

EFECTOS DEL ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO, SOMBREADO DE LA CUBIERTA Y NEBULIZACIÓN EN LOS CULTIVOS PROTEGIDOS

Influencia de la **gestión del clima** en **invernadero** sobre la absorción hídrica y mineral de los cultivos

En este artículo se muestran los resultados experimentales obtenidos en diversos trabajos de investigación desarrollados en el Centro IFAPA La Mojonera (Almería) relacionados con la influencia de la aplicación de distintas técnicas de gestión de clima en invernadero sobre la absorción hídrica y mineral en cultivos hortícolas.

Evangelina Medrano,
M^a Cruz Sánchez-Guerrero, M^a Luisa García,
Francisco J. Alonso y Pilar Lorenzo.

Área de producción Agraria. IFAPA Centro La Mojonera. Almería.



La estrategia de enriquecimiento carbónico aplicada no afectó al consumo hídrico y éste fue condicionado por la intensidad de la radiación solar incidente

La actuación sobre el clima en el interior del invernadero influirá en mayor o menor medida en el consumo hídrico de la planta en función de la dependencia de dicho consumo con el parámetro climático modificado en cuestión. Los factores que principalmente afectan al consumo hídrico son la radiación, el déficit hídrico del aire y el desarrollo foliar del cultivo. Puede ocurrir que la actuación influya sobre los tres factores anteriormente citados con diferente intensidad o bien incluso que la influencia sobre uno de ellos sea contrarrestada por la influencia sobre otro. El estado hídrico de la planta se relaciona con el ba-

lance entre los flujos de transpiración y de absorción de agua. Si bien el flujo de transpiración está directamente relacionado con el clima, la absorción de agua está condicionada además por otros factores como la disponibilidad y composición de la solución nutritiva y el nivel de aireación y temperatura del entorno radical.

En cuanto a la absorción de nutrientes, es interesante mencionar los tres tipos de mecanismo de transporte de los iones a través de la membrana radical (Taiz y Zeiger, 1998):

1. Difusión simple, donde los iones atraviesan la membrana desde regiones con alta concentración iónica a regiones de baja concentración.
2. Difusión facilitada, desde regiones de alta a regiones de baja concentración, mediante transportadores específicos que son básicamente proteínas formando un complejo soluble por la capa lipídica, por lo que la tasa de difusión facilitada es mayor que la de difusión simple.

3. Transporte activo a través de la membrana en contra del gradiente de concentración, el cual necesita una fuente de energía externa.

El movimiento de los iones desde el exterior de las raíces hasta el xilema es altamente sensible a los cambios de temperatura de la raíz, a la concentración de oxígeno en la solución nutritiva, a inhibidores metabólicos, a la luz y a la disponibilidad de carbohidratos.

Se puede establecer que la absorción de nutrientes es un proceso autónomo que no está únicamente relacionado con la absorción de agua, siendo estos dos mecanismos fisiológicamente distintos e independientes el uno del otro. La tasa de absorción de nutrientes está determinada por la demanda de la planta, que a su vez dependerá de su tasa de crecimiento y del propio contenido nutricional de la solución nutritiva. Las actuaciones sobre el clima que impliquen una modificación en la tasa de crecimiento del cultivo y en su distribución de asimilados influirán a su vez en la absorción mineral (Gielsing, 2001; Roca, 2009). La radiación solar, al ser la energía que determina el crecimiento de la planta, es determinante de la absorción mineral. Así mismo, la temperatura de la zona radical tiene efecto sobre la absorción. Dicha temperatura depende del medio de cultivo donde se desarrolle la planta (suelo/sustrato) así, debido a que los sustratos tienen menos inercia térmica que el suelo, en invernaderos sin calefacción la temperatura mínima del entorno radical es menor en el sustrato

que en el suelo. En el caso de utilizar calefacción, cuando se trata de generadores de aire dichas temperaturas se igualan y si se utilizan tuberías radiantes de agua caliente dispuestas en torno al sustrato la temperatura mínima de éste es mayor que la del suelo (Lorenzo y col., 1997).

