

La salinidad en cultivos sobre sustratos

C. Sonneveld, Sonneveld37@Zonnet.nl, Tolhuislaan 35, 3862 WK Nijkerk, Países Bajos, y Miguel Urrestarazu, mgavilan@ual.es, Universidad de Almería

Introducción

Los efectos de la salinidad en cultivos sobre sustratos son similares a los producidos en cultivos sobre suelo. La diferencia radica en el volumen de enraizamiento. Mientras que estos últimos utilizan un volumen de 250 L m⁻², los cultivos sobre sustratos requieren sólo de 10 a 15 L m⁻². Significa eso que antes de aparecer los niveles perjudiciales, las raíces de los cultivos sobre sustratos acumulan menos cantidad de sal que la de los cultivos sobre suelo; además, son más flexibles y reaccionan inmediatamente a medidas aplicadas para prevenir daños causados por la salinidad.

Este artículo analiza los siguientes temas relacionados con salinidad en cultivos sobre sustratos:

- Modelo de respuesta del cultivo a la salinidad
- Acumulación de sales en el sustrato donde crecen las raíces
- Niveles de salinidad requeridos y aceptables
- Fertilización en relación a la salinidad
- Requisitos de lixiviación y producción sostenible
- Sobre el efecto de otros factores importantes para el manejo de la salinidad, se presentará sólo una breve revisión de los últimos estudios

1. Modelo de respuesta del cultivo a la salinidad

La relación entre salinidad y producción de cultivos sobre suelo se evalúa generalmente a través del modelo de Maas y Hoffman (**Figura 1A**). Se utiliza este modelo porque el nivel de nutrientes en el suelo es bajo y no contribuye en forma representativa al potencial osmótico, medido por la conductividad eléctrica (CE). Por el contrario, en cultivos bajo invernadero, la CE de la solución del suelo es afectada fundamentalmente por la adición de nutrientes de la planta. Este es el caso de las plantas producidas en pequeños volúmenes de enraizamiento, tal como sucede en los cultivos sobre sustratos. Bajo estas condiciones, los niveles de nutrientes de las plantas deben ser incorporados para calcular los niveles de salinidad, así como se muestra en la **Figura 1B**. El modelo allí propuesto de líneas discontinuas para valorar la relación existente entre la CE de la solución del suelo y el rendimiento de los cultivos, podría sustituirse por un modelo exponencial, que representaría mejor la respuesta de la planta a la salinidad. Eso quedó demostrado en una reciente investigación que incluyó al crisantemo entre los cultivos de invernadero estudiados (**Figura 2**). En ese modelo, el nivel de fertilización se incorpora a la CE de la solución de sustrato, ya que un nivel demasiado alto aumenta el nivel de la CE de la solución del suelo y reduce el crecimiento de los cultivos, tal como sucede con la acumulación de sales residuales.

La anterior situación sucede cuando las plantas no son sensibles a una sal en particular; sin embargo, cuando lo son a un ion específico, el rendimiento se reduce

en un porcentaje mayor que cuando hay disminución del potencial osmótico (aumento de la CE). Estos efectos son bien conocidos cuando la salinidad es causada por el NaCl, pero raramente se presentan en cultivos de invernadero. La sensibilidad específica puede ser causada, en este caso, por los iones Na y Cl, que actúan en conjunto o separadamente, siendo necesario realizar estudios adicionales para descubrir cuál de ellos es el responsable. Aparentemente el ion Na es más frecuente que el ion Cl. Dentro de los efectos causados por una salinidad específica, sólo aquellos debidos a iones osmóticos serán analizados. Por lo tanto, la toxicidad de micronutrientes no se incluye en este documento.

Los modelos propuestos hasta ahora se centran en la relación entre salinidad y rendimiento, expresada como el crecimiento de la planta. Otros efectos de la salinidad, como sería la calidad, tienen su propia trayectoria. Las respuestas de calidad, por ejemplo, no siempre están relacionadas con valores bajos de la CE del suelo y la solución de sustrato.

