fuera del alcance de las raíces del cultivo. Esto constituye un desperdicio de agua, misma que incrementa su valor económico debido a su alta concentración de fertilizantes. En agricultura protegida que utiliza sustrato para el desarrollo del cultivo, el agua drenada puede ser recolectada en tanques y ser rehusada y recirculada para el riego. De esta manera, además, se evita la contaminación debido a la penetración de los nitratos y otras toxinas dentro del suelo que pueden contaminar a los cuerpos de agua.

El sistema más eficiente para recircular el agua drenada es un sistema de recirculación cerrado. Este sistema colecta el agua drenada y regresa ésta al cultivo después de un proceso de esterilización, mediante un equipo de radiación ultravioleta, el cual elimina patógenos tales como hongos, bacterias y virus.

II. OBJETIVOS

2.1. Determinar la productividad del agua en condiciones de recirculación del agua de riego drenada, en sustrato en condiciones de invernadero.

2.2. Cuantificar los fertilizantes drenados mediante la recirculación del agua de riego drenada en sustrato, en condiciones de invernadero.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

En las últimas décadas la horticultura intensiva, fundamentalmente de los países desarrollados, ha sufrido grandes cambios, de manera que la necesidad de incrementar las producciones para satisfacer la demanda de los mercados y para mantener la rentabilidad de estos sistemas productivos, ha llevado hacia un mayor control ambiental con el fin de poder optimizar el desarrollo de los cultivos. En este sentido el control de la nutrición vegetal ha sido posible gracias a los sistemas de cultivo sin suelo, con los que se ha podido eliminar el efecto amortiguador ejercido por el suelo y así someter la plantación a las condiciones deseadas de fertirrigación.

En México hasta junio del 2008 se reportan de acuerdo a la siguiente tabla una superficie de área protegida de 8834 ha, de las cuales 4305 son de invernadero y el resto 4529 son de malla sombra. Sin embargo esta tabla reportada se observa que no presenta por alguna razón la superficie del Estado de Morelos.

Superficie destinada a la horticultura protegida en los distintos estados, al mes de junio de 2008.

Estado	Invernadero Malla		Sup. Protegida	%
SINALOA	850	1650	2500	28.3
BAJA CALIFORNIA	120	1100	1220	13.8
BAJA CALIFORNIA SUR	400	600	1000	11.3
SONORA	250	740	990	11.2
JALISCO	900	0	900	10.2
SAN LUIS POTOSI	160	200	360	4.1
PUEBLA	250	50	300	3.4
ZACATECAS	200	30	230	2.6
GUANAJUATO	200	0	200	2.3
COAHUILA	170	25	195	2.2
MICHOACAN	140	0	140	1.6
COLIMA	100	0	100	1.1
EDO. DE MEXICO	100	0	100	1.1
CHIHUAHUA	80	0	80	0.9
OAXACA	70	1	71	0.8
AGUASCALIENTES	35	30	65	0.7
QUERETARO	65	0	65	0.7
QUINTANA ROO	12	50	62	0.7
YUCATAN	35	25	60	0.7
DURANGO	30	10	40	0.5
NUEVO LEÓN	33	0	33	0.4
CAMPECHE	15	18	33	0.4
VERACRUZ	25	0	25	0.3
TAMAULIPAS	20	0	20	0.2
HIDALGO	20	0	20	0.2
TLAXCALA	15	0	15	0.2
TABASCO	5	0	5	0.1
GUERRERO	5	0	5	0.1
Total	4305	4529	8834	100

Fuente: Castellanos, J. Z. y C. Borbón-Morales. 2008. INTAGRI – AMHPAC. Panorama de la horticultura protegida en México. En: J.Z. Castellanos (Ed). Manual de Producción de Tomate de Invernadero. INTAGRI. México.

3.1 Componentes de un sistema de cultivo sin suelo

Cualquier sistema de cultivo sin suelo que se desarrolle, va a estar definido por tres componentes básicos, que son:

- Las unidades elementales de cultivo (sacos, macetas o contenedores, canalones, etc).
- El equipamiento adecuado (equipo de riego y fertirriego, etc.).
- La tecnología necesaria para su correcto manejo.

Para conseguir un resultado satisfactorio del cultivo, será necesario conjuntar adecuadamente estos elementos.

Se puede definir la unidad elemental de cultivo como el módulo básico que comprende un espacio de cultivo común, de características determinadas, y que es utilizado como rizosfera por una o más plantas que tienen sus raíces en contacto, empleando conjuntamente dicho espacio (tabla de lana de roca, saco de perlita, canalón de cultivo hidropónico, etc.). Estas unidades elementales pueden estar interconectadas a través de la solución nutritiva (sistemas cerrados) o bien pueden estar completamente aisladas y sin riesgo de transmisión de patógenos radiculares de unas a otras a través de dicha solución (sistemas abiertos).

Cada módulo unitario consta de dos elementos: por un lado el contenido o sustrato que es el medio donde va a desarrollarse la raíz del cultivo, y por otro el contenedor o recipiente que se encarga de aislar, dar forma y condicionar en gran medida las propiedades del contenido. Sin embargo, no siempre aparecen estos dos componentes, ya que a veces se prescinde del sustrato de cultivo, como ocurre en los hidropónicos puros, en los que la raíz se encuentra inmersa directamente en la solución nutritiva. Asimismo, existen sustratos rígidos en los que el contenedor (generalmente una lámina de polietileno) tiene como única función impedir la penetración de la luz hasta el medio radicular y evitar una excesiva desecación de éste.

a) Contenedores:

Cuando en el sistema de cultivo se utilizan sustratos amorfos, el contenedor con sus características propias influye directamente en el comportamiento del sustrato, condicionando sus propiedades físicas al adquirir la forma determinada por el contenedor.

Cuando los sustratos son rígidos (lana de roca, foam, etc) o no existen (hidropónicos, aeropónicos, etc), esto no sucede pero aún así condiciona enormemente las características de la rizosfera (pendiente, altura de agua, aislamiento, etc), por lo que su importancia es muy grande en el comportamiento final del sistema. Un ejemplo de la influencia del contenedor sobre las propiedades del sustrato lo encontramos en la inercia térmica, la cual está más condicionada por el volumen, material y forma del contenedor, que por la naturaleza del sustrato contenido pues, al estar éste completamente humedecido, su coeficiente de transmisión calorífica varía muy poco de uno a otro, estando siempre muy próximo al del agua.

En un principio los contenedores se construían de materiales pesados y duraderos (hormigón, hierro, cerámica, asfalto, etc.), constituyendo así las primitivas bancadas de cultivo. Actualmente se utilizan materiales mucho más ligeros, impermeables e inertes, generalmente plásticos (polietileno, polipropileno, etc.), rígidos, semirrígidos o flexibles, de precio accesible y fácil manejo y reposición.

b) *Sustratos*: como se ha comentado con anterioridad, el sustrato no siempre es necesario en los sistemas de cultivo sin suelo. Sin embargo, actualmente casi la totalidad de los sistemas empleados a nivel comercial utilizan algún tipo de sustrato. Cualquier sustrato potencial tiene unas características y propiedades intrínsecas que debemos conocer y estudiar para diseñar el contenedor más apropiado, de forma que el módulo de cultivo resultante, sometido a un correcto manejo, proporcione a la raíz el medio favorable para su desarrollo. Dentro de estas propiedades tenemos tanto físicas (porosidad, retención de agua, densidad, estructura, granulometría), como químicas (capacidad de intercambio catiónico, poder tampón, solubilidad) y biológicas.

3.2 Clasificación de los sistemas de cultivo sin suelo

Dentro de los cultivos en sustrato podemos distinguir a su vez tres tipos en función de su manejo. En primer lugar tenemos aquellos sistemas que funcionan por inundación periódica del sustrato mediante subirrigación y en los que posteriormente se realiza la recolección de los volúmenes lixiviados, como es el caso de las bancadas de grava. En segundo lugar se encuentran aquellos sistemas que utilizan un sustrato con una baja capacidad de retención de agua y una elevada aireación (grava, tezontle, etc.), de forma que requieren un aporte muy frecuente de solución nutritiva a nivel superficial para asegurar un suministro adecuado de agua y nutrientes al cultivo. Por último están los sistemas convencionales que emplean algún sustrato con una capacidad de retención de agua importante (lana de roca, perlita, fibra de coco, arena, etc.), de forma que requieren el aporte de riegos puntuales en función de las necesidades hídricas del cultivo, con el fin de lograr una adecuada relación agua/aire en el mismo.

a). Cultivo en bancadas de arena.

Estas bancadas se suelen construir in situ a base de cemento recubierto con pintura epóxica para protegerlo de la solución nutritiva ácida, aunque también se puede emplear fibra de vidrio, láminas de asbesto u otros materiales. Asimismo se utilizan láminas de polietileno o PVC para disminuir los costos, fijadas en los lados con bloques de cemento o madera, e incluso se llegan a excavar zanjas en el suelo que se recubren con plástico y se rellenan de sustrato. Esto último resulta barato pero tiene el inconveniente de que es difícil localizar y reparar las roturas y existe el riesgo de que las enfermedades del suelo se extiendan por todo el medio. Tradicionalmente se ha empleado en este sistema la arena como sustrato, la cual debe presentar una granulometría comprendida entre 1 y 3 mm para conseguir una adecuada relación agua/aire que permita un óptimo desarrollo de las raíces del cultivo. Es importante evitar la presencia de materiales finos tales como limos y arcillas, los cuales tienden a acumularse en el fondo de las bancadas,

provocando el encharcamiento y la falta de aireación de las raíces. Aparte de la arena También resulta factible emplear otros materiales, como por ejemplo perlita, turba y fibra de coco.

La solución nutritiva se aplica sobre la superficie del sustrato mediante tuberías con emisores. En lo que se refiere a la evacuación del lixiviado, éste puede realizarse lateralmente a través de orificios de drenaje regularmente distribuidos a lo largo de la bancada, o bien mediante una tubería de plástico situada en el fondo y perforada a intervalos para permitir la entrada de dicho lixiviado.

Un inconveniente importante de este sistema de cultivo, aparte del elevado costo de ejecución de las bancadas tradicionales y su escasa maniobrabilidad, es la necesidad de realizar desinfecciones periódicas del sustrato, para evitar enfermedades de suelo y ataques de nematodos.

Una modificación especial del sistema de bancadas de arena es el cultivo en arena en toda la superficie del invernadero, en el cual, una vez laboreado y nivelado el terreno con un 0.2-0.3 % de pendiente, se coloca sobre él una doble capa de plástico para evitar que las raíces se anclen en el suelo. Encima se disponen las tuberías de drenaje a favor de la pendiente y a continuación se esparce arena no excesivamente fina por toda la superficie. En zonas desérticas donde existen dunas de arena, se pueden aprovechar éstas para llevar a cabo el cultivo. Si tienen más de 1 m de profundidad, se pueden emplear directamente, pero en caso contrario habrá que realizar una preparación similar al caso anterior a base de láminas de plástico y tuberías de drenaje para evitar la presencia de un exceso de humedad en las raíces. Este sistema puede presentar el problema de ataques importantes de nematodos, debido a su posible presencia en la arena utilizada para el cultivo.

b). Cultivo en sacos rellenos de sustrato.

Debido a los inconvenientes que presentan los sistemas de cultivo en bancadas, en las últimas décadas la tendencia más generalizada ha sido el empleo de sustratos embolsados en sacos de plástico con un volumen y dimensiones variables en función del tipo de material empleado para el desarrollo del cultivo. Dado que cada una de estas unidades se utiliza para unas pocas plantas, resulta más sencillo controlar los ataques de enfermedades de raíz, y asimismo es más fácil manejar y reponer el sustrato. Otra ventaja es que el contenedor, al ser de material plástico, resulta barato y ligero, ofreciendo al mismo tiempo unas buenas condiciones de opacidad. Por contra, la principal desventaja es que se requiere una mayor uniformidad de riego al estar la raíz confinada en una unidad de cultivo de volumen pequeño.

Los sustratos empleados en los cultivos en sacos los podemos dividir en tres grupos según sean orgánicos, minerales o sintéticos. Dentro de los primeros tenemos materiales tales como la turba, la fibra de coco, las cortezas de árboles, el serrín, etc, mientras que dentro de los segundos hay que distinguir entre los de origen natural, como la arena o las rocas volcánicas, y los de transformación industrial, como la lana de roca, la perlita, etc. En Almería los más empleados actualmente son la perlita y la lana de roca, mientras que los orgánicos, encabezados por la fibra de coco, se encuentran muy por detrás de los primeros. En Murcia es la arena el que predomina, aunque se emplea en forma de largos sacos denominados comúnmente "salchichas". Tienen unos 25 m de longitud, 0,4 m de anchura y 0,25 m de altura y se colocan sobre el suelo, por lo que se

trata de un sistema intermedio entre las bancadas y el cultivo en sacos. La granulometría que se suele emplear es la misma que en los sistemas en bancadas.

Previo a la plantación, el sustrato contenido en los sacos de cultivo debe ser hidratado adecuadamente con el fin de partir con un medio húmedo que no ofrezca problemas al desarrollo inicial del cultivo, ya que posteriormente no podrá ser saturado. Esto resulta especialmente importante en ciertos sustratos, como la lana de roca, en la que una mala humectación inicial impide que el medio pueda alcanzar su máxima capacidad de retención de agua debido a su escasa capilaridad, lo que puede originar problemas de estrés hídrico durante el cultivo y un inadecuado desarrollo radicular. La saturación del sustrato debe llevarse a cabo antes de abrir en los sacos los orificios de salida del lixiviado. Previamente se habrán realizado en la parte superior los agujeros en los que se situarán las plantas, los cuales también sirven para anclar los emisores de riego. Una vez colocados éstos, se puede empezar a humectar el medio.

El riego se mantiene hasta llenar completamente los sacos con solución nutritiva y posteriormente se deja el sustrato en saturación durante un par de días para que alcance un buen nivel de humedad. Transcurrido ese tiempo se está en disposición de abrir el agujero de salida del lixiviado. Puede ser conveniente no realizarlo inicialmente en la parte más baja, con el fin de dejar una reserva de agua en el fondo que favorezca el enraizamiento del cultivo. No obstante, una vez conseguido dicho enraizamiento es aconsejable eliminar la reserva haciendo otro agujero más bajo para evitar problemas de encharcamiento. A veces, cuando el tipo de sustrato lo permite, se puede llevar a cabo la plantación antes incluso de realizar el orificio, con el propósito de ganar tiempo, si las plantas del semillero se encuentran en un estado adecuado para el trasplante.

Aunque, como se comentó anteriormente, una de las ventajas que presentan los sacos de cultivo es su facilidad de renovación, el agricultor suele conservarlos durante varios años con el fin de reducir costos. En este caso resulta conveniente mantener el nivel de humedad del sustrato durante la época en la que no hay cultivo, para evitar una excesiva acumulación de sales y no tener que volverlo a saturar antes de la siguiente plantación. Para ello es suficiente dar un par de riegos a la semana de unos 1,5 litros por saco de cultivo durante la época de verano. Por otro lado, previo a la plantación se debe realizar una desinfección del sustrato con el fin de evitar, o al menos reducir, los problemas de patógenos radiculares durante el siguiente cultivo. El tratamiento se debe realizar 25 días antes de la plantación y tras él se debe dar un riego diario (de unos 1,5 litros por saco) con el fin de evitar posibles toxicidades del cultivo.

c). Utilización de la fibra de coco como sustrato.

La fibra de coco es un subproducto de la industria del coco que se encuentra disponible en grandes cantidades en los países productores de cocos (*cocos nucifera*). Los subproductos resultantes del desfibrado de la nuez de coco proceden del mesocarpio de la misma y consisten en fibras largas, que se suelen utilizar para diversas actividades de manufactura, más restos de fibra y polvo, de aspecto similar a la turba, que se acumulan como residuo. Son generalmente estos restos de fibras, de longitud inferior a 2mm, los que suelen utilizarse en mezclas como sustrato y se presentan generalmente prensadas en ladrillos que deben deshacerse y rehumectarse previamente a su uso. Las fibras largas, de longitud superior a 16 mm, se utilizan como sustratos

en el cultivo hidropónico. Los países productores de fibra de coco son los países situados en los trópicos. En España se pueden encontrar fibra de coco procedente de Sri Lanka, México y Costa de Marfil, entre otros.