Las relaciones entre la absorción hídrica y la nutricional se establecen desde el punto de vista de la disponibilidad de los nutrientes en el entorno de las raíces. La cantidad de nutrientes incorporados a la superficie radical de la planta depende de la tasa de transpiración y de la concentración en la solución aportada. Cuando la concentración iónica es baja la transpiración no afecta a la disponibilidad de nutrientes, sin embargo a las concentraciones con las que normalmente se trabaja en cultivos en invernadero, la transpiración puede afectar dicha disponibilidad. Por tanto, cualquier factor climático que influya sobre la transpiración también repercutirá en el suministro de nutrientes a la raíz. Si bien la concentración de absorción de un elemento (mmol l^{-1}) no tiene sentido desde un punto de vista fisiológico, su determinación puede orientar en la formulación de las soluciones nutritivas, según el tipo de cultivo y los factores climáticos (Sonneveld, 2000). Normalmente, con elevados niveles de radiación la absorción de agua prevalece a la de nutrientes, siendo una práctica habitual, en la zona mediterránea, reducir la concentración de la solución nutritiva en las horas de máxima radiación.

Enriquecimiento carbónico

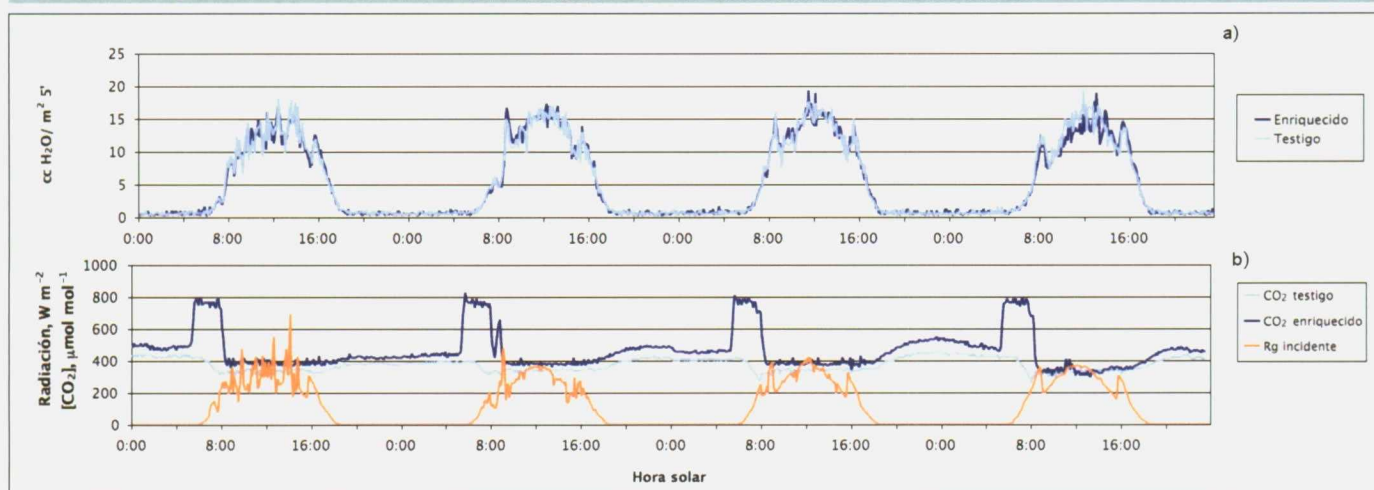
El aumento de la concentración de CO_2 del aire provoca un cierre parcial de los estomas que reduce la transpiración foliar. Cuando se realiza el enriquecimiento carbónico asociado a la ventilación (Sánchez-Guerrero y col., 2005) en invernaderos de clima cálido, los valores máximos de concentración de CO_2 se alcanzan a primera hora del día y a última hora coincidiendo con una baja intensidad de radiación solar por lo que su efecto sobre la transpiración es menor.

En la **figura 1a** se presenta la transpiración de plantas de pimiento registrada, de forma simultánea, cada 5 minutos en un invernadero enriquecido ($800 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$ con ventanas cerradas; $400 \mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$ con ventanas abiertas) frente a un invernadero no enriquecido. En la **figura 1b** se muestra la diferente evolución de la concentración de CO_2 en los invernaderos con una misma radiación incidente. Como se puede observar la estrategia de enriquecimiento aplicada no afectó al consumo hídrico y éste fue condicionado por la intensidad de la radiación solar incidente. El consumo total al final del ciclo fue similar en ambos invernaderos con valores de 295 l m^{-2} en el cultivo no enriquecido y 291 l m^{-2} en el enriquecido.