2. Acumulación de sales en la rizosfera

Es una acumulación que depende de varios factores, entre los cuáles sobresalen los siguientes:

- La composición iónica del agua de riego, que puede contener concentraciones altas de sales residuales, como Na, Cl, SO₄, etc.
- Las características propias de los cultivos, pues entre ellos existe diferencias en la absorción iónica, no sólo para nutrientes sino también para sales residuales como Na y Cl.
- El valor de los diferentes iones en la solución del suelo. La mayoría de los cultivos absorben cantidades grandes de ciertos iones cuando sus concentraciones alrededor de la raíz son más altas. Eso no sucede si la concentración de todos los iones se incrementa en proporciones iguales. Algunos cultivos pueden excluir algunos iones residuales en forma efectiva, como es el caso del pimiento con el Na.
- Las condiciones climáticas. El consumo de agua por el cultivo está fuertemente estimulado por las condiciones de un clima cálido y seco; no sucede lo mismo con la absorción de iones. Todo eso promueve la acumulación de sal alrededor de la raíz.

La acumulación excesiva de sales reduce el rendimiento del cultivo y debe ser evitada al máximo. Sin embargo, hacerlo sólo es posible si las concentraciones de los iones en el agua primaria están por debajo de su nivel de absorción, y la adición de nutrientes se lleva a cabo bajo un pleno control. Por lo tanto, los cultivos y el agua de riego sólo aceptan una cierta acumulación de sales. Esto es especialmente cierto para iones como Na, Cl y SO₄, abundantes en ciertas clases de agua de riego. La Tabla 1 muestra las concentraciones de absorción de algunos elementos principales en cultivos de tomate y rosas. Las diferencias entre ambos cultivos son considerables. Por ejemplo, la concentración de la captación del tomate es mucho mayor que la de las rosas. De otro lado, la incorporación de Na por las rosas es casi nula, lo que significa que casi todo se acumula en la rizosfera de dicho cultivo.

La acumulación de iones diferentes en la rizosfera se ven fuertemente afectados por la fracción de lixiviación, la cual puede ser calculada por la siguiente fórmula:

$$FL = \frac{C_{w(x)} + C_{f(x)} - C_{u(x)}}{C_{d(x)} - C_{u(x)}}$$

FL = fracción de lixiviación

C_w (x) = concentración de un ion x en el agua de riego

C_f (x) = concentración de un ion x en el agua de riego después de la adición de fertilizantes

C_u (x) = concentración de aborción de un ion x

C_d (x) = concentración de un ion x aceptable en el agua de drenaje

x = cada ion tomado en cuenta

Todas las concentraciones se expresan en mmol L⁻¹. La concentración en el agua de riego es un valor dado y será determinado por el análisis del agua. La concentración provocada por la adición de fertilizantes está definida por las impurezas de los fertilizantes utilizados. La captación por el cultivo es un valor dado en el caso de los iones de nutrientes, pero depende de la concentración aceptada por la raíz cuando una sal residual está a la vista. La concentración en el agua de drenaje está determinada por factores relacionados con las condiciones de crecimiento y debe ser considerada por el productor.

3. Niveles de salinidad requeridos y aceptables

Anteriormente los niveles altos de CE, equivalentes a concentraciones elevadas de sales, eran considerados como aspectos negativos para el desarrollo de las plantas. En la industria de los invernaderos, sin embargo, estos se requieren para una condición óptima de la planta y una mejor calidad de sus frutos. Sus efectos son evidentes en condiciones de poca luz, pero aún en alta intensidad luminosa, el crecimiento de la planta es notable. Dichas condiciones se presentan gracias a la temperatura alta y la humedad presentes y al suministro permanente de agua.