La fibra de coco consiste en partículas de lignina y celulosa, con una relación de C/N de 80. Aunque en general la fibra de coco puede utilizarse fresca, para algunos tipos de fibra de coco se presenta toxicidad del cultivo.

Este material tiene elevada capacidad de retención de agua y se ha utilizado tradicionalmente para mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos. La aplicación de fibra de coco mejora la retención de agua, aumenta la disponibilidad de nutrientes y aumenta la tasa de infiltración, la porosidad total y la conductividad hidráulica de los suelos donde se utiliza. La fibra de coco tiene bajo contenido de nutrientes, excepto para el potasio. Su pH, varía de 4 a 7; su conductividad eléctrica puede variar entre 0.1 y 6.0 ds/m, procediendo la elevada salinidad del lavado o contacto con agua de mar en las zonas de origen; este aspecto puede resultar un inconveniente para el cultivo, habiéndose encontrado material de distintas características (es conveniente analizar todos los pedidos de fibra de coco, al menos, con respecto a la salinidad). Se han descrito también algunos problemas de exceso de cloro, sodio o potasio. El contenido de materia orgánica es de 85-90 %. La capacidad de intercambio catiónico está entre los 20 y 30 meq/l. La porosidad total es superior al 80%, con aireación muy elevada. La conductividad hidráulica es también muy elevada. Su densidad varía entre 50 y 100 Kg. de materia seca por m³.

3.2.1 Sistemas con recirculación del agua drenada en cultivos sin suelo

Podemos distinguir dos tipos de sistemas de cultivo sin suelo que integran la recirculación como forma de trabajo.

El primero es el NFT (Nutrient Film Technique) que, dentro de estos sistemas recirculantes, es el más típico por ser el que en primer lugar se empezó a utilizar allá por los años 70. 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.

En cuanto al segundo, se trata del cultivo en un sustrato cualquiera (perlita, lana de roca, arena, fibra de coco, etc.) con la recolección del drenaje, para su posterior mezcla con agua de aporte exterior e inyección de fertilizantes hasta alcanzar un nivel nutricional determinado. En este último sistema, a diferencia del primero, 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 una determinada dosis de agua cada vez para conseguir la rehidratación del sustrato y la renovación de la solución en él contenida.

Sobre la base de lo anteriormente expuesto, ambos sistemas, aunque mantienen la misma filosofía, presentan un manejo de la solución nutritiva diferente.

a). El sistema de cultivo NFT (*Nutrient Film Technique*).

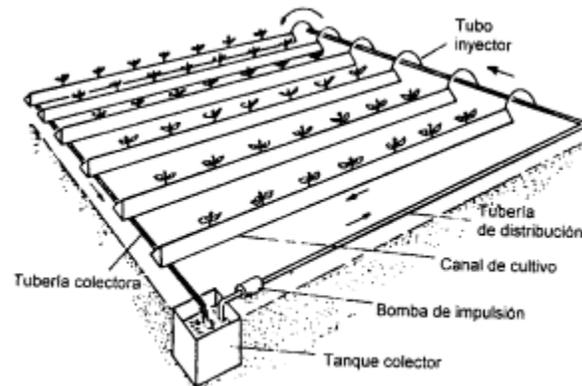
El NFT se basa en la circulación continua o intermitente de una fina lámina de solución nutritiva a través de las raíces del cultivo, sin que éstas se encuentren inmersas en sustrato alguno, sino que simplemente quedan sostenidas por un canal de cultivo, en cuyo interior fluye la solución hacia cotas más bajas por gravedad.

El agua se encuentra muy fácilmente disponible para el cultivo, lo que representa una de las mayores ventajas del sistema, al ser mínimo el gasto de energía que debe realizar la planta en la absorción, pudiendo aprovechar ésta en otros procesos metabólicos. La renovación continua de la solución nutritiva en el entorno de la raíz permite un suministro adecuado de nutrientes minerales y oxígeno, siempre, claro está, que se realice un correcto manejo del sistema.

Como puede observarse en la lámina 2.8, que representa un esquema sencillo de una instalación de NFT, en ella pueden distinguirse los siguientes elementos principales:

Lámina 2.8. Esquema de una instalación de NFT

- a) Bomba de impulsión
- b) Tuberías de distribución
- c) Tubos de inyección al canal
- d) Canales de cultivo
- e) Tubería colectora
- f) Tanque colector



Bomba de impulsión

La bomba de impulsión se encarga de enviar e introducir la solución nutritiva, desde tanque colector, hasta el extremo superior de los canales de cultivo. Dado que normalmente la diferencia de cotas a superar es pequeña, el requerimiento de potencia resulta mínimo, aunque hay que tener en cuenta que funcionará permanentemente durante un largo periodo de tiempo, por lo que debe considerarse un sistema económico en cuanto a consumo de energía. Con el fin de hacer frente a posibles averías de la bomba o fallos en el suministro eléctrico, resulta conveniente instalar en paralelo un equipo de bombeo accionado por un motor diesel, que entre en funcionamiento en caso de ser necesario.

Tubería de distribución

Las tuberías de distribución son las encargadas de conducir la solución nutritiva desde el tanque hasta la parte superior de los canales de cultivo. Serán de PVC y/o polietileno y su diámetro estará en función del caudal que deba circular por ellas, teniendo en cuenta que debe existir un caudal por cada canal de 2-3 litros por minuto para así establecer una oferta adecuada de oxígeno, agua y nutrientes.

Canales de cultivo

Los canales de cultivo constituyen el medio de sostén de las plantas y además la base sobre la que fluye la solución nutritiva. Dado que es necesario que la altura de la lámina de agua en el interior del canal no supere los 4 ó 5 mm con el fin de conseguir una adecuada oxigenación de las raíces, resulta muy conveniente utilizar canales de sección plana y no cóncava.

En lo que se refiere a su longitud, ésta no debe superar los 15 m para asegurar unas condiciones adecuadas y homogéneas en todo el canal y evitar la falta de oxígeno disuelto en la parte final del mismo. Por último, la pendiente longitudinal debe estar entre el 1 y el 2 % ya que, si resulta inferior, queda dificultado el retorno de la solución al tanque colector y la altura de la lámina de agua puede ser excesiva. Por otro lado, no es conveniente que sea mayor del 2 %, ya que entonces se dificultaría la absorción de agua y nutrientes, especialmente cuando las plantas son pequeñas, por una excesiva velocidad de circulación de la solución en el canal.

Tubería colectora

La tubería colectora es la que se encarga de recoger la solución nutritiva al final de los canales de cultivo y llevarla hasta el tanque colector por gravedad. Suele ser de PVC y debe tener una pendiente suficiente para asegurar la evacuación.

Tanque colector

Es el elemento encargado de almacenar el drenaje procedente de los canales de cultivo que escurre hasta aquél por gravedad, por lo que resulta conveniente que se encuentre en la parte más baja del invernadero. El material de fabricación puede ser polietileno, PVC o fibra de vidrio, aunque también puede ser de metal tratado interiormente con pintura epóxica. Su volumen, estará determinado fundamentalmente por la superficie de cultivo. La capacidad del tanque sólo representa entre el 10 y el 15 % del volumen total de solución que circula en el sistema, ya que el resto se encuentra contenido en las tuberías y tanques de riego. El tanque colector debe incorporar un sistema de control de nivel que cierre la tubería de aporte de agua exterior al sistema, con el fin de mantener constante el nivel en el depósito y evitar su desbordamiento.

Inyección de fertilizantes

La inyección de fertilizantes se realiza directamente al tanque, a partir de unos depósitos de soluciones madre con base a las lecturas tomadas por unas sondas que controlan la conductividad eléctrica y el pH de la solución que se aporta al cultivo. De esta forma, unas electroválvulas permiten la caída por gravedad de los fertilizantes al tanque, hasta que las lecturas se igualan con las consignas e introducidas en el equipo electrónico encargado de controlar la apertura y cierre de

dichas electroválvulas. También se pueden utilizar bombas inyectoras para incorporar las soluciones madre.

Cuando se empezó a desarrollar la técnica del NFT en los años 70, lo primero que se pensó fue que, al no existir un medio sólido con capacidad tampón, la formulación de la solución nutritiva debería ser alterada de acuerdo con la etapa de desarrollo del cultivo, y que se requerirían distintas formulaciones para diferentes cultivos, lugares y épocas del año, de forma que la técnica no sería práctica para producción comercial, ya que se necesitaría la elaboración de análisis químicos frecuentes en los que poder basar los ajustes del aporte nutricional.

Sin embargo, pronto se vio que esto no era así, sino que, al existir una recirculación continua de la solución nutritiva a través de las raíces del cultivo, el rango de tolerancia a la concentración de nutrientes era muy grande, no obteniéndose diferencias significativas en cuanto a crecimiento del cultivo, cosecha e incluso absorción de nutrientes en amplias bandas de concentraciones iónicas. Así, por ejemplo, no se observaron diferencias trabajando en un intervalo de nitrógeno de 10 a 320 ppm, y se consiguieron resultados similares con el fósforo entre 5 y 200 ppm y con el potasio entre 20 y 375 ppm. No obstante, a nivel práctico, no es aconsejable trabajar con niveles muy bajos de nutrientes, ya que entonces apenas existiría una reserva disponible, de la que poder nutrirse la planta, en el caso de estar utilizando un equilibrio desajustado para algún nutriente.

En el cuadro 2.5 se presentan las concentraciones nutritivas mínimas, óptimas y máximas para el cultivo de tomate en NFT ofrecidas por Winsor et al. (1979).

Cuadro 2.5 Concentraciones de nutrientes para tomate en NFT.

Concentración (ppm)			
Elemento	Mínima	Óptima	Máxima
NO ₃ -N	50	150-200	300
P	20	50	200
K	50	300-500	600
Ca	125	150-300	400
Mg	25	50	150
Fe	1.5	3	6
Mn	0.25	1	5
Cu	0.01	0.1	1
Zn	0.05	0.1	5

Concentración (ppm)			
Elemento	Mínima	Óptima	Máxima
B	0.1	0.2	2
Mo	0.01	0.05	0.1
Na	-	-	250
Cl	-	-	400
Fuente: Winsor et al. (1979)			

En definitiva, cuando se trabaja con *NFT*, hay que mantener unas relaciones adecuadas entre los distintos iones presentes en la solución para que no haya competencia entre ellos, especialmente en lo que se refiere a los de más difícil absorción como el calcio o el magnesio, aunque las concentraciones absolutas de los diferentes elementos pueden ser muy variables. Esto es lo que diferencia fundamentalmente al *NFT* frente a los sistemas en sustrato recirculantes.

Por otro lado, los nutrientes incorporados por los fertilizantes más los que lleva el agua de aporte exterior deben ajustarse a los coeficientes de absorción del cultivo para cada uno de dichos elementos (el coeficiente de absorción de un elemento es la cantidad del mismo que es absorbida por el cultivo por cada litro de agua que éste a su vez absorbe) ya que, si no es así, aunque en un principio la solución final esté bien balanceada, se producirá una acumulación progresiva de los iones que se suministran a una concentración mayor que su absorción y una disminución de los que se aportan a menor concentración, desequilibrándose finalmente dicha solución. Por tanto, se entiende que es necesario conocer los coeficientes de absorción del cultivo para la etapa de desarrollo y época del año que correspondan.

Cuadro 2.6.a Soluciones nutritivas empleadas para diferentes cultivos.

	TOMATE	PEPINO	JUDIA	PIMIENTO
NO ₃ (mmol/L)	10.5	11.75	12.0	12.25
NH ₄ (mmol/L)	0.5	0.5	0.5	0
H ₂ PO ₄ (mmol/L)	1.5	1.25	1.25	1.25
K (mmol/L)	7.0	5.5	5.5	6.0
Ca ²⁺ (mmol/L)	3.75	3.5	3.5	3.75
Mg ²⁺ (mmol/L)	1.0	1.0	1.25	1.25
SO ₄ (mmol/L)	2- 2.5	1.0	1.125	1.25
Fe	(mg 0.56 L ⁻¹)	0.56	0.56	0.56
Mn	(mg 0.56 L ⁻¹)	0.56	0.56	0.56

	TOMATE	PEPINO	JUDIA	PIMIENTO
Cu	(mg 0.03 L-1)	0.03	0.03	0.03
Zn	(mg 0.26 L-1)	0.26	0.26	0.26
B	(mg 0.22 L-1)	0.22	0.22	0.27
Mo	(mg 0.05 L-1)	0.05	0.05	0.05

Un caso extremo de lo anteriormente comentado se presenta cuando se emplean aguas salinas de baja calidad, en las que la presencia de sodio y cloruros es elevada y muy superior a la capacidad de absorción del cultivo. En tal caso, la presencia relativa de estos iones es mucho mayor que la del resto de nutrientes y su acumulación se produce rápidamente, de forma que en pocos días gran parte del valor de la conductividad eléctrica de la solución, que se ha marcado como óptima, viene determinado por estos elementos y el resto está casi ausente, al ser cada vez menor el aporte que se realiza de fertilizantes. Es esto último, principalmente, lo que produce una fuerte estrés del cultivo, ante la imposibilidad de nutrirse adecuadamente, y obliga a una renovación del agua en recirculación por otra nueva exterior.

Las dificultades que se plantean en NFT con el uso de aguas salinas es uno de los mayores problemas que tiene este sistema. Sin embargo, pueden paliarse en gran medida mediante la incorporación de ciertas modificaciones. Así, por ejemplo, se puede hacer entrar al tanque colector solución nutritiva previamente preparada en lugar de agua sola conforme se produce el consumo hídrico, lo que asegura el mantenimiento de unos niveles mínimos de los distintos iones que necesita la planta. En cualquier caso, a partir de aquí, conforme se lleve a cabo la recirculación y tenga lugar la acumulación de los elementos en exceso, se producirá un aumento progresivo de la conductividad eléctrica. La renovación total o parcial del agua presente en el sistema por solución nutritiva nueva cuando se alcancen ciertos niveles indeseados, permitirá diluir la salinidad y evitar que se superen tales niveles.

Otra modificación del sistema es la incorporación de electrodos de medida en continuo de iones selectivos. De este modo, los valores medidos servirán como datos de entrada de un programa informático capaz de calcular continuamente las necesidades de aporte de las diferentes soluciones madre para alcanzar unos niveles deseados que previamente se habrán introducido como óptimos. En este caso, lo más lógico es utilizar distintas soluciones madre de abonos líquidos de calidad con una riqueza constante conocida. Con esto se mantienen los niveles deseados de nutrientes, aunque igualmente se seguirá produciendo una acumulación de los iones que estén en exceso en el agua y esto obligará a realizar una renovación parcial de la solución nutritiva periódicamente.

b). Sistemas recirculantes de cultivo en sustratos

Los sistemas de cultivo en sustratos (fibra de coco, tezontle, lana de roca, perlita, arena, etc.) originalmente surgieron como sistemas a solución pérdida, tal y como se siguen empleando actualmente, de manera que el drenaje producido no es reutilizado en el riego del cultivo, sino eliminado al medio. Esta forma de actuar resulta más sencilla que hacer recirculación, ya que se dispone de un agua de entrada de composición más o menos constante a la que sólo hay que aportar ciertas cantidades de fertilizantes para alcanzar el equilibrio nutricional deseado. Se controla el drenaje para que no se produzcan incrementos bruscos de la conductividad eléctrica y el pH.

Sin embargo, la legislación medioambiental restrictiva que se ha empezado a aplicar en el norte de Europa, principalmente Holanda, en los últimos diez años, ha motivado que los productores de esta zona adapten sus sistemas de cultivo en sustratos, que conocen perfectamente, a las nuevas exigencias, no habiendo prosperado los sistemas recirculantes clásicos como el NFT.