El aumento de la concentración de CO_2 promueve el crecimiento de la planta y por lo tanto una mayor demanda de nutrientes. En cultivo de

FIGURA 1.

a) Evolución de la transpiración de un cultivo de pimiento registrada cada cinco minutos simultáneamente en un invernadero enriquecido con CO_2 y en otro no enriquecido. b) Evolución de la concentración de CO_2 en ambos invernaderos y la radiación solar incidente sobre los cultivos.



pimiento se han detectado incrementos en la absorción de entre el 6 y el 8% (**cuadro I**) unido a una mayor eficiencia del uso de los nutrientes en relación a la producción de fruto. En cultivo de pepino se obtuvieron mayores extracciones de N, K, Ca y Mg al aumentar la concentración de CO₂, mientras que el contenido de nutrientes en porcentaje de materia seca total fue similar.

Cuando el cultivo se desarrolla en sustrato, la mayor absorción de nutrientes promovida por el aumento de la concentración de CO₂ induce una menor concentración de los nutrientes en la solución lixiviada y por tanto una menor conductividad eléctrica (CE). Normalmente la gestión del riego en un cultivo en sustrato está asociada a mantener un valor de CE consigna en la solución lixiviada, por tanto cuando se aplique enriquecimiento carbónico las necesidades de lixiviación serán menores.

En un cultivo de pepino enriquecido frente a un cultivo testigo se realizó un menor aporte de agua en el cultivo enriquecido frente al testigo para consumos hídricos similares. El ahorro de agua en dicho cultivo alcanzó valores de 55 l m⁻² (**cuadro II**) y, al igual que sucedía en un cultivo de pimiento, donde los consumos hídricos fueron ligeramente inferiores en el cultivo enriquecido con CO₂.

Refrigeración

Entre las posibles actuaciones para reducir la temperatura del invernadero se encuentran el aporte de vapor de agua mediante sistemas de nebulización y la reducción de la radiación mediante sombreado.

Sistemas de nebulización

Con los sistemas de nebulización el aumento del vapor de agua en el aire reduce el déficit de presión de vapor (DPV) que incide directamente en la transpiración, provocando su reducción en mayor o menor intensidad dependiendo del cultivo. Para condiciones similares de radiación y DPV, Lorenzo y col. (2006) obtuvieron valores superiores de la transpiración foliar en tomate que en pepino, lo cual implica que una reducción del DPV del invernadero de 2 a 1 kPa,

CUADRO I.

Absorción de nutrientes de pimiento por planta y ciclo en un cultivo enriquecido con CO₂ frente a otro no enriquecido. Eficiencia de la absorción de nutrientes (EUN) en relación con la producción de fruto.

		Testigo	Enriquecido	%
Absorción nutrientes (mmol pl ⁻¹ ciclo ⁻¹)	N	1.271	1.355	6,6
	K	727	767	5,5
	Ca	395	428	8,4
EUN Producción (g mmol ⁻¹)	N	2,61	2,89	5,11
	K	4,59	9,16	10,7
	Ca	8,41	11,3	8,9

CUADRO II.

Volumen de agua aportada y consumida en un cultivo de pepino durante dos ciclos de otoño (Rull, 2005; Sánchez-Guerrero y col., 2009).

	Pepino 97/98		Pepino 98/99	
	Aporte de agua (l m ⁻²)	Consumo de agua (l m ⁻²)	Aporte de agua (l m ⁻²)	Consumo de agua (l m ⁻²)
Testigo	239	153	307	213
Enriquecido	202	147	252	189

debida a la nebulización, provocará una reducción en la transpiración foliar de la planta de tomate mayor que en la de pepino, tal y como queda reflejado en la **figura 2**.