Los valores de CE superiores a los requeridos para absorber nutrientes suelen producirse no sólo debido al suministro extra de nutrientes sino también por la acumulación de sales residuales. Si las plantas no son sensibles a ciertos iones, los valores serán los mismos en ambos casos. Eso es particularmente cierto cuando la solución externa suministra la cantidad suficiente de nutrientes al cultivo. Los valores de CE requeridos para ese suministro dependen de las cosechas realizadas y las condiciones de crecimiento, y suelen estar cerca de los 1,5 dS m⁻¹ para varios cultivos. En la tabla 3 se muestran los valores óptimos de CE para diferentes cultivos, tal como se ha comprobado en un experimento realizado con sustratos de crecimiento.

Cuando los valores de CE son mayores a los óptimos mostrados en la tabla anterior, disminuyen tanto el crecimiento como el rendimiento de los cultivos. La reducción del rendimiento se expresa en porcentajes sobre el rendimiento máximo y es diferente para todos los cultivos. En algunos se han encontrado reducciones de un 5-10% por cada valor de CE de la solución de sustrato que se encuentre por encima del valor umbral de salinidad. En el ejemplo de la Figura 2, el máximo rendimiento del crisantemo se obtuvo a una CE de 2,25 dS m⁻¹ y este disminuyó en un 72% por cada

valor de CE de $5,8 \text{ dS m}^{-1}$, lo que significa una reducción de rendimiento del 28% sobre un aumento de la CE de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$, de acuerdo a un 8% por unidad de CE. Sin embargo, se acepta una reducción en el rendimiento de algunos cultivos para lograr una mejora en la condición de la planta y la calidad de sus frutos.

4. Fertilización en relación a la salinidad

Cuando el valor de CE requerido por el cultivo es superior al que necesita para asegurar un suministro óptimo de nutrientes, la diferencia entre ambos valores puede ser cubierta por nutrientes o la acumulación de sales residuales. Un buen ejemplo es la producción de tomate. El nivel de nutrientes necesario para la planta absorba correctamente los nutrientes es de $1,5\text{-}2,0 \text{ dS m}^{-1}$. Los valores de CE que precisa la condición óptima de una planta y la calidad de su fruto, están entre 4 y 8. El valor de 8 se presenta en plantas jóvenes bajo condiciones de poca luz y el valor de 4 se produce con alta radiación y en presencia de sus frutos (plena fructificación).

La tabla 4 muestra un ejemplo para el cultivo del tomate, cuando el valor de CE se mantiene en 5 dS m^{-1} . En este caso, la estrategia implementada está fuertemente influenciada por la calidad del agua de riego. Cuando se utiliza el agua de lluvia, la CE se completa con la adición de cantidades extras de nutrientes, con excepción de NH_4 y P. Así pues, los valores altos de CE en la solución suministrada se mantienen hasta alcanzar el nivel requerido en el entorno radical. Cuando se emplea el agua de drenaje, las concentraciones son suministradas en una cantidad similar a las concentraciones de absorción con el fin de mantener dicho nivel.

Cuando se dispone de agua salina subterránea, como se muestra en el segundo ejemplo de la Tabla 4, la lixiviación es necesaria. En ese caso, los valores mínimos necesarios para nutrirse la planta se encuentran alrededor de la raíz, siendo estos de 4 K, 5 N, 3,5 Mg y 0,5 P (concentraciones expresadas en mmol L^{-1}) en la solución de sustrato. El otro espacio de la composición iónica de la CE se utiliza para acumular sales residuales. Para evitar valores de CE superiores a 5 alrededor de la raíz (Rizosfera), se requiere aproximadamente el 20% de la fracción de lixiviación. En este caso, la composición se muestra en la última columna de la tabla 4. Muchos de los iones están fuera del intervalo óptimo de las concentraciones deseadas, sin embargo, son valores que constituyen las mejores opciones para los problemas surgidos por el uso de agua salina subterránea. Previendo un control insuficiente de los niveles bajos de los nutrientes, son recomendables el muestreo frecuente y el análisis de la solución alrededor de la raíz. El suministro de K y N se encuentra por debajo de la concentración de absorción, porque con el agua extra también se están proveyendo nutrientes. La concentración de nutrientes en el agua de drenaje será baja sin llegar a cero. En esas condiciones no es posible la prevención completa de la lixiviación de nutrientes ni el lavado de sales residuales. Una oferta demasiado baja de Mg no es recomendable debido al nivel elevado del calcio en el agua de riego y a la fuerte competencia con la absorción de Mg. El cultivo de tomate es sensible a la deficiencia de Mg. El suministro de P es bajo, pero no demasiado, al considerar que parte del P queda precipitado en formas de sales en la rizosfera.

