Universidad
Politécnica
de Cartagena

PROGRAMACIÓN DE LA FERTIRRIGACIÓN EN CULTIVOS
SIN SUELO EN EL SUDESTE ESPAÑOL. ESTUDIO DE LA
NUTRICIÓN CÁLCICA

Antonio L. Alarcón Vera

2017

Tesis dirigida por

Dr. Gregorio García Fernández

Dr. Ramón Madrid Vicente

Universidad
Politécnica
de Cartagena

PROGRAMMING OF FERTIGATION IN SOILLESS CROPS IN
SPANISH SOUTHEAST. STUDY OF CALCIUM NUTRITION

Antonio L. Alarcón Vera

2017

Thesis directed by

Ph.D. Gregorio García Fernández

Ph.D. Ramón Madrid Vicente

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO DE
TESIS DOCTORAL POR EL DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D/D^a. Gregorio García Fernández, Director/a de la Tesis doctoral “Programación de la fertirrigación en cultivos sin suelo del sudeste español. Estudio de la nutrición cálcica”.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por D. Antonio Luis Alarcón Vera, dentro del Programa de Doctorado TAIDA, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☒ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☐ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 04 de septiembre de 2017

EL DIRECTOR DE LA TESIS

Fdo.: Dr. Gregorio García Fernández

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL
POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA

D. Francisco Artés Hernández, Presidente de la Comisión Académica del Programa TAIDA.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada, "Programación de la fertirrigación en cultivos sin suelo del sudeste español. Estudio de la nutrición cálcica", ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D. Antonio Luis Alarcón Vera, bajo la dirección y supervisión del Dr. Gregorio García Fernández.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- ☒ Ciencias
- ☐ Ciencias Sociales y Jurídicas
- ☐ Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 11 de septiembre de 2017

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

Firmado digitalmente por
FRANCISCO DE ASIS|ARTES|
HERNANDEZ
Fecha: 2017.09.11 18:33:21
+02'00'

Fdo: Dr. Francisco Artés Hernández

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Agradecimientos

A todo aquel que en algún momento me animó con buena intención a terminar y presentar este documento...

Resumen

El presente trabajo se estructura en dos bloques diferenciados. En el primero de ellos, se estudia la nutrición hídrica y mineral de los cultivos sin suelo del sureste español, para poder desarrollar una aplicación informática que permita la gestión y programación de la fertirrigación de los cultivos sin suelo o hidropónicos.

Para ello se efectúa una caracterización físico - química del comportamiento de los fertilizantes más difundidos en los procesos de fertirrigación tecnificada, se modela el consumo hídrico y la gestión del riego de los diferentes cultivos implicados bajo diferentes escenarios y calidades de agua de riego y se estudian las diferentes interacciones entre los componentes iónicos de las soluciones nutritivas aplicadas a los cultivos sin suelo.

Con esa información y multitud de datos obtenidos de ensayos de campo, se desarrolla una aplicación informática para la gestión y programación de los cultivos sin suelo más extendidos (tomate, pepino, melón, pimiento, otros), en diferentes sustratos (lana de roca, perlita, fibra de coco, medio líquido, etc.), con o sin recirculación de lixiviados y bajo diferentes climas y casuísticas. Este programa permite, mediante análisis químicos periódicos, la gestión del riego y el abonado de los cultivos sin suelo para su programación en los actuales equipos automáticos de fertirrigación. Esto incluye la solución nutritiva a aplicar, la dosis riego, la cantidad y tipo de fertilizante a poner en cada tanque, el ratio de inyección en cada uno de los tanques de solución concentrada, las cantidades necesarias a aportar de ácido para el obtener el pH necesario, la CE final a programar, el porcentaje de drenaje a fijar, etc.

Dado que el calcio como macronutriente tiene un comportamiento distinto al resto, que genera controversia entre los agricultores, y que sus necesidades, aportes y efectos, escapan incluso de la gestión efectuada por el programa, ya que dependen de multitud de factores de índole climática, genética y fisiológica, se decide profundizar más en su estudio.