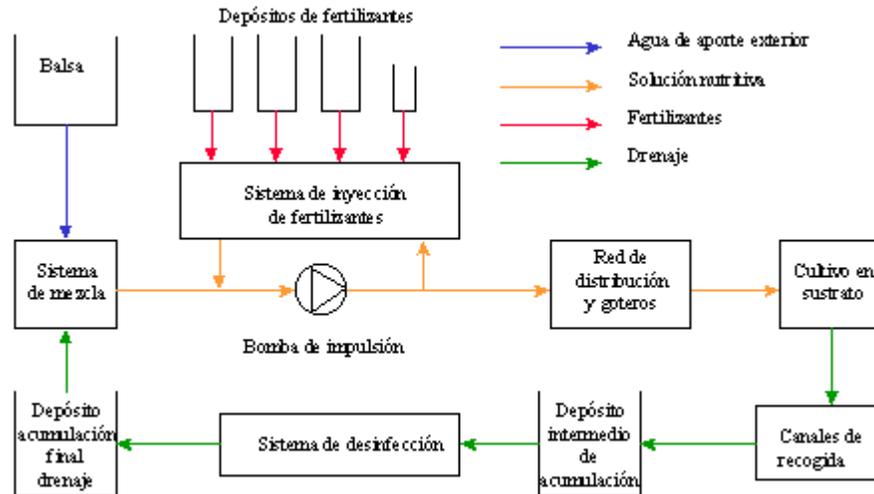
En un sistema de cultivo en sustratos con recirculación del drenaje podemos distinguir los siguientes elementos principales:

- a) Sistema de mezcla del drenaje y el agua de aporte exterior
- b) Bomba de impulsión
- c) Sistema de inyección de fertilizantes
- d) Tuberías de distribución y goteros
- e) Sustrato de cultivo
- f) Tubería de recolección del drenaje
- g) Depósito intermedio de acumulación del drenaje
- h) Sistema de desinfección del drenaje
- i) Depósito de acumulación final del drenaje

En las láminas 2.9 y 2.10 se refleja el esquema básico de una instalación de recirculación con cultivo en sustratos. La mezcla del agua de aporte exterior y el drenaje puede realizarse en un depósito al que se añaden unos volúmenes determinados de los mismos en función del porcentaje de drenaje al que se esté operando el sistema. Estos volúmenes pueden establecerse mediante la colocación dentro del depósito, de sondas de nivel a una altura adecuada.

También se puede llevar a cabo mediante una válvula motorizada que permita el paso de una mayor o menor cantidad de drenaje para que, en su mezcla con el agua de aporte exterior, se alcance un determinado valor de conductividad eléctrica, el cual se habrá previamente establecido en función del porcentaje de drenaje que se pretende recircular.

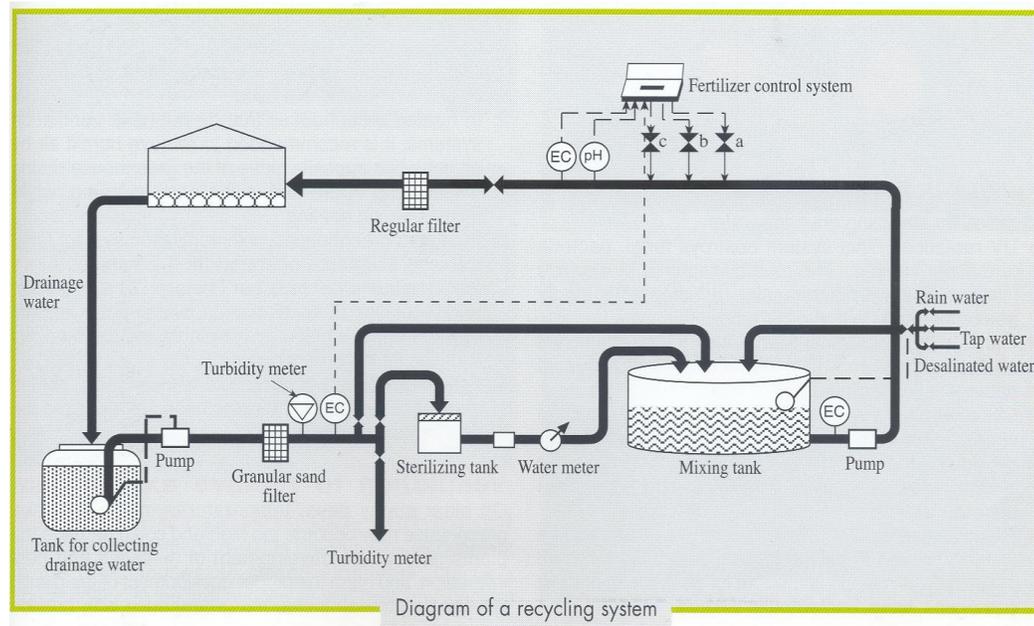
Lámina 2.9 Esquema de una instalación con recirculación del agua drenada en sustrato.



El equipo de bombeo se encarga de aspirar la mezcla formada por el drenaje y el agua de aporte exterior, haciéndola pasar por el sistema de inyección de fertilizantes y, una vez obtenida la solución nutritiva final, se envía a los goteros del sistema de riego para su aplicación al cultivo.

El sistema de inyección de fertilizantes tiene por objeto mezclar, de forma homogénea, los fertilizantes de aporte exterior con el agua de riego. Este sistema puede utilizar tanque de mezclas o inyección directa, y a su vez la incorporación de las soluciones madre se puede hacer con venturis o con bombas inyectoras.

Lámina 2.10. Diagrama de la recirculación del agua drenada, con tanque de esterilización.



El sustrato de cultivo puede ser cualquiera de los utilizados en sistemas con solución perdida. Los canales de recogida del drenaje conducen a éste desde el sustrato de cultivo hasta el depósito intermedio de acumulación. Debe tratarse de un sistema barato para que resulte accesible al agricultor. El depósito intermedio de acumulación del drenaje no debe ser de gran capacidad, ya que únicamente sirve para acumular un cierto volumen de agua, de forma que sea suficiente para hacerlo pasar a través del equipo de desinfección.

Hay varios sistemas de desinfección del drenaje: radiación ultravioleta, por calor, ozonización o ultrafiltración. No es imprescindible su instalación, pero sí aconsejable para reducir el riesgo de un ataque generalizado por parte de alguna especie patógena. Por último, el depósito de acumulación final del drenaje es el que va a almacenar a éste hasta que se vuelva a utilizar en mezcla con el agua de aporte exterior. Debe tener un volumen suficiente como para contener al menos todo el drenaje que se va a producir entre riegos sucesivos, aunque es conveniente disponer de un cierto volumen adicional de seguridad.

Cuando se recircula el drenaje, previo al riego es necesario mezclarlo con agua de aporte exterior, tal y como se ha comentado anteriormente, con el fin de reponer la absorción realizada por el cultivo. Dado que la idea que se persigue es conseguir un sistema estacionario en el que no se produzca la acumulación de ningún ion, la cantidad de fertilizantes a aportar desde el exterior, junto con los nutrientes que incorpora el agua de entrada, debe ser tal que, por cada litro de agua absorbido, se añada para cada ion el coeficiente de absorción del cultivo.

Este aporte exterior de nutrientes, junto con los elementos nutritivos que lleva el drenaje, va a dar lugar a la solución final, la cual debe mantener un equilibrio adecuado entre los diferentes iones, tal y como es sabido para los sistemas de cultivo en sustratos con solución perdida. En el caso de que esto no suceda, habrá que variar el aporte de determinados fertilizantes hasta recuperar el equilibrio óptimo.

Por tanto, a diferencia del NFT, en recirculación en sustrato no es posible trabajar a concentraciones finales de nutrientes muy variadas ya que el suministro de solución nutritiva al cultivo no es continuo, sino puntual en función de sus necesidades hídricas, y la cantidad de agua que se aporta es justo la que absorbe el cultivo más un cierto porcentaje de drenaje.

A la hora de calcular las cantidades de fertilizantes que es necesario añadir al sistema, hay que tener en cuenta que el agua de aporte exterior ya lleva unas ciertas cantidades de elementos minerales que es necesario descontar de los **coeficientes de absorción**. Por tanto, sólo habrá que añadir el resto hasta alcanzar los niveles marcados por dichos coeficientes.

Si el agua de riego ya de por sí incorpora algún ión en una concentración superior a la que es capaz de absorber el cultivo, como es el caso de las aguas salinas con respecto al sodio y los cloruros, resultará inevitable la acumulación de ese ión en el drenaje, por lo que no quedará más remedio que eliminar periódicamente dicho drenaje o, lo que es mejor, tirar pequeñas cantidades de éste de forma más o menos continua. Esto se podría conseguir recirculando una menor cantidad de agua de la que es drenada, y el exceso saldría del circuito. De esta manera se evitaría la acumulación de ese ion por encima de un nivel dado. En concreto, llamando:

X = diferencia entre el porcentaje de agua drenada y recirculada (porcentaje de agua eliminada del sistema)

Pa = porcentaje de agua que es absorbida por el cultivo

Cg. = concentración del ion limitante en el agua de aporte exterior

Ca = coeficiente de absorción del cultivo para ese ion

Cm = concentración máxima que se permite para ese ion en el drenaje,

Se obtiene que:

$$(X + P_a) \cdot C_g - P_a \cdot C_a = X \cdot C_m$$

De donde:

$$X = \frac{P_a \cdot C_g - P_a \cdot C_a}{C_m - C_g}$$

Expresión que permite calcular el porcentaje del agua total aplicada en el riego que es necesario eliminar del sistema para evitar la acumulación del ion por encima de su concentración máxima permitida.

La inyección de fertilizantes tradicionalmente se viene realizando mediante la regulación de la conductividad eléctrica y el pH. El siguiente paso sería, al igual que en NFT, la utilización de sondas selectivas para distintos iones, de manera que la concentración de éstos pudiera ser medida en continuo y la adición de fertilizantes se llevara a cabo de forma automática para mantener unos niveles determinados de los diferentes elementos, que previamente se habrían indicado al sistema de control.

c). Ventajas e inconvenientes del sistema NFT frente a la recirculación en sustratos.

El sistema de cultivo hidropónico NFT presenta una serie de ventajas frente a los sistemas recirculantes en sustratos, dentro de las cuales se pueden destacar las siguientes:

- El agua y los nutrientes se encuentran en contacto directo con las raíces del cultivo y están fácilmente disponibles para éste, al no existir retención alguna por la ausencia de sustrato. Esto permite que el gasto de energía que debe realizar la planta en el proceso de absorción sea algo menor y que, por tanto, esa energía ahorrada se pueda derivar hacia una mayor producción. No obstante, mucho más importante que esto resulta aún el hecho de que, en un NFT, el cultivo está sometido a una menor presión osmótica que en un sustrato, debido a que se puede trabajar con niveles de nutrientes menores como consecuencia de la continua circulación y renovación de la solución nutritiva, y a que todas las plantas del cultivo disponen prácticamente de la misma solución en el medio radicular, al ser éste acuoso, mientras que en una tabla o saco de sustrato sí se presentan diferencias de concentración en función de la distancia que haya al gotero.
- En NFT la renovación continua de la solución nutritiva, que se produce en la zona radicular, permite evitar posibles déficits locales de nutrientes. Todo ello puede repercutir en un crecimiento más acelerado y en la obtención de una mayor precocidad.
- La instalación de un NFT resulta más sencilla (menor número de bombas para el tránsito del agua, inyección de fertilizantes más simple, se evita la obturación de los goteros, etc.).

En cuanto a los inconvenientes del sistema NFT frente a la recirculación en sustratos, destacan los siguientes:

- En NFT la solución nutritiva puede alcanzar temperaturas excesivamente elevadas, mayores que en sustrato, que perjudiquen al sistema radicular, especialmente en cultivos bajo invernadero en épocas calurosas. Ello obliga, para este tipo de cultivos, a incorporar algún sistema de refrigeración de la solución, mientras que en sustratos no es necesario si se evita un excesivo calentamiento de dicha solución en las tuberías de distribución.

En lo que se refiere a la situación contraria, el enfriamiento excesivo de la solución nutritiva en NFT, también llega a ser un factor limitante y, para contrarrestarlo, hay que instalar una caldera que permita el calentamiento del agua, cuando sea necesario, antes de aportarla al cultivo.

- Los niveles de oxígeno en el agua pueden llegar a ser excesivamente bajos en NFT, lo que impide una adecuada oxigenación de las raíces del cultivo y origina la muerte de éstas. Esto puede ser especialmente preocupante con altas temperaturas, ya que se reduce la solubilidad del oxígeno en el agua, mientras que la actividad metabólica de la planta es superior y tiene, por tanto, mayores necesidades de dicho elemento.

Para evitar estos problemas, es necesario crear la mayor turbulencia posible en las caídas del agua a diferentes niveles (desde los canales de cultivo a la tubería colectora y desde ésta al tanque colector) con el fin de aumentar su oxigenación. Asimismo, no se deben disponer canales excesivamente largos.

Frente a ello, para conseguir una buena oxigenación de las raíces del cultivo en un sistema cerrado en sustratos, sólo es necesario mantener en éstos una adecuada relación agua-aire, evitando su encharcamiento.

- Los canales de cultivo del NFT son caros ya que han de ser de un material rígido y de calidad para mantener una lámina de agua correcta, mientras que en recirculación en sustratos, los canales para recoger el agua lixiviada pueden ser mucho más sencillos, ya que su única función es la de llevar dicho drenaje hasta el tanque de acumulación.

Recientemente se ha desarrollado en el Sureste peninsular de Europa un nuevo sistema de cultivo hidropónico denominado NGS (New Growing System), que presenta unas características de instalación y funcionamiento muy parecidas al NFT, aunque no se puede considerar como tal ya que no es necesario mantener a nivel radicular una lámina de solución nutritiva tan estricta. Este sistema parece solventar algunos de los inconvenientes del NFT.

El sistema NGS básicamente incorpora como novedad la sustitución del canal de cultivo del NFT por una bolsa de polietileno que contiene otras dos capas de plástico. Estas dos últimas están perforadas de forma que los agujeros no coincidan en la misma vertical en las diferentes capas, lo que evita que la raíz se acumule directamente en el fondo de la bolsa, ya que ello acarrearía problemas de encharcamiento. De este modo, antes de que el sistema radicular alcance el tercer nivel, habrá realizado un crecimiento en escalera que reducirá la acumulación de raíces en el fondo. Esta manera sencilla de sustituir los canales de cultivo clásicos del NFT permite reducir drásticamente los costos de instalación.

3.2.2 Fertirrigación de los sistemas con sustrato

a). Sistemas a solución perdida

Estos sistemas fueron desarrollados originalmente a solución perdida, por lo que, con el fin de evitar un derroche de agua y nutrientes, habrá que aportarlos de la forma más ajustada posible a los requerimientos del cultivo. Esto significa tener que ofrecer riegos puntuales en función de esta demanda, la cual resulta variable a largo del día, entre días y a lo largo del periodo de desarrollo del cultivo. Tal filosofía difiere del manejo del riego llevado a cabo en otros sistemas de cultivo sin suelo, como por ejemplo los hidropónicos, en los que el aporte de solución nutritiva ha de ser

continuo o intermitente de alta frecuencia al no existir una reserva de agua a nivel de la rizosfera como ocurre en los sistemas convencionales con sustrato.

No obstante, por muy bien que tratemos de manejar el sistema y por buenas que resulten las condiciones de cultivo (alta uniformidad de la instalación de riego, agua de buena calidad, etc), será inevitable tener que aportar un volumen de solución superior al absorbido por el cultivo, originándose de este modo un drenaje mínimo del 15-20 % que el agricultor no suele bajar del 20-25 % para mayor seguridad. Esto es así principalmente, porque siempre van a aparecer ciertas diferencias en el caudal de los emisores del sistema de riego y porque dentro del cultivo no todas las plantas van a presentar los mismos requerimientos hídricos. Además, resulta materialmente imposible ajustarse en cada momento a las necesidades de agua y nutrientes del cultivo, por lo que será necesario dicho drenaje para evitar desequilibrios de la solución existente en la rizosfera y la desecación progresiva del sustrato.

Cuanto menos óptimas sean las condiciones de cultivo, mayor deberá ser el drenaje desechado. Un ejemplo típico lo constituye el empleo de aguas salinas de baja calidad agronómica que, en algunos casos, obliga a realizar lixiviados de más del 50 % del agua aportada. Este porcentaje de drenaje se puede calcular en función de la acumulación máxima de los iones más perjudiciales, generalmente cloro o sodio, que el cultivo puede soportar con una merma asumible de producción, mediante la siguiente expresión:

$$C_g = C_a \cdot (1 - D) + C_m \cdot D ; D = \frac{C_g - C_a}{C_m - C_a} \quad [1]$$

Donde:

D es el drenaje mínimo necesario que pretendemos calcular en tanto por uno.

C_g es la concentración existente en el agua de riego del ión perjudicial considerado en el cálculo.