El ejemplo anterior demuestra que el agua salina de riego puede ser usada con un drenaje limitado de residuos. Sin embargo, cuando los valores bajos de CE son requeridos alrededor de la raíz, el agua salina apenas ofrece posibilidades de una

producción sostenible. Para cultivos con un valor umbral de salinidad de 1,5 y una disminución en la producción de salinidad cercana al 7%, puede esperarse que a valores de CE cercanos a 5, la reducción del crecimiento sea del 25%. Eso sucede generalmente en cultivos sensibles a la sal, dentro de los invernaderos.

La distribución de la sal alrededor de la rizosfera podría representar un riesgo cuando utiliza agua de riego salina. En estos casos, es bastante grande la diferencia de concentraciones de sal en el fluido fertirriego en comparación al drenaje. Se ha encontrado que las plantas reaccionan mucho mejor en la zona de baja concentración salina, como las inmediaciones de las entradas del gotero de fertirriego, que en puntos de alta concentración salina, como los agujeros del drenaje. Los efectos de una distribución de salinidad tan desigual sólo se han estudiado para algunas hortalizas. Se requieren más investigaciones para conocer, por un lado, un sistema que interprete adecuadamente la distribución desigual alrededor de la raíz y, por el otro, los requisitos de los sistemas de acumulación de sal para restringir al máximo el daño de la salinidad.

5. Requisitos de lixiviación y producción sostenible

La producción de los invernaderos durante las últimas décadas ha variado de un mercado de suministro a un mercado de consumo. Ya no ofrece lo que no está disponible; ahora el campo produce lo que se demanda, pero más barato y de mejor calidad. Muchos productos de invernadero suelen ser considerados como lujos relacionados a ciertos estándares de vida. Son productos que reúnen altas normas de calidad, para el gusto y la apariencia, y que buscan ser obtenidos a través de sistemas de producción respetuosos con el medio ambiente. Se considera una industria: la industria de los invernaderos. Esta está cambiando a métodos de producción sostenible y uno de los principales factores en este proceso es la restricción de minerales que salen al medio ambiente. La calidad del agua de riego, la posibilidad de reutilización de las aguas de drenaje y las exigencias del cultivo, determinan el volumen aproximado de minerales que se terminan sin control en el medio ambiente. La demanda de los cultivos es importante para determinar la absorción de minerales y los valores aceptables de la CE. La reutilización de las aguas de drenaje está estrechamente relacionada con la proporción de sales disueltas considerando cada ión individualmente, y en su conjunto (presión osmótica), debido a que una distribución desigual del agua de riego en la mayoría de sistemas de crecimiento fomenta una sobredosis, y como consecuencia, un flujo de drenaje independiente de la calidad del agua de riego. Una producción sostenible, consecuentemente, debe incluir la reutilización de aguas de drenaje, cuya captura es posible en los sistemas de sustrato. De acuerdo a lo anterior se concluye que la producción sostenible de los invernaderos es factible sólo cuando se emplee agua de riego de la máxima calidad, en combinación con sistemas en los que el agua de drenaje se pueda reutilizar.