Sombreado de la cubierta

Cuando se utiliza el sombreado de la cubierta como método de refrigeración se actúa princi-

palmente sobre el nivel de radiación que incide sobre el cultivo, pero la reducción resultante de la temperatura afecta al DPV del invernadero ya que, para una misma concentración de vapor de agua en el aire, el déficit de presión de vapor disminuye a medida que se reduce su temperatura. En la **figura 3a** se presenta la evolución durante dos días consecutivos de los parámetros climáticos registrados en un invernadero sin sombreado y en otro provisto de una malla móvil colocada en el exterior de la cubierta, en este caso el sombreado se activaba cuando la temperatura del invernadero era superior a 27°C. La acción del sombreado reduce la radiación incidente sobre el cultivo hasta valores en torno a 300 Wm⁻² y el DPV se reduce de 3 a 2 kPa. La acción intermitente de la malla de sombreado provoca una recuperación total de la radiación cuando ésta se recoge pero el DPV no llega a alcanzar los valores que se registran en el testigo, por lo que el consumo hídrico del

cultivo sombreado es menor que en el testigo incluso en las fases en que la malla se encuentra recogida (**figura 3b**). La reducción del consumo hídrico semanal superó los 10 l m⁻², con un cómputo total del ciclo de 345 l m⁻² en el cultivo sin sombreado frente a 240 l m⁻² en el sombreado.

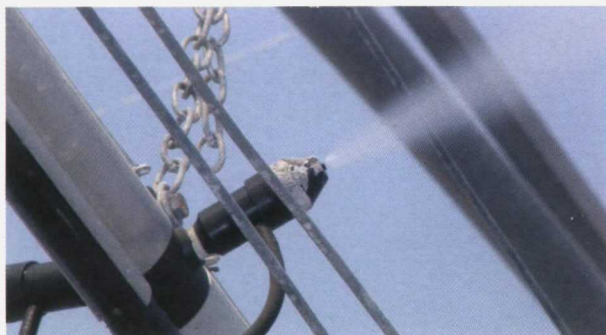
Absorción de nutrientes en cada sistema

La comparación entre la absorción de nutrientes en un cultivo de tomate con la aplicación de nebulización y sombreado (**cuadro III**) muestra el mayor condicionamiento que sobre este proceso ejerce la intensidad de radiación incidente frente al nivel de humedad en que se desarrolla el cultivo, ya que en el invernadero sombreado donde hubo menor intensidad de radiación también la absorción fue menor. En este caso la producción de fruto total fue mayor en el cultivo con nebulización, si bien la producción comercial fue similar en ambos invernaderos debido a la mayor incidencia de necrosis apical en el cultivo con nebulización. Esta fisiopatía se relaciona con el contenido de Ca en el fruto, cuya movilidad está limitada al xilema y por tanto con gran dependencia de la transpiración del cultivo. La intensidad de radiación incidente en el cultivo con nebulización favorece una mayor tasa de cre-

CUADRO III.

Absorción total de nutrientes por planta y ciclo de cultivo de tomate cv. Boludo. Eficiencia del uso de los nutrientes en relación a la producción de fruto (Medrano y col., 2005).

	Absorción nutrientes (mmol planta ⁻¹ ciclo ⁻¹)	
	Sombreado	Nebulización
N	1.405	1.759
K	1.155	1.207
Ca	554	661
Mg	197	247
Na	338	813
Cl	532	1.043
Eficiencia uso nutrientes (kg mol ⁻¹)	1,82	1,34



Boquilla utilizada en los sistemas de nebulización.



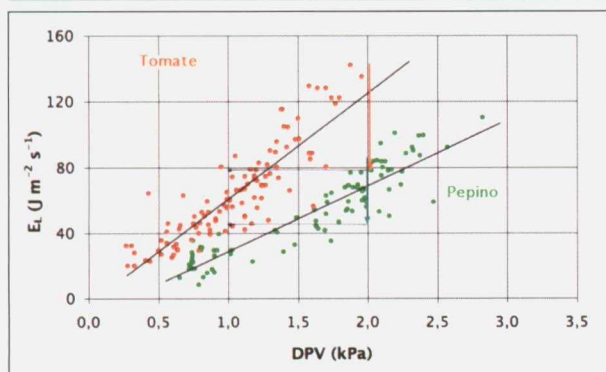
Sistema de distribución de CO₂ puro.

cimiento y como consecuencia una mayor demanda de nutrientes, mientras que la disponibilidad de Ca en el fruto puede verse limitada en este caso por su transporte mayoritario hacia los órganos con mayor capacidad de transpiración como son las hojas.