C_m es la concentración máxima que se permite de ese ión en el sustrato.

C_a es el coeficiente de absorción de ese ión (cantidad consumida del mismo por unidad de volumen de agua a su vez absorbida por la planta).

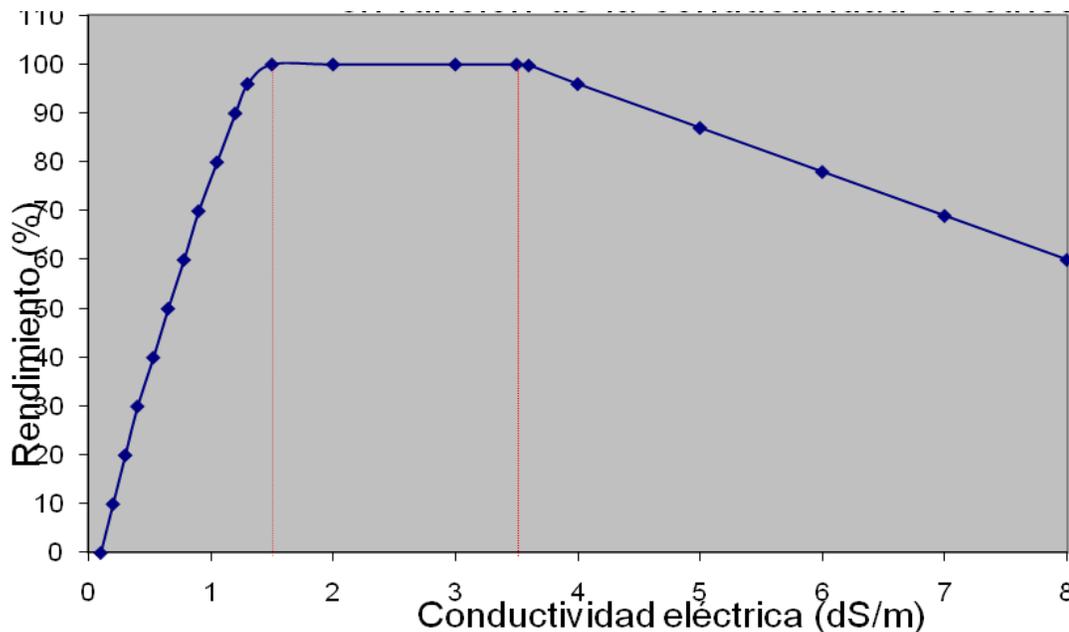
Lógicamente, si pretendemos que todas las plantas del cultivo estén sometidas como mucho a la concentración máxima C_m , será necesario incrementar este porcentaje calculado debido a la incidencia de otros factores como la uniformidad de la instalación de riego. En este caso habrá que dividir D por el coeficiente de uniformidad (CU) del sistema de riego para obtener el porcentaje de drenaje final. En lo que se refiere a la incidencia de otro factor de uniformidad como es la aparición de diferencias en las necesidades hídricas de distintas plantas dentro del cultivo, esto se solventa

en cierta forma a nivel práctico colocando un emisor más en aquellas unidades de cultivo que están en los bordes de la parcela ya que reciben más radiación.

El control del drenaje se realiza mediante unas bandejas que se colocan para tal fin en un lugar representativo dentro de la parcela. Sobre cada una de ellas se suelen disponer dos unidades de sustrato con sus correspondientes plantas, y se establece una ligera pendiente hacia uno de los extremos para recoger el lixiviado y contabilizarlo, bien manualmente o bien de forma automática por pulsos.

Por otro lado hay que tener en cuenta que la medida diaria del porcentaje de lixiviado no es más que una forma mecánica y sencilla de controlar la acumulación de sales en la rizosfera, de manera que conviene acompañarla de medidas más directas de las condiciones de desarrollo del cultivo, como la conductividad eléctrica y el pH tanto del drenaje como de la solución de aporte, con el fin de detectar posibles alteraciones importantes que se puedan producir. En la lámina 2.10 se presenta el comportamiento del rendimiento del cultivo de jitomate en función de la conductividad eléctrica. Se muestra que los valores óptimos varían de 1.5 a 3.5 dS/m.

Lámina 2.10. Comportamiento del rendimiento del cultivo de jitomate en función de la conductividad eléctrica



Un aspecto muy importante a tener en cuenta en el manejo del riego es la decisión del momento óptimo para llevarlo a cabo. Lógicamente, con el fin de facilitar dicho manejo, nos interesa dar riegos lo más largos posibles para establecer así una baja frecuencia. Sin embargo esto tiene un límite, y el momento más adecuado será aquél en que necesitamos reponer en el sustrato el agua consumida por la planta desde el riego anterior, cuando las condiciones empiezan a no ser favorables para la raíz. Ahora bien, ¿cuándo aparecen esas condiciones? En un principio podría

pensarse que sería en el momento en el que se agotase el agua fácilmente disponible existente en el sustrato con el fin de evitar que la planta tenga que hacer uso del agua de reserva, la cual está retenida a una mayor presión matricial. Sin embargo esto no es así, pues además de las fuerzas de retención mátricas, la planta debe vencer la presión osmótica de la solución y ésta irá aumentando conforme el consumo del agua existente en el sustrato incrementa la concentración salina, por lo que el riego deberá darse antes que la conductividad eléctrica de la solución llegue a ser excesiva. Pero a niveles prácticos existe otro factor más sensible para definir el momento del riego que es la composición de la solución nutritiva, ya que en el entorno de la raíz existe una solución con un equilibrio diferente a la que presenta la solución de aporte y, al regar, los equilibrios resultantes serán la media ponderada entre ambos. Dado que lo que se pretende es alterar lo menos posible el status establecido, nos interesa que el porcentaje de solución entrante sea pequeño. De este modo se acepta que la reposición se lleve a cabo cuando se haya consumido el 5 % o como mucho el 10 % del agua retenida por el sustrato.

Según lo dicho anteriormente, el volumen de agua a aportar en cada riego quedará definido por ese porcentaje de un 5 a un 10 % que se ha aceptado como admisible, y habrá que calcularlo en cada caso concreto en función del volumen de sustrato y de su contenido en agua. A continuación, dado que, generalmente, los agricultores establecen la duración de los riegos por tiempo en vez de por volumen, que sería lo ideal, hay que transformar el volumen en tiempo de riego conociendo el caudal arrojado por los emisores. Ese tiempo así calculado se suele mantener invariable a lo largo del cultivo, aunque puede haber situaciones que obliguen a su alteración, como por ejemplo una desecación excesiva del sustrato debido a un manejo inadecuado, que induzca a acortar los riegos con el fin de conseguir su rehidratación, o todo lo contrario, un encharcamiento excesivo que aconseje alargar los riegos con el fin de distanciarlos y evitar problemas de oxigenación.

Otro aspecto fundamental en el manejo de los cultivos sin suelo es el establecimiento de la solución nutritiva de aporte ya que, a excepción del carbono y el oxígeno, que la planta toma del aire, y del hidrógeno, que incorpora del agua, el resto de los nutrientes minerales los obtiene disueltos en el agua que absorbe por la raíz. Los mecanismos de absorción son diversos dependiendo del tipo de elemento del que se trate y el proceso tiene lugar a unas determinadas concentraciones, que resultan diferentes para cada nutriente y varían en función de la especie, variedad, fase vegetativa, condiciones ambientales, etc. De este modo, a través de la fertirrigación vamos a intentar que los iones se encuentren de forma disponible y en cantidad suficiente en el entorno de la raíz, ya que de lo contrario se producirá la deficiencia de algún elemento y la alteración de los coeficientes de absorción. En definitiva se trata de mantener el equilibrio y la concentración de iones en la solución nutritiva del entorno radicular que permita la absorción por la raíz de cada ion a su coeficiente particular.

La concentración de un ion en la rizosfera será mayor o menor que en la solución de aporte dependiendo de la facilidad con que lo absorba la planta. De este modo, en el caso **de iones de fácil absorción como el amonio, el fósforo o el potasio, podemos aportarlos a una concentración inferior a su coeficiente de absorción, lo que va a reducir su nivel en la raíz sin que se afecte el cultivo y disminuir las pérdidas por lixiviación.** En cambio, en el caso de aquellos iones que la planta absorbe de forma pasiva y con dificultad como el calcio, tendremos que aportarlos a una concentración superior a su coeficiente de absorción, para que se acumulen en la rizosfera y se “fuerce” la entrada en la planta, alcanzándose así su máximo potencial de

absorción. En el cuadro 2.7 se muestran las relaciones que suelen encontrarse entre las concentraciones de diferentes iones en la solución de aporte y en la del entorno de la raíz en un sustrato inerte.

Cuadro 2.7 Relaciones más usuales entre las concentraciones iónicas de la solución de aporte y la de la rizosfera en un sustrato inerte.

ION	Concentración en la solución de aporte	Concentración en la solución de la rizosfera
NO ₃ ⁻	100 %	75-125 %
NH ₄ ⁺	100 %	0-50 %
H ₂ PO ₄ ⁻	100 %	50-75 %
K ⁺	100 %	50-75%
Ca ⁺⁺	100 %	125-200 %
Mg ⁺⁺	100 %	200-300 %
SO ₄ ⁼	100 %	150-200 %
pH	100 %	+ 0.5 Ud
CE	100 %	+ 1-2 Ud

Teniendo en cuenta la relación: $C_r = R \cdot C_e$, podemos modificar la ecuación 2 de la siguiente forma:

$$C_e = \frac{C_a \cdot (1 - D)}{(1 - R \cdot D)} \quad [3]$$

Una vez diseñada la solución nutritiva de aporte y, por tanto, definidas las concentraciones de los diferentes iones presentes en ella, tan sólo queda llevar a cabo su formulación, deduciendo de tales concentraciones las que aporta el agua de riego y añadiendo la diferencia mediante abonos minerales.

Sin embargo, a pesar de la importancia que se ha concedido en los párrafos anteriores al adecuado diseño de la solución de aporte con el fin de cubrir las absorciones del cultivo y fijar a nivel radicular una solución óptima que no constituya un factor limitante para el proceso de absorción, la experiencia práctica demuestra que, al menos en nuestras condiciones de cultivo, no resultan determinantes para el desarrollo de la plantación ligeras variaciones en la composición

química de dicha solución debido a la capacidad de adaptación del cultivo. Además, como en los sistemas abiertos no se reutiliza el lixiviado obtenido, no existe el riesgo de que se desequilibre la solución con el tiempo debido a un aporte desajustado de fertilizantes, tal y como ocurre en los sistemas cerrados. Por tanto es posible llevar a cabo un cultivo de este tipo con muy pocos controles analíticos, tal y como se comentó con anterioridad.

b). Sistemas con reutilización del lixiviado.

Estos sistemas, a pesar de ser cerrados, derivan de los sistemas convencionales abiertos con sustrato, por lo que en su manejo habrá que tener en cuenta muchas de las consideraciones apuntadas con anterioridad.

El volumen de riego se fija del mismo modo que en un sistema abierto pero, dado que el drenaje es recogido y reutilizado, se pueden establecer porcentajes de lixiviación más elevados sin que ello suponga un despilfarro de agua y nutrientes. Esto permite evitar en momentos puntuales posibles déficits hídricos que pueden llegar a producirse si se realiza un aporte muy ajustado de solución nutritiva. Además, al regarse con mayor frecuencia, el contenido mínimo de agua en el sustrato será mayor y la solución estará sometida a una menor presión matricial, con lo que el gasto energético llevado a cabo por parte de la planta en el proceso de absorción disminuirá. Finalmente, si se trabaja a un porcentaje de lixiviación muy elevado, resultará factible mantener concentraciones de nutrientes en la rizosfera más bajas de las habituales sin que el cultivo se resienta ya que la reposición frecuente de la solución a nivel radicular impedirá un déficit local de nutrientes. No obstante, esto tiene un límite ya que, debido a la necesidad de desinfectar la solución nutritiva para evitar la propagación de patógenos radiculares a través de ella, no es posible mantener porcentajes de drenaje muy altos. Éstos repercutirían en unos elevados costos de desinfección que harían inviable la técnica desde un punto de vista económico. Por ello dicho porcentaje se suele mantener en un nivel de un 30-40 % para agua de buena calidad, compatible con un cierto grado de seguridad y un costo moderado en desinfección.

Por otro lado, debido a las razones mencionadas, un alto porcentaje de lixiviación va a estimular la absorción de agua por parte del cultivo, de manera que en algunos ensayos experimentales que comparan sistemas de recirculación con otros a solución pérdida, se ha llegado a obtener una mayor absorción en el primer sistema que en el segundo, a pesar de la acumulación en el sistema cerrado de las sales aportadas en exceso a través del agua de riego o los fertilizantes. Esto puede contrarrestar en parte el efecto negativo de dicha acumulación y puede ser una buena táctica de manejo en sistemas de recirculación, especialmente en primavera, cuando las necesidades de agua del cultivo se disparan.

Para reutilizar el lixiviado, la preparación de la solución nutritiva puede llevarse a cabo, mezclando en primer lugar el drenaje con agua exterior y completando a continuación dicha solución mediante la adición de los fertilizantes, o bien obteniendo una solución previa a base del agua exterior y los fertilizantes ajustada a las necesidades de absorción del cultivo (solución de entrada), a la que se añade el drenaje. De la primera forma nos aseguramos una determinada conductividad eléctrica y podemos conseguir la solución nutritiva final óptima deseada conociendo la composición del drenaje mediante análisis. Sin embargo tiene el problema de que, si se produce la acumulación de algún nutriente por aporte excesivo del mismo y teniendo en cuenta que se ha fijado el límite de

salinidad de la solución, se reducirá el aporte mediante fertilizantes del resto de nutrientes, disminuyendo la concentración de los mismos progresivamente y pudiéndose alcanzar límites críticos para el desarrollo normal del cultivo. Esto se solventa de la segunda forma ya que con ella mantenemos constante un aporte definido de cada nutriente. Por supuesto presenta el inconveniente de que no nos permite asegurar una determinada conductividad, ya que ésta aumentará o disminuirá en el caso de que los nutrientes se aporten en mayor o menor cantidad respectivamente que las necesidades del cultivo.

La primera técnica de preparación de la solución nutritiva se utiliza ampliamente en Holanda, ya que los agricultores de allí cuentan con aguas de muy buena calidad agronómica (incluso algunos riegan con agua de lluvia), lo que permite que apenas se acumulen las sales nocivas. Sin embargo en la costa mediterránea la situación resulta bastante diferente ya que se dispone de aguas con una calidad notablemente peor, por lo que, al recircularlas, se suele producir la acumulación de iones como el sodio, los cloruros, los sulfatos, etc., los cuales suelen aparecer en cantidades superiores a las necesidades del cultivo. En este caso puede resultar más conveniente la segunda técnica ya que el aumento de la salinidad puede controlarse fácilmente mediante medidas de conductividad y se pueden fijar criterios prácticos en base a ésta que nos indiquen cuándo resulta necesario descartar la solución nutritiva. Esto resultará menos costoso que la realización de análisis frecuentes para evitar desequilibrios nutricionales.

En los sistemas con recirculación el objetivo es conseguir una solución a nivel radicular óptima para el desarrollo del cultivo y, por tanto, semejante a la mantenida en un sistema a solución perdida. Tan sólo en el caso hipotético de mantener un porcentaje de lixiviación muy elevado podría pensarse en reducir la concentración de los iones fácilmente asimilables por el cultivo, como los fosfatos, el potasio, etc., tal y como se comentó con anterioridad. De este modo, si tratamos de conseguir una situación estacionaria en la que no se produzca la acumulación o disminución excesiva de ningún ion con el fin de poder reutilizar el drenaje el mayor tiempo posible sin tener que tirarlo, será necesario que la concentración de cada nutriente en el agua exterior incorporada al sistema, obtenida como suma de la concentración del mismo ya existente en el agua de riego y de la cantidad aportada mediante fertilizantes, sea igual a su coeficiente de absorción; en el caso de que resulte mayor que éste, tal nutriente irá acumulándose progresivamente en el drenaje conforme sea reutilizado, y al contrario si es menor. De esto se deduce que resulta fundamental conocer los coeficientes de absorción del cultivo para poder manejar los sistemas cerrados, cosa que no es estrictamente necesaria en los sistemas abiertos. El problema es que, como ya se comentó, dichos coeficientes son bastante variables y dependen de muchos factores. Con el ánimo de que puedan servir como referencia, en el cuadro 2.8 se han incluido los rangos en los que han oscilado los coeficientes de absorción calculados en la Estación Experimental Las Palmerillas de Caja Rural de Almería para un cultivo de tomate tipo larga vida, cv. Daniela, con un ciclo comprendido entre septiembre y mayo.