Las siguientes combinaciones deberían ser consideradas en todo sistema de producción sostenible:

1. Emplear el agua de riego, con una concentración salina por debajo de la correspondiente a la absorción del cultivo, en la denominada concentración

de absorción, en un sistema en el cual el agua de drenaje se reutilice. Es una práctica que evita la filtración de minerales al medio ambiente.

2. Desalinizar el agua de riego a concentraciones de sal por debajo de la correspondiente a la absorción del cultivo.
3. Restringir el uso del agua en los invernaderos. El mejor ejemplo de este concepto es el invernadero cerrado. Es un sistema en el cual el aire se enfría artificialmente y una parte importante del agua evaporada es condensada y puede ser reutilizada. Esta condensación de agua es libre de sales y añadiéndola al agua primaria tendrá una concentración salina muy baja.
4. Usar agua de salinidad leve o una acumulación restringida de sal, ocasiona cierta reducción del rendimiento. Esta se refiere al rendimiento total. Mientras que es previsible un aumento de la calidad de la misma, es decir, mayor presencia de sustancias organolépticas, en cultivos aprovechables por sus frutos, o bien presencias en esencias o aceites en cultivo que se explotan por sus aromas (perfumes o culinarias). A través de un buen manejo en el fertirriego, la eliminación de los residuos contaminantes puede ser limitada a menos del 20%, con lo cual supone un incremento sustancial de la eficiencia de los nutrientes; a la vez que se produce un ahorro de agua de un 10% hasta un 50%.
5. Utilizar agua salina induce a la acumulación de sales alrededor de la raíz, una reducción del rendimiento y un drenaje superior al 50%. La producción sostenible es objeto de debate, aunque sigue siendo válido el punto 4 sobre su efecto en la calidad de la producción.

En todos los modelos considerados, es necesario el diseño de un plan para el manejo correcto de los nutrientes, que se ajuste a los cultivos, las condiciones de crecimiento y la calidad de agua. Durante la etapa de crecimiento de los cultivos, el manejo debe centrarse en la gestión y el control de los nutrientes alrededor de la raíz:

- Emplear soluciones nutritivas adaptadas a los cultivos y al agua de riego que se utiliza, cálculo técnico de la
- Realizar análisis periódicos de la solución nutritiva o sustrato alrededor de la raíz. Un laboratorio profesional debe encargarse de ello
- Calcular frecuentemente los valores de pH y CE alrededor de la raíz, usando instrumentos portátiles disponibles en el vivero.
- Ajustar adecuadamente la solución nutritiva añadida

La producción en invernaderos, sin ningún tipo de contaminación ambiental, es posible en los casos 1-3. Es factible también en la situación 4, si se realiza una gestión adecuada de nutrientes y agua. Definitivamente no se puede hacer en la situación 5. Sin embargo, la contaminación ambiental puede restringirse cuando se mantiene un buen equilibrio entre la fertilización, la acumulación de sal y la lixiviación.

Estudios adicionales: Referencias bibliográficas

Este documento ofrece directrices generales sobre sustratos de crecimiento y salinidad. Algunas publicaciones recientes han ampliado el tema así como las referencias de consulta, que no se incluyen en el presente texto.

Sonneveld C 2000. Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Thesis Wageningen University, Netherlands, 151 pp. (<http://www.gcw.nl/dissertations/2765/dis2765.pdf>).

Sonneveld C Van den Bos A L y Voogt W 2004, Modelling osmotic salinity effects on yield characteristics of substrate grown greenhouse crops. *J. Plant Nutrition* 27, 1931-1951.

García, M. y Urrestarazu, M. 2000, Modelling electrical conductivity management in a recirculating nutrient solution under semi-arid conditions. *J. Plant Nutrition* 23, 457-468.