Los valores medios obtenidos de la concentración de absorción (mmol l^{-1}) de cada macronutriente en un cultivo de tomate (**figura 4**), pueden servir de referencia para la formulación de la solución nutritiva, especialmente cuando se trabaja en sustratos inertes como son la lana de roca y la perlita.

FIGURA 2.

Relación entre la transpiración foliar (E_L , en términos de energía) y el déficit de presión de vapor (DPV) del aire del invernadero en tomate y pepino.



MAYOR RESISTENCIA

Salud Interior, Belleza Exterior

YaraLiva™ Calcinit es una fuente de Nitrato de Calcio Superior Soluble que mantiene la fruta y la verdura fresca durante más tiempo.

Mejorando la estructura celular, no sólo se alarga la vida postcosecha, sino que también se consigue mayor resistencia y firmeza del fruto, mayor crecimiento de las raíces y un cultivo de mejor calidad en general.

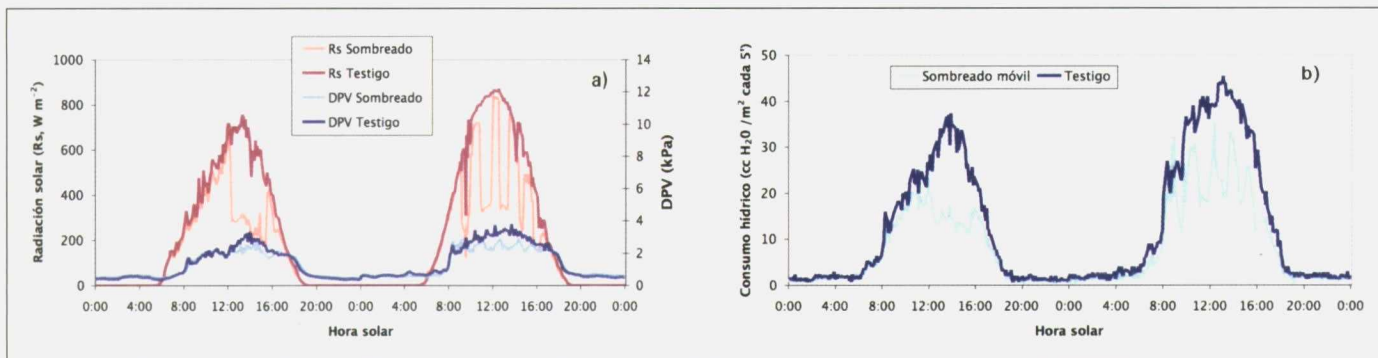
El aumento de la calidad del cultivo hará aumentar la rentabilidad.



YaraLiva™ Calcinit

FIGURA 3.

Evolución de: a) los parámetros climáticos radiación y DPV y b) el consumo hídrico registrado simultáneamente cada cinco minutos, en un invernadero sin sombreado frente a otro provisto de malla móvil en el exterior de la cubierta. Cultivo de pepino en campaña de primavera.



Ahora bien, la relación entre la concentración del nutriente en la solución nutritiva aportada y la concentración en la que es absorbido mostró su variación con el desarrollo del cultivo y con cada nutriente. En la primera fase del ciclo de cultivo los nutrientes fueron absorbidos a una concentración mayor que la aportada con la solución nutritiva y en mayor medida en el cultivo con mayor intensidad de radiación incidente como es el refrigerado mediante nebulización. Una vez transcurrida la primera fase de desarrollo, el NO₃ y el Ca fueron absorbidos a la mitad de la concentración en que eran aportados mientras que el K se mantuvo próximo al dicho valor.

Conclusiones

Las interrelaciones que se establecen entre las actuaciones sobre el clima en el que se desarrolla la planta y la absorción hídrica y mineral son muy diversas.

Las técnicas de sombreado (blanqueo de la cubierta, utilización de mallas interior/exterior), cuya finalidad última es la reducción de la temperatura en el invernadero, provocan una disminución de la radiación incidente sobre el dosel vegetal y reducen el déficit hídrico lo cual incide sobre la absorción hídrica y mineral.

Los sistemas de nebulización reducen la

temperatura y el déficit hídrico del invernadero limitando a su vez el consumo de agua.