Cuadro 2.8. Coeficientes de absorción obtenidos para un cultivo de tomate tipo larga vida cv. Daniela de ciclo largo, en $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

N	H_2PO_4^-	$\text{SO}_4^{=}$	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}
8-14	1.25-1.5	0.5-1.5	4-8	1.75-3	0.75-1.2

Los valores más altos en la absorción de nitrógeno se registran al inicio del cultivo, cuando el crecimiento vegetativo es más acelerado, y se mantienen hasta que la planta empieza a cargarse de fruto. Un momento crítico en la absorción de este elemento tiene lugar poco antes del inicio de la recolección ya que su coeficiente cae a unos $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Posteriormente se recupera el ritmo de crecimiento, aunque no hasta los niveles previos, y con ello ligeramente la absorción de nitrógeno, la cual vuelve a descender en primavera al aumentar la tasa de transpiración del cultivo.

En lo que se refiere a los fosfatos, su absorción tiende a mantenerse mucho más estable. En general se ha calculado un coeficiente entorno a $1.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, que descendió a 1.25 en el periodo invernal debido a las dificultades que tiene la planta para absorber este ión con bajas temperaturas. En primavera volvió a aumentar debido a la mayor actividad de la planta y las mayores necesidades energéticas que se presentan con altas temperaturas. No obstante los valores calculados resultan algo mayores que los obtenidos por otros investigadores, quizás debido a que en todo momento el pH existente en el drenaje ha sido superior a 7 y a veces próximo a 8, lo que ha podido provocar ciertas precipitaciones de este ión.

Los sulfatos mostraron, en cambio, un amplio rango de oscilación a lo largo del cultivo. Los valores más altos se registraron en los primeros meses de cultivo pero, tras la entrada en producción, se inició un descenso paulatino de su absorción.

El potasio también sufre importantes oscilaciones. Su coeficiente inicial se estableció en unos $6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, aumentando posteriormente conforme se produjo el cuajado de los frutos hasta llegar a un máximo de 8 al inicio de la recolección. Posteriormente tendió a disminuir progresivamente, de forma que se alcanzó un mínimo de $4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ en primavera debido a la alta transpiración del cultivo en ese periodo.

El calcio tuvo su mayor absorción en los primeros meses de cultivo pero, tras la recolección de los primeros frutos y coincidiendo con la bajada de la temperatura y el aumento de la humedad relativa en invierno, lo cual dificulta su asimilación, se alcanzaron coeficientes bastante bajos (tan sólo $1.75 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$). Ya en primavera este índice volvió a subir hasta un nivel aceptable de $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ gracias a la mayor temperatura y transpiración en este periodo. Hay que tener en cuenta que el calcio se absorbe de forma pasiva.

Finalmente el magnesio tuvo un comportamiento bastante estable y su coeficiente de absorción se situó entorno a $0.9\text{-}1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, valor que subió ligeramente al acumularse este elemento en la solución y se redujo un poco cuando fue necesario renovar dicha solución y de este modo descendió bruscamente su concentración.

Una vez conocidos los coeficientes de absorción que debemos aplicar en nuestro caso concreto, resulta sencillo ajustar la solución nutritiva a utilizar en los sistemas con recirculación del lixiviado. Vamos a desarrollar como ejemplo el de un cultivo de tomate en su etapa de máximo desarrollo vegetativo. Las cifras se expresan en $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$:

Cuadro 2.9 Ajuste de la solución nutritiva con base en los coeficientes de absorción, del agua de riego y del agua drenada. (mmol/l).

Nutrientes	N	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻	CE
Agua de riego	0	0	0.21	0.08	0.64	1.19	3.26	0.4
Drenaje	11.8	0.7	5.94	6.39	7.73	3.29	5.3	3.1
Coef. Absorción	14	1.5	1.3	6	3	1		

Si estamos trabajando con un 30 % de lixiviación y al mismo porcentaje de recirculación, resultará aproximadamente la siguiente conductividad en la mezcla entre el agua de aporte exterior y el drenaje:

$$\text{CE mezcla: } 0,4 \cdot \frac{70}{100} + 3,1 \cdot \frac{30}{100} = 1,2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$$

Y la concentración de bicarbonatos de dicha mezcla será:

$$[\text{HCO}_3^-]: 3,26 \cdot \frac{70}{100} + 5,3 \cdot \frac{30}{100} = 3,87 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

Como en la solución final hay que dejar 0.5 mmol·L⁻¹ de bicarbonatos para ajustar el pH a 5.5, la cantidad a neutralizar con ácido será: 3.87 – 0.5 = =3.37 mmol·L⁻¹. Tal concentración equivale en la solución de entrada a:

$$\frac{3,37}{0,7} = 4,81 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$$

0.7 es el tanto por uno de agua de aporte exterior ya que se está reutilizando un 30 % de lixiviado.

Ahora ajustamos el equilibrio en mmol·L⁻¹ en base a los coeficientes de absorción estimados:

Nutrientes	N	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻
Coeficientes absorción	14	1.5	1.3	6	3	1	
Agua de riego	0	0	0.21	0.08	0.64	1.19	3.26
Aporte de fertilizantes	14	1.5	1.09	5.92	2.36	0	-4.81

Fertilizantes	mmol·L ⁻¹							
Ácido fosfórico	1.5		1.5					-1.5
Ácido nítrico	3.31	3.31						-3.31
Nitrato cálcico	2.36	4.72				2.36		
Sulfato potásico	1.09			1.09	2.18			
Nitrato potásico	3.74	3.74			3.74			
Nitrato amónico	1.115	2.23						
Total aportes		14	1.5	1.09	5.92	2.36	0	-4.81
Solución entrada		14	1.5	1.3	6	3	1.19	-1.55

Los porcentajes que debemos introducir en el programador de riego los calcularemos a partir de los mmol·L⁻¹ fijados de cada fertilizante y teniendo en cuenta las concentraciones a las que se van a preparar las soluciones madre, de la misma forma que como se haría en un sistema a solución perdida.

En cuanto a la conductividad eléctrica de la solución final, ésta la obtendremos sumando la componente correspondiente al aporte de fertilizantes y la correspondiente a la mezcla de agua de aporte exterior y drenaje, que es de 1.2 dS·m⁻¹. La primera componente la calcularemos sumando el número de miliequivalentes de cada uno de los fertilizantes aportados (sin incluir los ácidos ya que se compensan aproximadamente con la destrucción de bicarbonatos que provocan), dividiendo por 10 y multiplicando finalmente por el porcentaje de agua exterior que se incorpora al sistema. Así pues:

$$\text{N}^{\circ} \text{ de miliequivalentes: } 4.72 + 2.18 + 3.74 + 1.115 = 11.755$$

$$\text{Incremento CE por fertilizantes: } \frac{11,755 \cdot 0,7}{10} = 0,8 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\text{CE de la solución final: } 1.2 + 0.8 = 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$$

La composición iónica de la solución final que recibe el cultivo será la media ponderada entre la del drenaje reutilizado y la de la solución de entrada al sistema, obtenida ésta como suma del agua de aporte exterior y los fertilizantes incorporados:

Nutrientes	N	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻
Solución entrada	14	1.5	1.3	6	3	1.19	-1.55
Drenaje	11.8	0.7	5.94	6.39	7.73	3.29	5.3
Solución final	13.34	1.26	2.69	6.12	4.42	1.82	0.5

Un problema que a veces se presenta en el manejo de los sistemas cerrados es que no es posible cuadrar los coeficientes de absorción del cultivo en un momento concreto de su desarrollo con los fertilizantes normales que existen en el mercado, lo que obliga a un desajuste en la solución nutritiva y a la acumulación de algún ion. Así por ejemplo, si utilizamos la misma agua de riego que en el ejemplo anterior, con una concentración de bicarbonatos en el drenaje de 2.26 mmol·L⁻¹ y un porcentaje de recirculación del 40 %, y las absorciones del cultivo en un momento dado son las que se muestran a continuación, entonces:

Nutrientes	N	H ₂ PO ₄ ⁻	SO ₄ ⁼	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	HCO ₃ ⁻
Coeficientes absorción	10	1.5	1.1	7.5	2.25	1	
Agua de riego	0	0	0.21	0.08	0.64	1.19	3.26
Aporte de fertilizantes	10	1.5	0.89	7.42	1.61	0	-3.93
Fertilizantes	mmol·L ⁻¹						
Ácido fosfórico	1.5	1.5					-1.5
Ácido nítrico	2.43	2.43					-2.43
Nitrato cálcico	1.61	3.22			1.61		
Nitrato potásico	4.35	4.35		4.35			
Sulfato potásico	1.54		1.54	3.07			
Total Aportes	10	1.5	1.54	7.42	1.61	0	-3.93

Se observa que no ha sido posible cerrar el ajuste y, si queremos añadir todo el potasio, habrá que excederse en el aporte de nitratos, en forma de nitrato potásico, o de sulfatos, en forma de sulfato potásico. En principio parece más adecuado esto último pues el cultivo tolera aceptablemente concentraciones elevadas de sulfatos y además éstos provocan un menor aumento de la conductividad que los nitratos a la misma concentración en meq·L⁻¹. Otra posibilidad es utilizar una

fuelle de calcio o potasio quelatado o complejado con algún ácido orgánico, de manera que no incorpore nitratos ni sulfatos. Aunque esto resulta costoso, puede ser una buena estrategia en momentos puntuales, especialmente en la entrada en producción, ya que en ese instante se produce, como hemos visto anteriormente, una reducción importante en la absorción de nitratos y un aumento en la de potasio.

Si el agua de riego ya de por sí incorpora algún ion a una concentración superior a la que es capaz de absorber el cultivo, resultará inevitable la acumulación progresiva de ese ion en la solución. Éste es el caso del magnesio en los ejemplos anteriores, aunque lo más típico es que se produzca con el sodio y el cloro, los cuales son tomados en muy bajas concentraciones y frecuentemente aparecen en nuestras aguas a concentraciones netamente superiores a sus coeficientes de absorción. En el cuadro 2.10 se indican los valores obtenidos de dichos coeficientes para distintas especies a dos concentraciones distintas de cloruro sódico a nivel radicular por Sonneveld y Van der Burg.

Cuadro 2.10. Concentraciones absorbidas de Na y Cl en mmol·L⁻¹ para algunas especies cultivadas a dos niveles diferentes de ambos iones en el ambiente radicular.

ESPECIE	Concentración en el ambiente radicular			
	< 5 mmol·L ⁻¹		10 mmol·L ⁻¹	
	Na ⁺	Cl ⁻	Na ⁺	Cl ⁻
Tomate	0.4	0.6	0.8	1.0
Pimiento	0.2	0.3	0.3	0.7
Pepino	0.3	0.3	1.1	1.5
Berenjena	0.1	0.3	0.4	0.7

La forma de evitar una acumulación excesiva de tales iones que pueda resultar nociva para el cultivo, es eliminando periódicamente el drenaje del sistema antes de que se alcance una concentración demasiado alta, o tirando pequeñas cantidades de manera más o menos continua para evitar fluctuaciones en las concentraciones de los distintos elementos. De este modo, llamando:

X a la diferencia entre el porcentaje de agua drenada y recirculada (porcentaje de agua eliminada del sistema).

P_a al porcentaje de agua que es absorbida por el cultivo

C_g a la concentración del ión limitante en el agua de aporte exterior

C_a al coeficiente de absorción del cultivo para ese ión

C_m a la concentración máxima que se permite para ese ión en el drenaje

Se obtiene: $(X + P_a) \cdot C_g = P_a \cdot C_a + X \cdot C_m; X = \frac{P_a \cdot (C_g - C_a)}{C_m - C_g}$ [4]

Expresión que permite calcular el porcentaje del agua total aplicada en el riego que es necesario eliminar del sistema para evitar la acumulación del ion por encima de su concentración máxima permitida. Sin embargo, para poder utilizar esta expresión, es necesario definir, en primer lugar, cuál es la concentración máxima que podemos tolerar en la solución de entorno del ion limitante, y ésta no es una cuestión fácil pues, además de depender de la especie de la que se trate, también está influida por muchos otros factores, como son las condiciones ambientales, los antecedentes del cultivo, etc. No obstante en el cuadro 2.11 se indican las concentraciones de cloruro sódico a las cuales la legislación Holandesa permite eliminar el drenaje del sistema para evitar mermas productivas en diferentes cultivos.

Cuadro 2.11. Contenido de sodio en el drenaje por encima del cual está permitida en Holanda su emisión al agua superficial.

Cultivo	Contenido de Na^+ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Tomate	8
Pimiento dulce	6
Pepino	6
Berenjena	6
Melón	6
Calabacín	6
frutilla	3
Rosa	4
Clavel	4
Gerbera	4
<i>Anthurium</i>	3
<i>Cymbidium</i>	1
Otros	5

Aunque es de suponer que estos límites incluyen un margen de seguridad de cara al agricultor, parecen algo bajos para la zona de Almería pues la experiencia local indica que, por ejemplo, el tomate puede soportar perfectamente en invierno concentraciones de cloruro sódico de $20 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ si la conductividad de la solución de entorno no supera unos $5,5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Lógicamente este límite hay que reducirlo considerablemente en primavera pues el déficit de presión de vapor y la radiación son mayores y la tasa de transpiración del cultivo más alta, de manera que la planta necesita una menor presión osmótica en la rizosfera para poder absorber la gran cantidad de agua que pierde en esas condiciones.

A la vista de la afirmación anterior se desprende que es posible aumentar la tolerancia a la salinidad del cultivo manipulando las condiciones ambientales del invernadero, para lo cual resulta necesario disponer de los sistemas de control climático pertinentes, como pueda ser un equipo adecuado de nebulización con el que poder aumentar la humedad relativa y bajar la temperatura. Se trata, en definitiva, de reducir el déficit de presión de vapor para que disminuya la transpiración del cultivo.

De hecho diversas experiencias llevadas a cabo al efecto demuestran como cultivos que se encuentran a un bajo déficit de presión de vapor son capaces de soportar muy aceptablemente altos niveles salinos, al contrario que aquellos sometidos a mayores niveles. En definitiva, este tipo de estrategias van a permitir un aumento de la concentración máxima admisible a nivel radicular de aquellos iones presentes en exceso en el agua de riego, al tiempo que puede conseguirse un mayor coeficiente de absorción de los mismos, con lo que se reducirá el porcentaje de solución que es necesario eliminar del sistema para no sobrepasar tales límites y se obtendrá un aumento de la eficiencia en el uso del agua. Es éste un amplio campo aún por investigar.

En el caso de que resulte necesario eliminar del sistema un cierto porcentaje de lixiviado para evitar la acumulación excesiva de algún ion, hay que modificar ligeramente las concentraciones de nutrientes a incorporar con el agua de aporte exterior, pues una parte de dichos nutrientes se perderán con el agua drenada eliminada. La fórmula a emplear para calcular dicha concentración de entrada será la siguiente:

$$C_e = \frac{P_a \cdot C_a + X \cdot C_r}{P_a + X} \quad [5]$$

Donde:

C_e es la concentración necesaria del ión para el que realizamos el cálculo en la solución de entrada al sistema.

C_a es el coeficiente de absorción para ese ión.

C_r es la concentración de ese ión en la solución del drenaje eliminado.

P_a es el porcentaje de agua absorbida por el cultivo.

X es el porcentaje de agua eliminada del sistema.

3.2.3 Control microbiológico en sistemas de cultivo con recirculación

Aunque uno de los objetivos que se persiguen con la implantación de los cultivos sin suelo es reducir la incidencia de ciertas enfermedades radiculares, no cabe duda que en dichos cultivos los ataques de hongos en la raíz son relativamente frecuentes e incluso algunos hongos, como *Pythium aphanidermatum*, pueden llegar a ser más peligrosos que en suelo, causando importantes podredumbres. En ocasiones, las enfermedades radiculares pueden alcanzar un rápido desarrollo, al igual que ocurre con algunas enfermedades foliares, debido a que los agentes infecciosos, una vez introducidos en el sistema, son favorecidos como resultado de la abundancia de un huésped genéticamente uniforme, la existencia de un medio físico con un régimen de humedad y temperatura más constante, y la disponibilidad de un mecanismo para la dispersión rápida y uniforme del agente infeccioso radicular a través del sistema de cultivo.