Sonneveld C. 2004. Salinidad en los cultivos sin suelo. En: Tratado de cultivo sin suelo. Coord. Miguel Urrestarazu. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Sonneveld C y Voogt W 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer, Dordrecht Heidelberg London New York, 431 pp. Especialmente en los capítulos 6, 7 y 8.

- c_u = Valor umbral de salinidad en la rizosfera sin que exista una reducción de producción
- c_m = Valor máximo de la concentración salina por encima de la cual la producción es cero
- VDP = Valor de la disminución relativa de la producción
- c_c = Concentración crítica, o concentración mínima de nutrición mineral necesaria para el óptimo de crecimiento

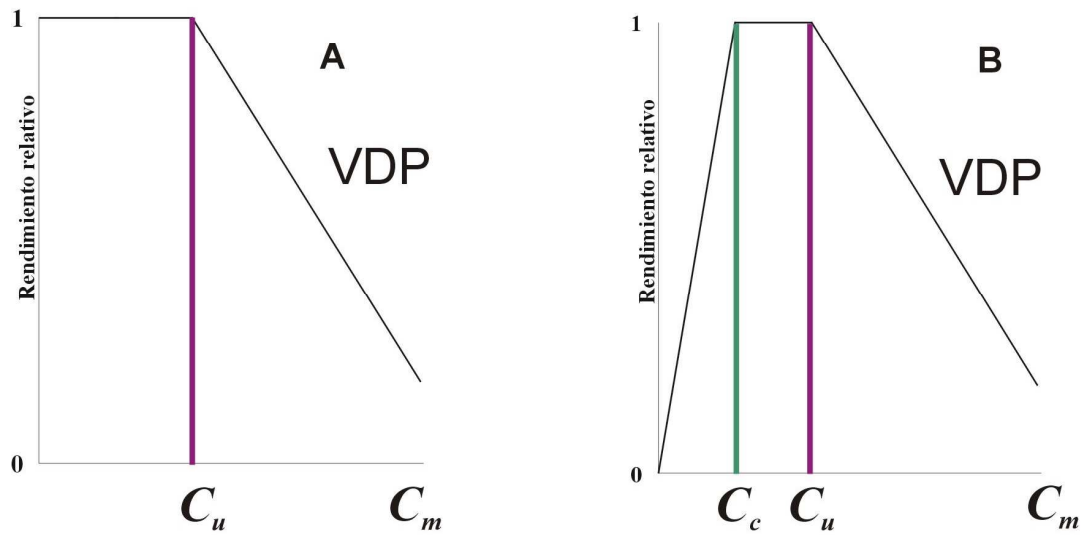


Figura 1. Relación entre el valor de la CE en la rizosfera y la producción según los modelos de Maas y Hoffman (1997) (A) y Sonneveld (2004) (B)

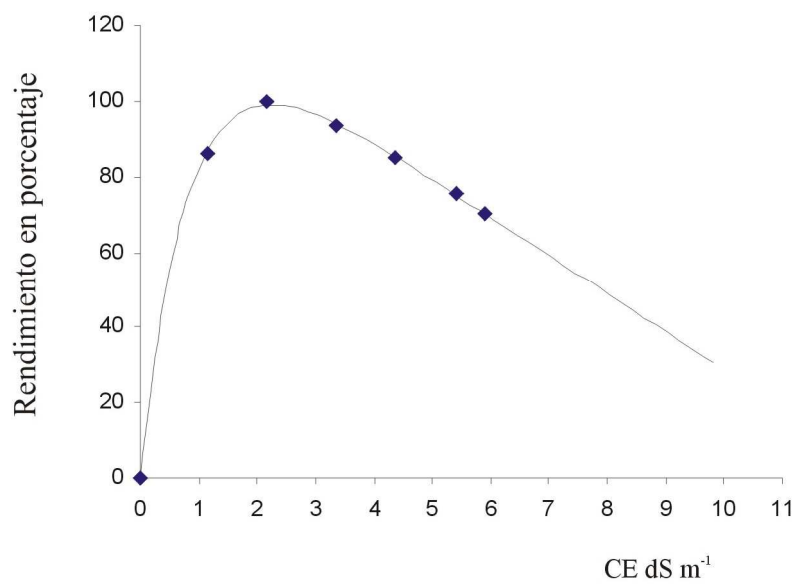


Figura 2. Relación entre la CE de la solución de sustrato y la producción de crisantemos (peso de la planta).