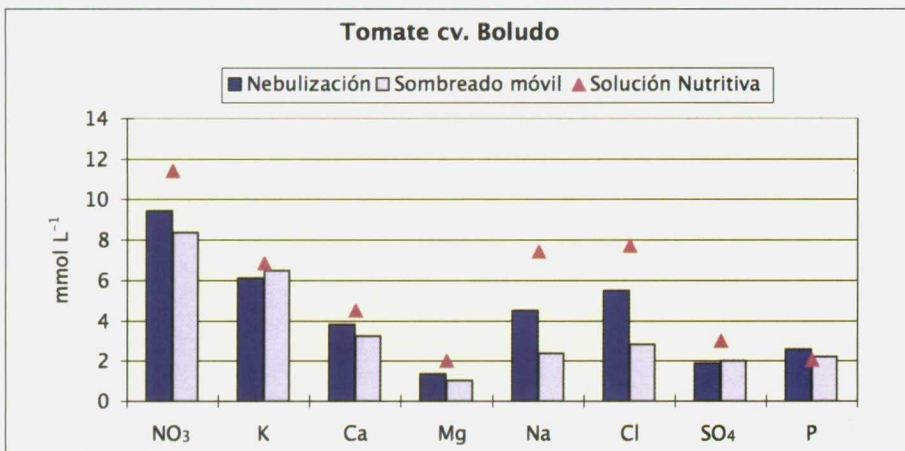
El enriquecimiento carbónico del aire provoca un aumento de la tasa de fotosíntesis que influye directamente sobre la absorción mineral, así mismo el aumento de la concentración de CO₂ reduce el intercambio de vapor de agua a nivel estomático, si bien su efecto sobre la transpiración del cultivo es limitado. ●

Agradecimientos

La información recogida en este texto ha sido financiada por el INIA, los fondos FEDER, Programa INCO-MED UE y el Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera y Alimentaria (IFAPA).

FIGURA 4.

Concentración de absorción media de cada uno de los nutrientes en un cultivo de tomate con nebulización frente a un cultivo con sombreado móvil. Los triángulos representan la correspondiente concentración media en la solución nutritiva de riego.



Bibliografía ▼

- Gieling, Th.H. 2001. Control of water supply and specific nutrient application in closed growing systems. Ph.D. Dissertation, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands. 178pp.
- Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Escobar, I. y García, M. 1997. Evaluación de la incorporación de sistemas de calefacción en la horticultura intensiva bajo cubierta de plástico en el sur mediterráneo. Actas de Horticultura 17:371-378.
- Lorenzo, P., García, M.L., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Caparrós, I. and Giménez, M. 2006. Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. Acta Horticulturae 719:471-478.
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., García, M.L., Caparrós, I., Coelho, G. and Giménez, M. 2005. Water and Nutrient Use Efficiency of a Tomato Crop as Affected by two Refrigeration Methods: External Mobile Shading and Fog System. Acta Horticulturae 697:463-467.
- Roca, M.D. 2009. Absorción de nitrato en cultivo sin suelo. Estudio de las implicaciones agronómicas y fisiológicas como base para optimizar el manejo de la fertilización. Aplicación a un cultivo de rosas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 267pp.
- Rull, S. 2005. Influencia del enriquecimiento carbónico sobre la bioproductividad, la eficiencia hídrica y la absorción de nutrientes de un cultivo de pepino en sustrato. Proyecto fin de carrera. Escuela Politécnica Superior. UAL. pp 90.
- Sánchez-Guerrero, M.C., Lorenzo, P., Medrano, E., Castilla, N., Soriano, T. and Baile, A. 2005. Effect of variable CO₂ enrichment on greenhouse production in mild winter climate. Agricultural and Forest Meteorology 132:244-252.
- Sánchez-Guerrero, M.C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Baile, A.; Castilla, N. 2009. Synergistic effects of EC-based irrigation scheduling and CO₂ enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop. Agricultural Water Management 96: 429-436.
- Sonneveld, C. 2000. Effect of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. Ph.D Thesis, Agricultural University, Wageningen. 151pp.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 1998. Plant Physiology, 2nd edition, Sinaur Associates, Inc., Massachusetts.