Cuando se trabaja en sistemas abiertos, de cultivo en sustratos, aunque los daños pueden ser graves, no existe el riesgo de una invasión generalizada a partir de un foco inicial, pues las plantas se desarrollan en unidades de sustrato independientes que no pueden infectarse entre sí a través del agua de riego. Sin embargo, si el drenaje es recogido y utilizado nuevamente en el riego del cultivo, los propágulos de patógenos radiculares que pudieran existir en un punto concreto conseguirán una rápida dispersión por toda la plantación, pudiendo ocasionar daños devastadores que en cultivos con drenaje libre habrían sido sólo locales. Ante esta posibilidad, no parece lógico plantearse la recirculación de las soluciones nutritivas sin la utilización de algún método de control efectivo de los patógenos infecciosos.

3.2.4 Patógenos infecciosos radiculares que pueden afectar a los cultivos sin suelo.

Los cultivos sin suelo se ven afectados por una menor diversidad de microorganismos infecciosos radiculares que los cultivos convencionales en suelo. Sin embargo, las pérdidas originadas en los primeros son ocasionalmente mayores que los cultivos en suelo.

Tratamientos físicos

Los métodos físicos consisten en desinfectar de forma más o menos completa la solución nutritiva para evitar así la presencia de algún agente infeccioso que pueda extender la enfermedad. El principal problema de estos métodos, aparte de que pueden llegar a no ser totalmente efectivos, es que resultan costosos, por lo que es necesario trabajar con volúmenes pequeños de drenaje para evitar que se eleven excesivamente los gastos de desinfección. Por este motivo, tales métodos sólo son aplicables a cultivos en sustrato y no a sistemas hidropónicos (NFT y similares). No obstante, en éstos últimos, los riesgos de ataque radicular generalizado son menores de lo que pudiera pensarse en un principio debido a que, al no existir sustrato y establecerse una circulación continua, no tiene lugar una acumulación de la solución en el entorno de las raíces, con lo cual las

posibilidades de fijación de las especies fúngicas presentes en el medio son mucho menores. Normalmente estos patógenos actúan como formas saprofitas que se alimentan de exudados radiculares, restos de raíces, etc., no afectando a partes vivas del cultivo. De este modo en estos sistemas hidropónicos se puede realizar un buen control haciendo uso de otros métodos de lucha.

Por el contrario, en cultivos en sustrato sí existe una cierta cantidad de agua acumulada cerca de las raíces, con lo cual el riesgo de contaminación es mayor. De ahí la conveniencia de desinfectar en estos sistemas, al menos en los periodos en los que las posibilidades de ataque son más elevadas.

Radiación ultravioleta

El efecto germicida de los rayos ultravioleta se conoce desde hace mucho tiempo. En el año de 1913 en Marsella, Francia se puso en marcha la primer Planta de desinfección de agua potable. A pesar de su perfecto funcionamiento, este método inicialmente no pudo implantarse. Esto debido a que en los años siguientes la producción electroquímica de materia prima condujo al suministro económico de cloro, como medio químico de desinfección. El uso de los procesos ultravioleta se limitó entonces a aquellas aplicaciones industriales en las cuales las exigencias son demasiado altas tanto para los parámetros microbiológicos, como para los parámetros químicos del agua; es decir allí donde los procesos químicos de desinfección no tienen cabida.

En este sistema, la solución nutritiva se hace circular a través de una lámpara capaz de emitir radiación ultravioleta con una longitud de onda de 254 nm, lo que permite reducir el nivel de agentes infecciosos gracias a su actividad biocida. Cada especie patógena tiene unos requerimientos energéticos para su eliminación. No obstante, a nivel general se puede decir que en el caso de hongos y bacterias son necesarios 100 mJ·cm⁻², mientras que en el caso de virus se necesitan 250 mJ·cm⁻².

La desinfección de agua por radiación ultravioleta (UV) es un proceso físico que no altera su composición química, su olor, ni su sabor. La seguridad de la desinfección UV está probada científicamente y constituye una alternativa segura, eficaz y económica a la cloración, sin el uso de agentes químicos. La radiación UV constituye una de las franjas del espectro electromagnético y posee mayor energía que la luz visible.

La irradiación de los gérmenes presentes en el agua con rayos UV provoca una serie de daños en su molécula de ADN que impiden la división celular y causan la muerte. La radiación UV más germicida es aquella de longitud de onda de 254 mJ/cm². El ADN expuesto a esta energía presenta un máximo de absorción, es decir, de inactivación. Con esta dosis de radiación se obtiene un 90% de inactivación de diferentes microorganismos

IV. METODOLOGÍA

En el invernadero del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), ubicado en Jiutepec, Morelos, en una superficie de 126 m², se llevó a cabo un trabajo utilizando el cultivo de jitomate tipo salades, variedad Cid, con sustrato de fibra de coco, empleando en dos tratamientos aguas residuales tratadas, uno con recirculación del agua lixiviada y el otro sin recirculación, y en otro tratamiento con agua de pozo, recirculando el agua lixiviada; cada uno en una superficie de 42 m². Se cuantificó el volumen de agua aplicado y la recirculación del agua drenada, así como la cantidad de fertilizante comercial utilizado. El agua captada lixiviada se almacenaba en un tanque de polietileno, y antes de ser incorporada nuevamente al riego, ésta pasaba por un proceso de desinfección por medio de un equipo de radiación ultravioleta.

Para facilitar la captación del agua lixiviada (drenada) se aprovechó la infraestructura existente del área del invernadero, el cual contiene 12 bancales de bloc y cemento con dimensiones de 1m x 5m cada uno. El cultivo de jitomate se trasplantó a una densidad de 4 plantas/m², utilizando 480 plantas en total.

Para llevar a cabo el presente trabajo, fue necesario realizar la siguiente infraestructura

4.1 Rehabilitación del invernadero y construcción de infraestructura faltante

4.1.1 Construcción de la ventana cenital del invernadero del IMTA.

En el invernadero del IMTA, se realizó la rehabilitación de la estructura metálica, con la finalidad de adicionarle la ventana cenital para el desalojo del aire caliente que tiende a acumularse en la parte interna superior del invernadero. Además se le cambió el plástico y la malla perimetral. En la foto 4.1 se observa el invernadero anterior, es decir, antes de llevar a cambio su rehabilitación, y en la foto 4.2 se observa el proceso de rehabilitación y finalmente en la foto 4.3 se observa el invernadero actual.



Foto 4.1. Invernadero antes de la rehabilitación



Foto 4.2. Proceso de rehabilitación del invernadero.



Foto 4.3. Invernadero actual, con la ventana cenital.

4.1.2 Construcción de tanques de captación del agua de riego

Se construyeron dos tanques subterráneos para la captación y almacenamiento del agua de riego drenada, que aunado al existente se tienen actualmente tres tanques de captación. En la foto 4.4 se observa la profundidad y tamaño del tanque excavado. En la foto 4.5 se observa el tanque ya construido, y recipiente de polietileno de 1100 litros de capacidad, junto con la bomba para extraer el agua y reenviarla a los tanques de riego.



Foto 4.4. Excavación de zanja para tanque



Foto 4.5. Tanque de Polietileno para captación

4.1.3 Líneas de tubería de PVC para recoger el agua lixiviada, y conducirla a los tanques de captación.

En las fotos 4.6 y 4.7 se presenta la instalación de la tubería de conducción dentro del invernadero.



Foto 4.6. Tubería dentro del invernadero



Foto 4.7. Tubería para conectar al tanque de captación

4.1.4 Instalación del sustrato de fibra de coco y del sistema de riego

El material empleado como sustrato, fue fibra corta y polvillo de coco, con un pH que varía de 6.3 a 6.7, en bolsas de polietileno con un peso de 5 kg y un tamaño de 10 x 30 x 100 cm, una densidad de la fibra de 294 kg/m³, una conductividad eléctrica que varía de 1.2 a 1.7 dS/m (decisiemen/m). Según la información comercial del producto contiene una cantidad de 5.64 meq/l de cloruros, de 8.85 meq/l de sodio, de 1.3 meq/litro de calcio y magnesio.

Una parte importante de la utilización de la fibra de coco en cuestiones de investigación, es que este a diferencia del sustrato de tezontle presenta una granulometría más estandarizada, por lo que los resultados que se obtengan permite que estos sean más representativos y extrapolables. En las fotos 4.8 y 4.9 se presenta el sustrato de fibra de coco en contenedores de plástico (bolis), en contenedor para 5 plantas de cultivo de jitomate, con un gotero por planta.



Foto 4.8. Contenedores de fibra de coco

Foto 4.9. Sistema de riego por goteo.

4.1.5 Instalación del filtro de rayos Ultravioleta.

Para la esterilización del agua drenada previo a la recirculación, ésta se sometió a un proceso de desinfección mediante un equipo de radiación ultravioleta, el cual elimina patógenos tales como hongos, bacterias y virus. La desinfección de agua por radiación ultravioleta es un proceso físico que no altera su composición química, su olor, ni su sabor. La seguridad de la desinfección UV está probada científicamente y constituye una alternativa segura, eficaz y económica a la cloración, sin el uso de agentes químicos. La radiación UV constituye una de las franjas del espectro electromagnético y posee mayor energía que la luz visible. La irradiación de los gérmenes presentes en el agua con rayos UV provoca una serie de daños en su molécula de ADN que impiden la división celular y causan la muerte. La radiación UV más germicida es aquella de longitud de onda de 254 nm. El ADN expuesto a esta energía presenta un máximo de absorción,

es decir, de inactivación. El caudal del equipo utilizado de radiación ultravioleta utilizado es de 30 litros por minuto, funciona a una presión máxima de 3.5 kg/cm^2 , y la temperatura recomendada de trabajo varía de 10 a $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

En la foto 4.10, se presenta el equipo de radiación ultravioleta, con capacidad de 90 litros por minuto.

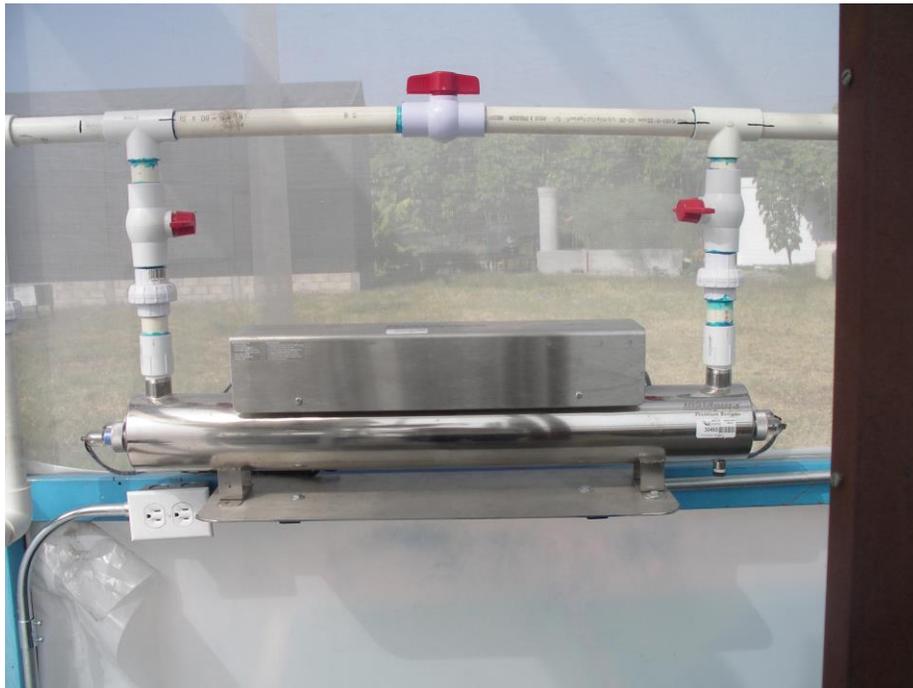


Foto 4.10 Equipo de radiación ultravioleta.

4.2 Sistema de riego

Se estableció un sistema de riego por goteo, utilizando goteros (incluye tubín y estaca) de gasto nominal de 2 litros por hora, insertados en manguera de polietileno de 16 mm de diámetro, instalando un gotero por planta. El gasto de emisión promedio de los goteros es de 2.5 litros por hora a una presión de 1.7 kg/cm^2 . Para la solución fertilizadora se empleó un tanque de polietileno, accionado el sistema de riego mediante una electrobomba de una capacidad de 0.5 HP. Para el sistema de filtrado se instalaron filtros de malla de 120 MESH.

En las fotos 4.11 y 4.12 se presentan el tanque de captación-almacenamiento del agua drenada y el cultivo de jitomate en etapa de maduración, respectivamente. Se realizaron las principales actividades del cultivo como: trasplante, aplicación de agroquímicos, tutoro y eliminación de los brotes o retoños, aplicación del agua con la solución nutritiva mediante el sistema de riego, control

de pH, la conductividad eléctrica, el registro de los volúmenes de agua y fertilizante aplicados, y cuantificación del producto cosechado. Como parte fundamental del presente trabajo se realizaron los muestreos del agua de riego con fines de determinar el análisis fisicoquímico del agua de riego nueva y recirculada.



Foto 4.11. Tanque de captación del agua drenada



Foto 4.12. Etapa de maduración del cultivo

4.3 Muestreos y análisis de la calidad del agua de riego

Durante la recirculación del agua de riego drenada, se cuantificó, mediante muestreo y análisis fisicoquímico la calidad del agua de riego y el nivel de fertilizantes que drenan con el agua de riego. Se realizaron los muestreos y análisis fisicoquímico de la calidad del agua de riego: agua nueva y del agua lixiviada recirculada. En los cuadros 4.1, 4.2 y 4.3 se presentan los resultados de los análisis.

Estos análisis fisicoquímicos se realizaron en el laboratorio de calidad del agua del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, durante el periodo del 13 de febrero al 14 de julio del 2009.



Foto 4.13. Toma de muestra del agua lixiviada.



Foto 4.14. presentación de muestras en el laboratorio

Cuadro 4.1 Análisis fisicoquímicos del agua de pozo, agua nueva y agua lixiviada recirculada.

Parámetro	13-feb	27-Feb-09		03-Mar-09		06 marz	17-Mar-09		24-marzo	31-Mar-09		07-abril	14-Abr-09		21-abril	28-Abr-09	
(meq/litro)	nueva	nue/fe	recirc	nue/fe	recirc	recirc	nue/fe	recirc	recirc	nue/fe	recirc	recirc	nue/fe	recirc	recirc	nue/fe	recirc
pH	7.43	3.73	7.3	4.19	6.8	6.9	5.1	6.84	6.55	4.4	6.7	6.73	6.52	5.95	6.21	6.08	6.01
C.E. dS/cm	0.21	1.24	0.61	1.20	1.22	1.30	1.48	1.45	1.78	1.54	2.19	2.34	1.90	3.43	3.89	2.03	3.38
Aniones																	
Bicarbonatos	1.37869	0	0.97	0	0.754	0.713	0.082	0.78	0.5492	0	0.574	0.485	0.754	0.585	0.6	0.518	0.441
Carbonatos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfatos	0.34583	6.6	2.05	6.292	5.521	6	7.604	8.02	11.563	8.792	16.5	19.1	6.667	24.08	25.27	8.438	17.98
Fosfatos															8.982	2.907	4.083
Cloruros	0.21127	0.28	1.34	0.293	1.411	1.623	0.324	1.56	1.5211	0.451	1.268	1.408	2.113	4.085	6.225	2.439	4.958
N-NO3	0.035	1.04	0.14	0.004	0.008	0.66	1.202	0.53	0.2306	1.163	0.398	0.369	0.003	0.004	1.935	1.473	1.548
N-NO2	0.00046									5E-04	0.001		5E-04	0.014	0.055	0.009	0.071
Suma	2.0	7.9	4.5	6.6	7.7	9.0	9.2	10.9	13.9	10.4	18.7	21.4	9.5	28.8	43.1	15.8	29.1
Cationes																	
meq Ca++	0.6373	2.87	1.09	2.881	1.909	2.69	3.948	2.34	2.2415	5.132	6.374	6.061	7.27	10.65	11.07	6.023	9.703
meq Mg++	0.71514	0.93	0.7	2.008	2.167	3.36	2.133	2.47	3.4634	2.849	5.043	5.475	2.714	7.19	8.415	3.109	6.899
meq K+	0.0899	3.89	1.97	3.837	5.273	1.034	4.616	5.94	6.2877	7.164	10.99	8.565	6.119	13.31	13.69	6.846	11.87
meq Na+	0.50374	0.71	0.94	0.653	0.708	2.032	0.616	1.58	2.5735	0.853	2.774	3.224	0.781	4.079	4.313	1.418	3.472
meq B+++	0.02889	0.09	0.07	0.101	0.13	0.145	0.174	0.17	0.1797	0.128	0.128	0.17	0.014	0.128	0.028	0.241	0.028
meq NH4+															0.606	0.906	0.52
Suma	2.0	8.5	4.8	9.5	10.2	9.3	11.5	12.5	14.7	16.1	25.3	23.5	16.9	35.4	38.1	18.5	32.5

Cuadro 4.1 (continuación) Análisis fisicoquímicos del agua de pozo, agua nueva y agua lixiviada recirculada.