Tabla 1. Concentraciones de absorción para tomate y rosas tal como se han observado durante un período largo de crecimiento bajo condiciones de invernadero en los Países Bajos. Las concentraciones se expresan en mmol L^{-1} de agua absorbida por el cultivo. Los valores de Cl y Na se dan para un grado de salinidad leve en la solución externa de 10 mmol L^{-1}

Elementos	Tomate	Rosa
N	9,6	5,2
P	1,1	0,4
S	1,2	0,4
Cl	1,0	0,2
K	6,1	1,9
Ca	2,2	0,9
Mg	0,9	0,3
Na	0,8	0,0
Σ Cationes	14,1	6,6
Σ Aniones ⁻	13,1	4,3

Tabla 2. Fracciones de lixiviación calculadas con la fórmula 1, basadas en la concentración de Na en el agua de riego y los datos presentados en la Tabla 1. Además $C_d(\text{Na}) = 10$ y $C_f(\text{Na}) = 0.2$. $C_u(\text{Na}) = 0,8$ y $0,0$ para el tomate y rosa, respectivamente.

Cultivo	mmol L^{-1} de Na en el agua de riego	
	2	5
Tomate	0,15	0,48
Rosa	0,22	0,52

Tabla 3. Valores de CE, tal como se han encontrado en la producción óptima de sustratos de algunos cultivos y bajo diferentes condiciones (Países Bajos)

Cultivo	Valores óptimos de CE	Ciclo de cultivo
Rábano	1,7-2,6	abr-jul
Rábano	4,5-4,8	dic-feb
Crisantemo	2,2	ago-nov
Colirrábano	2,3	feb-abr
Freesia ¹	2,4	oct-abr
Lechuga	2,6-2,8	jun-nov
Aster ²	0,6-1,6	dic-jul
Hippeastrum ³	0,5	feb-oct
Lirio	0,5-1,1	feb-jun

¹ para producción de flores; ² Monte Casino; ³ para producción de bulbos.

Tabla 4. Composición iónica de la solución nutritiva final suministrada (SN, fertirriego) y la resultante en la rizosfera (ES), en un cultivo de tomate sembrado en tablas de lana de roca con el uso de agua de lluvia (AL) y agua de pozo (algo salina, AP), se estableció un uso o reutilización de fertirriego drenado con una fracción de lixiviación de 0,20. En el sustrato se mantuvo un valor de 5 dS m⁻¹ en su equivalente de extracto saturado. Todas las concentraciones de iones se dan en mmol L⁻¹

Parámetro	Con agua de lluvia			Con agua de Pozo		
	AL ¹	SN ²	ES ³	AL ¹	SN ²	ES ³
EC dS m ⁻¹	0,1	1,6	5	1,5	2,5	5
NH ₄		1	<0,5		1	<0,5
K		6,5	10	0,5	5,5	4
Ca		2,75	12,5	4	4	8
Mg		1	5,6	0,5	1,75	3,5
Na	0,6	0,6	0,5	7	7	20
NO ₃		10,75	29		7,5	5
SO ₄		1,5	8,5	5,5	5,5	14
P		1,25	1		1	0,5
Cl	0,6	0,6	0,5	5,5	5,5	15

¹ composición del agua de riego utilizada;

² resultante en la solución nutritiva (fertirriego) suministrado a los cultivos después de adicionar los iones nutritivos provenientes de fertilizantes;

³ valores medios mantenidos en las tablas de lana de roca.