Parámetro (meq/litro)	12-May-09		19-mayo		26-May-09		02-jun		09-Jun-09		16-jun		30-jun		07-jul		14-jul		
	nue/fert	recirc	recirc	nue/fert	recirc	recirc	nue/fert	recirc	recirc	nue/fert	recirc	recirc	recirc	nue/fert	recirc	recirc	recirc	nue/fert	recirc
pH	6.89	5.93	5.65	3.7	5.8	5.63	5.98	5.9	5.63	4.7	5.54	4.77							
C.E. dS/cm	1.22	3.10	3.15	3.02	2.94	1.49	1.88	2.58	3.26	2.59	3.15	2.60							
Aniones																			
Bicarbonatos	1.005	0.36	0.2426	0	0	0.2443	0.5738	0.293	0.241	0.0303	0.1172	0.03754							
Carbonatos	0	0	0	0	0.47	0	0	0	0	0	0	0							
Sulfatos	3.917	11.3	11.875	12.73	9.8333	9.625	5.875	8.104	9.1667	8.5417	8.875	9.625							
Fosfatos	1.541	4.7	4.1313	5.566	3.5832	5.1978	3.8823	4.101	5.5845	3.5367	2.938	5.41899							
Cloruros	1.389	3.94	4.1127	3.38	3.6901	3.9718	3.2676	4.254	5.9437	4.6761	3.5493	2.37746							
N-NO3	1.324	2.39	2.5355	2.742	2.4194	2.9839	1.7742	2.597	2.7903	2.4194	3.3548	3.41935							
N-NO2	1E-03	0.02	0.0263	0.005	0.0217	0.0159	0.0005	0.022	0.0313	0.0126	0.0056	0.00289							
Suma	9.2	22.7	22.9	24.4	20.0	22.0	15.4	19.4	23.8	19.2	18.8	20.9							
Cationes																			
meq Ca++	4.832	9.72	11.529	9.859	8.838	10.435	6.3755	9.365	10.015	9.3158	19.486	12.35							
meq Mg++	1.496	4.76	5.5062	5.924	4.6354	4.9424	3.8198	4.672	6.9399	7.0774	9.1534	8.35391							
meq K+	3.1	9.65	9.8997	12.25	8.4189	8.2455	5.0997	7.37	0.0967	4.1648	4.2187	2.90946							
meq Na+	0.678	1.83	1.515	1.087	1.4239	1.4704	0.9704	1.498	1.5209	1.4924	1.9094	2.03174							
meq B+++	0.056	0.01	0.0139	0.014	0.0564	0.1378	0.0689	0.069	0.11	0.0967	0.0139	0.06917							
meq NH4+	0.617	1	1.3389	1.478	1.0444	1.1556	1.1222	1.367	1.9833	0.7611	0.2689	0.085							
Suma	10.8	27.0	29.8	30.6	24.4	26.4	17.5	24.3	20.7	22.9	35.1	25.8							

Cuadro 4.2 Análisis fisicoquímicos del agua residual tratada, agua nueva y agua lixiviada recirculada.

Parámetro (meq/litro)	13-feb		03-Mar-09		6-mar		17-Mar-09		24-mar		31-Mar-09		7-abril		14-Abr-09		21-abri		28-Abr-09	
	nueva	nue/fert	recirc	recirc	nue/fer	recirc	recirc	nue/fer	recirc	recirc	nue/fer	recirc	recirc	nue/fert	recirc	recirc	nue/fer	recirc	nue/fer	recirc
pH	7.81	4.13	6.91	7.01	4.24	6.77	6.57	4.13	6.86	6.6	5.95	6.17	6.22	4.92	5.97					
C.E. dS/cm	0.594	1.844	1.304	1.54	1.826	1.968	2.124	1.873	2.6	2.677	2.587	3.733	3.944	2.227	3.87					
Aniones																				
Bicarbonatos	1.2213	0	0.7705	0.6951	0	0.766	0.559	0	0.613	0.505	0.2016	0.4098	0.538	0.055	0.44					
Carbonatos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
Sulfatos	1.0417	8.75	6.3125	7.375	8.604	11.02	12.958	8.542	17.69	18.33	11.563	23.083	23.44	6.938	18.4					
Fosfatos																				
Cloruros	0.9859	0.028	0.0699	2.0958	1.451	2.761	2.9577	1.577	3.324	2.423	3.5211	6.9014	7.521	3.775	7.66					
N-NO3	0.3032	0.005	0.0069	0.8855	1.539	0.744	0.3855	1.326	0.606	0.587	0.0022	0.004	1.984	2.097	1.87					
N-NO2	0.0118							0.007	0.008		0.009	0.0886	0.1	0.018	0.07					
Suma	3.5639	8.783	7.1598	11.051	11.59	15.29	16.861	11.45	22.24	21.85	15.296	30.487	41.11	16.31	33.2					
Cationes																				
Ca	1.5809	4.66	2.419	1.931	4.431	3.38	4.856	4.692	5.94	6.906	7.3965	10.404	10.13	6.021	9.63					
Mg	0.8496	3.369	2.693	2.4823	2.654	3.244	3.8305	2.615	3.022	5.259	2.57	6.3835	6.942	3.203	6.81					
K	0.542	5.549	5.0072	1.1368	4.813	7.37	6.6079	6.872	7.284	8.366	8.8672	11.189	11.95	6.115	11.7					
Na	1.8192	8.512	0.9448	1.5826	2.003	2.945	4.4191	2.803	2.425	6.492	2.652	7.7899	7.969	3.223	7.74					
Boro	0.0483	0.101	0.1014	0.1303	0.145	0.13	0.1419	0.099	0.142	0.142	0.0425	0.0425	0.014	0.156	0.01					
N-NH4													0.683	0.95	0.87					
Suma	4.8	22.2	11.2	7.3	14.0	17.1	19.9	17.1	18.8	27.2	21.5	35.8	37.7	19.7	36.7					

Cuadro 4.2 (continuación) Análisis fisicoquímicos del agua residual tratada, agua nueva y agua lixiviada.

Parámetro	12-May-09	19-mayo	26-May-09	2-jun	09-Jun-09	16-jun	30-jun	7-jul	14-jul			
(meq/litro)	nue/fer	recirc	recirc	nue/fer	recirc	recirc	nue/fer	recirc	recirc			
pH	5.93	5.78	5.55	3.04	5.46	5.22	5.68	5.44	5.69	4.22	5.06	4.41
C.E. dS/cm	3.103	4.073	4250	3710	3933	3013	3587	2187	3733	3467	3727	3210
Aniones												
Bicarbonatos	1.021	0.361	0.27705	0	0.23	0.177	0.2623	0.2393	0.3492	0	0.059	0
Carbonatos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfatos	5.396	15.1	15.625	14.04	14	14.333	6.2708	11.458	10.625	10.73	10	9.8542
Fosfatos	2.394	7.239	6.76867	8.413	5.96	8.519	4.6453	7.4766	6.1775	6.035	6.591	6.4627
Cloruros	2.986	6.648	6.8169	4.958	6.37	6.0845	3.9718	6.9577	7.662	7.099	5.803	4.7606
N-NO3	2.135	3.198	3.29677	0.516	4.15	3	2.8226	3.2903	2.9355	2.484	3.516	3.7742
N-NO2	0.01	0.024	0.02035	0.01	0.01	0.009	0.0101	0.0215	0.0132	0.006	0.003	0.0024
Suma	13.94	32.57	32.8047	27.94	30.7	32.123	17.983	29.444	27.762	26.35	25.97	24.854
Cationes												
Ca	5.927	11.96	14.6041	9.451	12.9	14.364	7.4445	12.646	11.164	11.41	21.31	13.675
Mg	1.815	5.625	6.85564	5.681	6.34	6.4658	3.3646	6.2614	7.3681	7.551	8.545	7.5671
K	3.775	11.41	13.307	11.68	11.6	12.199	5.4276	10.771	8.8447	6.486	6.325	5.4146
Na	2.556	5.025	5.72609	2.361	4.74	4.3352	2.336	4.0952	4.0963	4.189	4.463	4.8691
Boro	0.056	0.014	0.01389	0.014	0.01	0.1789	0.0964	0.1378	0.1789	0.097	0.092	0.0831
N-NH4	0.794	1.439	1.87778	1.778	1.64	1.5944	1.2444	1.9056	1.6778	1.078	0.492	0.175
Suma	14.9	35.5	42.4	31.0	37.3	39.1	19.9	35.8	33.3	30.8	41.2	31.8

Cuadro 4.3 Análisis fisicoquímicos del agua residual tratada, sin recircular.

Parámetro	06-Mar-09	24-Mar-09	07-Abr-09	14-Abr-09	19-May-09	26-May-09	16-Jun-09	30-Jun-09	14-Jul-09
(meq/litro)									
pH	6.83	6.51	6.43	6.47	5.7	5.6	6.19	4.51	4.87
C.E. dS/cm	1.452	1.607	2.12	3.273	3.63	1.397	2.145	2.133	1.927
Aniones									
Bicarbonatos	0.638	1.402	0.425	0.544	0.323	0.231	0.505	0.048	0.089
Carbonatos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sulfatos	6.854	9.063	10.875	16.083	12.688	8.438	6.167	6.021	5.458
Fosfatos				6.513	4.472	5.399	1.973	4.284	3.487
Cloruros	1.538	1.944	2.423	6.535	5.662	4.535	4.535	3.972	2.096
N-NO3	0.653	0.506	0.716	2.355	3.116	2.145	1.758	1.742	2.290
N-NO2				0.121	0.047	0.031	0.051	0.029	0.022
Suma	9.7	12.9	14.4	32.2	26.3	20.8	15.0	16.1	13.4
Cationes									
Ca	2.617	4.0775	5.4928	8.8665	12.694	7.5525	5.522	7.297	7.6815
Mg	2.598	2.817	3.766	5.860	5.168	3.744	3.524	4.938	3.974
K	5.217	4.747	5.839	8.667	10.136	7.380	4.483	2.304	2.916
Na	1.914	3.704	4.361	6.617	3.993	2.948	3.138	2.973	3.033
Boro	0.130	0.128	0.113	0.099	0.014	0.124	0.055	0.138	0.083
N-NH4				0.794	1.417	0.972	1.139	0.717	0.136
Suma	12.5	15.5	19.6	30.9	33.4	22.7	17.9	18.4	17.8

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Volumen de agua aplicado

Los volúmenes de agua utilizados en cada uno de los tratamientos de una superficie individual de 42 m², fueron de 32.36 m³, 30.85 m³ y de 40.81 m³ de agua para los tratamientos de agua de pozo con el lixiviado recirculado, agua residual tratada con y sin el lixiviado reutilizado, respectivamente. Las láminas de riego acumuladas variaron desde 77 hasta 97.17 cm, observándose que para el caso del agua residual tratada, recirculando el lixiviado se tiene un ahorro de 23.7 cm. La variación de los volúmenes de agua aplicados en los tratamientos (32.36 a 30.85 m³) en que se reutilizó el agua lixiviada, se debió principalmente a la variación de las presiones de cada uno de los equipos de bombeo. El promedio de agua utilizada por el cultivo de jitomate en el período de 210 días fue de 963, 918 y 1214 ml/planta/día para los tratamientos de agua de pozo con el lixiviado reutilizado, agua residual tratada con y sin el lixiviado recirculado, respectivamente. En el cuadro 5.1 se presentan los volúmenes y láminas de riego de agua nueva y de agua reutilizada para cada tratamiento.

Cuadro 5.1 Volúmenes y láminas de riego utilizada y recirculada en el cultivo de jitomate tipo salades, en cada uno de los tratamientos utilizados.

Parámetro	Agua de pozo Recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada sin recircular el lixiviado	
	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Tirada
Volumen (m ³)	32.36	10.61	8.495	30.85	9.625	7.21	40.81	16.57
Lámina de riego acumulada (cm)	77.05			73.45			97.17	
Lámina diaria promedio aplicada (mm)	4.16			3.97			5.25	

5.2 Fertilizante aplicado

En los cuadros 5.2, 5.3 y 5.4 se presenta la cantidad y tipo de fertilizante comercial aplicado en cada uno de los períodos para cada uno de los tres tratamientos. Los principales fertilizantes aplicados fueron sulfato de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, solucat (10-10-40), ácido fosfórico y micronutrientes.

Cabe mencionar que al agua de pozo lixiviada recirculada se le adicionada solamente un 50 % de fertilizante de la dosis considerada para agua nueva. Sin embargo, para el agua residual tratada lixiviada recirculada no se le agregaba fertilizante.

Cuadro 5.2 Agua de pozo. Tipo y cantidad de fertilizante aplicado, con recirculación del agua lixiviada.

Fecha	Volumen de agua (litros)		Sulfato de Potasio (gr)	Nitrato de calcio (gr)	Solucat 10-10-40	Sulfato de Magnesio (gr)	Ácido fosfórico (ml)	Kelk mix
	Aplicado	Recirculado						
23-feb-03 marzo	1100		220	275		110	55	27.5
04-08 marzo	810		162	202.5		81	40.5	20.25
9-14 marzo		430	86	107.5		43	21.5	8.6
15-17 marzo	225		90	90		45	11.25	5.625
18-21 marzo	140	160	88	88		44	13.4	6.7
21-31 marzo	1240	250	546	546		273	72	36
01-19 abril	3700	690	809	2022.5	1618	809	212.6	106.3
20-29 abril	2540	450	553	1382.5	1106	553	145	72.5
30 abril-25 mayo	4840	2000	1168	2920	2336	1168	322	161
26 mayo-23 junio	5080	2270	1243	3107.5	2486	1243	345	172
24 - 30 junio	1290	500	308	770	616	308	85	42
01-28 julio	4685	1840	2803	2802.5		1121	308	154
29 julio- 04 sept.	5410	1370	1524	1829		610	325	163
05 - 23 sept.	1300	650						
	32360	10610	9599	16143	8162	6408	1956	976
(Kg)/ m3	32.36	10.61	9.599	16.143	8.162	6.408	1.956	0.976
Fertilizante comercial total (Kg)								43.243

Las cantidades de fertilizante comercial aplicado en cada uno de los tratamientos de una superficie individual de 42 m², fueron de 42.243 kg , 36.518 m³ y de 46.848 kg³ para los tratamientos de agua de pozo con el lixiviado recirculado, agua residual tratada con y sin el lixiviado reutilizado, respectivamente.

Cuadro 5.3. Agua Residual Tratada. Tipo y cantidad de fertilizante aplicado, con recirculación del agua lixiviada.

Fecha	Volumen de agua (litros)		Sulfato de Potasio (gr)	Nitrato de calcio (gr)	Solucat 10-10-40	Sulfato de Magnesio (gr)	Ácido fosfórico (ml)	Kelk mix (ml)	
	Aplicado	Recirculado							
23-feb-03 marzo	1100		220	275		110	55	27.5	
04-08 marzo	710		142	177.5		71	35.5	17.75	
9-14 marzo	130	430	26	32.5		13	23.7	11.85	
15-17 marzo	225	0	90	90		45	11.25	5.625	
18-22 marzo	510	100	204	204		102	29.5	14.75	
22-31 marzo	1010	230	404	404		202	59.7	29.85	
01-19 abril	3690	730	738	1845	1476	738	213.7	106.85	
20-29 abril	2550	500	510	1275	1020	510	147.5	73.75	
30 abril-25 mayo	4640	2000	928	2320	1856	928	312	156	
26 mayo-23 junio	4310	2290	862	2155	1724	862	307	154	
24 - 30 junio	1220	500	244	610	488	244	81	41	
01-28 julio	4860	2235	2430	2430		972	332	166	
29 julio- 04 sept.	5550	1750	1388	1665		555	348	174	
05 - 23 sept.	1620	860							
	32125	11625	8186	13483	6564	5352	1956	978	
(Kg)			8.186	13.483	6.564	5.352	1.956	0.978	
Fertilizante comercial total (Kg)									36.518

Cuadro 5.4. Agua Residual Tratada. Tipo y cantidad de fertilizante aplicado, sin recirculación del agua lixiviada.

Fecha	Volumen aplicado (litros)	Sulfato de Potasio (gr)	Nitrato de calcio (gr)	Solucat 10-10-40	Sulfato de Magnesio (gr)	Ácido fosfórico (ml)	Kelk mix
23-feb-03 marzo	1050	210	262.5		105	52.5	26.25
04-08 marzo	680	136	170		68	34	17
9-14 marzo	660	132	165		66	33	16.5
15-17 marzo	370	148	148		74	18.5	9.25
18-22 marzo	820	328	328		164	41	20.5
23-31 marzo	1350	540	540		270	67.5	33.75
01-19 abril	4440	888	2220	1776	888	222	111
20-29 abril	2860	572	1430	1144	572	143	71.5
30 abril-25 mayo	5430	1086	2715	2172	1086	271.5	135.75
26 mayo-23 junio	7360	1472	3680	2944	1472	368	184
24 - 30 junio	1870	374	935	748	374	93.5	46.75
01-28 julio	5955	2978	2977.5		1191	297.75	148.875
29 julio- 04 sept.	6670	1668	2001		667	333.5	166.75
05 - 23 sept.	2345						
Total	41860	10531	17572	8784	6997	1976	988
(Kg)		10.531	17.572	8.784	6.997	1.976	0.988
Fertilizante comercial total (Kg)							46.848

5.3 Cosecha

El cultivo de jitomate se plantó el 23 de febrero del 2009, y se realizó la primera cosecha el 30 de abril del mismo año. En total se realizaron 22 cortes, siendo la última cosecha el 25 de septiembre del 2009. Las fechas de corte, así como sus rendimientos se presentan en el cuadro 5.5, en donde se observa que la producción total para la superficie de 126 m² en un período de siete meses que comprende desde el transplante del cultivo hasta el último corte, fue un total de 2,366.3 kg., que extrapolados a una superficie de una hectárea le corresponde una producción de 187.8 toneladas de producto. El rendimiento fue mayor en el agua de pozo recirculada, con un valor de 807.2 kg; le siguió el agua residual tratada sin recircular con 795.8 kg; y el agua residual tratada con el lixiviado recirculado con 763.3 kg.

Cuadro 5.5. Número de cortes, fecha y rendimiento de jitomate, en Kg.

Cosecha	Fecha	Agua de pozo	ART-Recirculada	ART-sin recircular
1	30/04/2009	18.5	19.3	13.2
2	07/05/2009	42.5	47.6	44.3
3	11/05/2009	40.9	42.7	54.6
4	14/05/2009	35.6	35.3	32.1
5	19/05/2009	25.9	24.4	27.6
6	25/05/2009	10.8	11.9	16.5
7	04/06/2009	7.6	8.5	11.7
8	15/06/2009	7.6	7.7	9.6
9	23/06/2009	7.7	9.4	9.3
10	29/06/2009	14.2	17.6	15.8
11	07/07/2009	31.6	25.4	23.5
12	16/07/2009	30.9	24.7	45.4
13	23/07/2009	39.9	30.9	34.8
14	04/08/2009	33.2	33.5	37.5
15	11/08/2009	79.8	73.2	67.2
16	14/08/2009	24.6	23.3	30.3
17	18/08/2009	35.8	26.8	34.6
18	24/08/2009	53.1	50.7	76.8
19	31/08/2009	98.4	86.5	68.3
20	07/09/2009	63.4	79.6	67.4
21	15/09/2009	48.0	30.6	33.4
22	25/09/2009	57.7	54.0	42.4
		807.2	763.3	795.8

5.4 Productividad del agua

En el cuadro 5.6 se observa una productividad del agua que varía de 40.1 a 51.3 litros de agua requeridos para producir un kilogramo de jitomate, es decir, de 24.9 a 19.5 kg/m³, es decir, que para producir 24.9 kg de jitomate se requirió un volumen de agua de 1,000 litros, equivale a que para producir un kg de jitomate se requirió un volumen de agua de 40.1 litros. Con fines comparativos, Sánchez (2005) cita a World Water Resources Institute (2003), para producir 1 kg de naranja se requieren de 350 a 416 litros de agua, 1 huevo de 458 a 568 litros, 1 litro de leche de 500 a 3500 litros, y 1 kg de carne 26,500 litros de agua.

Cuadro 5.6. Volumen de agua, rendimiento, fertilizante y productividad del agua en el cultivo de jitomate.

Parámetro	Agua de pozo Recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada recirculando el lixiviado			Agua Residual Tratada sin recircular el lixiviado	
	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Recirculada	Tirada	Utilizada	Tirada
Volumen (m ³)	32.36	10.61	8.495	30.85	9.625	7.21	40.81	16.57
Rendimiento (kg)	807.2			763.3			795.8	
Productividad agua (lt/kg)	40.1			40.4			51.3	
Fertilizante aplicado (kg)	43.243			36.518			46.848	
Fertilizante, en ton, extrapolado a 1 ha.	10.3			8.7			11.15	

Con base en el cuadro 5.6 se observa que el rendimiento en los tres tratamiento fue muy similar, obviamente al recircular el agua de riego lixiviada se disminuye el volumen de agua utilizada, en este caso en alrededor de un 25 % de agua que se está en posibilidades de ahorrarse. Sin embargo, es notorio que dentro de la misma recirculación del agua de riego comparando el agua de pozo y el agua residual tratada, existe una diferencia significativa con respecto a la cantidad de fertilizante que se dejó de aplicar al utilizar el agua residual tratada, en este caso, extrapolado a la superficie de 1 ha le corresponden 1.6 ton de fertilizante comercial que se dejaría de aplicar simplemente porque se aprovechan los nutrientes que contiene esta última.

También se observa que al recircular el agua residual tratada se ahorrarían todavía mayor cantidad de fertilizantes, considerando que el agua lixiviada reutilizada no se le apliquen fertilizantes, en este caso nos da una diferencia de 2.45 ton/ha.

5.5 Manejo del sistema de riego con aguas residuales

El sistema de filtros utilizado fue de mallas de 120 mesh, mismo que resultó suficiente para impedir el paso de partículas que obstruyen el sistema de emisión del agua de riego. En general, las aguas residuales contienen más sólidos en suspensión que las aguas normales, por lo tanto, la frecuencia de limpieza de los filtros es mayor; por lo anterior, se recomienda emplear emisores de gasto grande, de 4 ó 8 litros por hora.

La eficiencia de uniformidad del riego promedio considerando las doce mesas que son abastecidas por tres equipos de bombeo fue del 93.1 %, a una presión de operación promedio de 1.7 kg/cm², el cual se debe principalmente, en este caso particular, a que la longitud de las líneas regantes son muy cortas y en consecuencia las presiones de riego son prácticamente las mismas en toda las líneas regantes y goteros, haciendo que el gasto de cada gotero sea prácticamente el mismo; a diferencia entre equipos de bombeo utilizados sí existen pequeñas diferencias en sus presiones y gastos de descarga. La conductividad eléctrica y el pH de la solución nutritiva se trabajó en promedio en el rango de 2.0 a 3.5 dS/m (decisiemen/m) y de 5.5 a 6.5 respectivamente. Con este rango de valores del pH se disminuyó el problema de precipitados de carbonatos de calcio y de magnesio en el sistema de riego.

VI. REFERENCIAS

1. Magan C. J.J., Romera P. M.P., Canovas M.F, y Fernández E.J. (1999). Ahorro de agua y nutrientes mediante un sistema de cultivo sin suelo con reuso del drenaje en tomate larga vida. Murcia, España.
2. Guzmán M. (2004). Recirculación de lixiviados: experiencias en Almería. España.
3. Sánchez C. I. 2005. Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. CENID-RASPA. INIFAP. Libro científico No. 2. Gómez Palacios, Dgo., México.
4. Zeydan O. 2005. Tomato production Under protected conditions. Ministry of Foreign Affairs the Center for International Cooperation. Israel.
5. Angeles et. Al. 2006. Reuso de aguas residuales tratadas en el cultivo de jitomate en invernaderos. III Seminario Internacional de Uso Integral del Agua. La Habana, Cuba.
6. Angeles et al. 2007. Recirculación del agua de riego en cultivo de jitomate en ambiente semicontrolado. XII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. Agosto de 2007. Zacatecas, Zacatecas.
7. C. Ramos. El uso de aguas residuales en riegos localizados y en cultivos hidropónicos. (sin año). Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias.
8. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 1998. Proyecto estudio conjunto IMTA-JICA 1995-1998 "Uso eficiente de aguas residuales con propósitos agrícolas".

Anexo 1. Volumen y productividad del agua en cuatro ciclos de cultivo con y sin recirculación del agua de riego lixiviada.

Resumen de la productividad del agua con y sin recirculación del agua de riego lixiviada, durante cuatro ciclos de cultivo.

Concepto	2005. Jitomate	2006. Jitomate	2007. Pimiento	2009. Jitomate
(superficie de 126 m ²)	Tezontle grueso	Tezontle Granul. gruesa	Tezontle Granul. fina	Fibra de coco
	Sin recirculación	Con recirculación	Con recirculación	Con recirculación
Volumen de agua (m ³)	155	92.2	61.5	94.81
Producción (Kg)	2128	2381	1493	2366.3
Rendimiento (ton/ha)	177	198	124.5	187.8
Productividad agua (l/kg)	73	38.7	43.2	40.1
Lámina de riego acum. (cm)	129.2	76.8	51.2	75.2
Lámina diaria promedio (mm)	7.5	4.3	2.85	3.6

Anexo 2. Ejemplo de recirculación del lixiviado del agua de riego, considerando una sola recirculación y dos recirculaciones del respectivo lixiviado:

Variable	Unidad	Cantidad
Capacidad del tanque de riego	l	2000
Capacidad del tanque de captación	l	5000
Capacidad del tanque de mezclado	l	5000
Número de plantas en el invernadero	plantas	3000
Requerimiento de riego por planta por día	l	1
Requerimiento de riego por día en el invernadero	l	3000
Porcentaje de drenado en las camas	%	25
Porcentaje de agua recirculada en tinaco de mezclado	%	50
Porcentaje de agua nueva en tinaco de mezclado	%	50

Una recirculación del agua lixiviada: cuadro 1.

Con un 25 % del agua de riego drenada, con una recirculación

Volumen irrigado (m3):	90.0
Volumen agua utilizada (m3):	75.0
Volumen agua drenada recirculada (m3):	15.0
Volumen de agua ahorrada (%)	20

Dos recirculaciones del agua lixiviada: cuadro 2.

Con un 25 % del agua de riego drenada, con DOS recirculaciones.

Volumen irrigado (m3):	90.0
Volumen agua utilizada (m3):	72.0
Volumen agua drenada recirculada (m3):	18.0
Volumen de agua ahorrada (%)	25.0

Para un porcentaje de lixiviado (drenaje) del 25 %, con una primera recirculación del agua de riego lixiviada es suficiente puesto que se ahorra un 20 % del agua, con una segunda recirculación solamente se ahorra un 5 % adicional, para llegar al 25 %, sin embargo, las desventajas en cuanto a su operación y manejo, y calidad del agua son muy significativas, por lo que se recomienda una sola recirculación del agua lixiviada.

Cuadro 1. Una recirculación del agua lixiviada.

Día	Vol. Aplicado	Vol. Aplicado acum.	Vol. Drenado	Tanque de captación acum.	Vol. Tirado	Volumen recirculado	Volumen para diluir	Tanque de mezclado	Vol. Aplicado	Vol. Aplicado acum. Mezcla
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(10)
		0	0	0						
1	3000	3000	750	750	0	0	0	0	0	0
2	3000	6000	750	1500	0	0	0	0	0	0
3	3000	9000	750	2250	0	0	0	0	0	0
4	3000	12000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	0
5	0	12000	750	750	0	0	0	3000	3000	3000
6	0	12000	750	1500	1500	0	0	3000	3000	6000
				0						
7	3000	15000	750	750	0	0	0		0	6000
8	3000	18000	750	1500	0	0	0	0	0	6000
9	3000	21000	750	2250	0	0	0	0	0	6000
10	3000	24000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	6000
11	0	24000	750	750	0	0	0	3000	3000	9000
12	0	24000	750	1500	1500	0	0	0	3000	12000
				0						
13	3000	27000	750	750	0	0	0		0	12000
14	3000	30000	750	1500	0	0	0	0	0	12000
15	3000	33000	750	2250	0	0	0	0	0	12000
16	3000	36000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	12000
17	0	36000	750	750	0	0	0	3000	3000	15000
18	0	36000	750	1500	1500	0	0	0	3000	18000
				0						
19	3000	39000	750	750	0	0	0		0	18000
20	3000	42000	750	1500	0	0	0	0	0	18000
21	3000	45000	750	2250	0	0	0	0	0	18000
22	3000	48000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	18000
23	0	48000	750	750	0	0	0	3000	3000	21000
24	0	48000	750	1500	1500	0	0	0	3000	24000
				0						
25	3000	51000	750	750	0	0	0		0	24000
26	3000	54000	750	1500	0	0	0	0	0	24000
27	3000	57000	750	2250	0	0	0	0	0	24000
28	3000	60000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	24000
29	0	60000	750	750	0	0	0	3000	3000	27000
30	0	60000	750	1500	1500	0	0	0	3000	30000
Total		60000			7500	15000	15000			

Cuadro 2. Dos recirculaciones del agua lixiviada

Día	Vol. Aplicado	Vol. Aplicado acum.	Vol. Drenado	Tanque de captación acum.	Vol. Tirado	Volumen recirculado	Volumen para diluir	Tanque de mezclado	Vol. Aplicado	Vol. Aplicado acum. Mezcla
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(10)
		0	0	0						
1	3000	3000	750	750	0	0	0	0	0	0
2	3000	6000	750	1500	0	0	0	0	0	0
3	3000	9000	750	2250	0	0	0	0	0	0
4	3000	12000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	0
5	0	12000	750	750	0	0	0	3000	3000	3000
6	0	12000	750	1500	0	0	0	0	3000	6000
7	3000	15000	750	2250	0	0	0	0	0	6000
8	3000	18000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	6000
9	0	18000	750	750	0	0	0	3000	3000	9000
10	0	18000	750	1500	1500	0	0	0	3000	12000
				0						12000
11	3000	21000	750	750	0	0	0	0	0	12000
12	3000	24000	750	1500	0	0	0	0	0	12000
13	3000	27000	750	2250	0	0	0	0	0	12000
14	3000	30000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	12000
15	0	30000	750	750	0	0	0	3000	3000	15000
16	0	30000	750	1500	0	0	0	0	3000	18000
17	3000	33000	750	2250	0	0	0	0	0	18000
18	3000	36000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	18000
19	0	36000	750	750	0	0	0	3000	3000	21000
20	0	36000	750	1500	1500	0	0	0	3000	24000
										24000
21	3000	39000	750	750	0	0	0	0	0	24000
22	3000	42000	750	1500	0	0	0	0	0	24000
23	3000	45000	750	2250	0	0	0	0	0	24000
24	3000	48000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	24000
25	0	48000	750	750	0	0	0	3000	3000	27000
26	0	48000	750	1500	0	0	0	0	3000	30000
27	3000	51000	750	2250	0	0	0	0	0	30000
28	3000	54000	750	3000	0	3000	3000	6000	0	30000
29	0	54000	750	750	0	0	0	3000	3000	33000
30	0	54000	750	1500	1500	0	0	0	3000	36000
Total		54000			4500	18000	18000			