Para ello se elige el melón como cultivo típicamente de exportación, donde la nutrición cálcica tiene una enorme repercusión sobre la calidad final que llega al consumidor, y se estudian los niveles de calcio aportado, diferentes materiales de aporte incluyendo nuevos productos como quelatos de calcio, interacciones con otros iones, distribución en las diferentes partes de planta y fruto y las formas químicas bajo las que se encuentra, etc.

En este sentido se constata que concentraciones de calcio de menos de 3 mM en la solución nutritiva, que representan una captación diaria neta de calcio de menos de 1 mM por planta a lo largo del ciclo de cultivo, son insuficientes y provocan síntomas de deficiencia en hojas y frutos. En hojas maduras predomina la fracción de Ca insoluble inorgánico, el Ca ligado es la forma minoritaria. En hojas jóvenes el Ca soluble suele ser la forma mayoritaria, mientras que el Ca insoluble orgánico es la minoritaria. Hay aproximadamente 10 veces más Ca total en hojas maduras que en jóvenes. Los niveles de calcio en las distintas fracciones de la planta siguen el orden siguiente: Hojas (Lámina > Pecíolos) > Zarcillos > Raíz > Ápices de crecimiento > Tallos > Flores > Frutos (Corteza > Pulpa > Jugo). Los tratamientos con Ca-EDTA presentan valores muy

inferiores al resto y ni tan siquiera son capaces de producir fruta. No parece adecuado el uso de correctores comerciales de deficiencia cálcica a base de Ca-EDTA, ya que esta forma presenta una enorme estabilidad y dificulta la absorción y transporte del Ca en el interior de la planta.

Abstrac

The present work is structured in two distinct blocks. In the first one, we study the water and mineral nutrition of soilless crops in the southeast of Spain, in order to develop a computer application that allows the management and programming of the fertigation of soilless crops or hydroponics.

For this, a physical - chemical characterization of the behavior of the most widespread fertilizers in the processes of technified fertigation is carried out, the water consumption and the irrigation management of the different crops involved under different scenarios and irrigation water qualities are modeled and studied the different interactions between the ionic components of nutrient solutions applied to soilless crops.

With this information and multitude of data obtained from field trials, a computer application is developed for the management and programming of the most widespread soilless crops (tomato, cucumber, melon, pepper, others), in different substrates (rockwool, perlite, coconut fiber, liquid medium, etc.), with or without recirculation of drainages and under different climates and casuistics. This program allows, through periodic chemical analysis, the management of irrigation and the fertilization of the soilless crops for its programming in the current automatic equipment of fertigation. This includes the nutrient solution to be applied, the irrigation dose, the amount and type of fertilizer to be put in each tank, the injection ratio in each of the concentrated solution tanks, the quantities necessary to provide acid to obtain the ideal pH, the final EC to be programmed, the percentage of drainage to be set, etc.

Given that calcium as a macronutrient has a different behavior from the rest, which generates controversy among farmers, and that their needs, supplies and effects, even escape the management carried out by the program, since they depend on a multitude of factors of climatic, genetic or physiological nature, it is decided to go deeper into its study.

For this, melon is chosen as a typical export crop, where calcium nutrition has an enormous impact on the final quality that reaches the consumer, and are studied the levels of calcium supplied, different input materials including new products such as calcium chelates, interactions with other ions, distribution in the different parts of plant and fruit and the chemical forms under which it is found, etc.

In this sense, calcium concentrations of less than 3 mM in the nutrient solution, representing a daily net calcium uptake of less than 1 mM per plant throughout the growing cycle, are found to be insufficient and cause symptoms of deficiency in leaves and fruits. In mature leaves predominates the inorganic insoluble Ca fraction, the Ca bound is the minority form. In young leaves the soluble Ca is usually the majority form, while the organic insoluble Ca is the minority. There are approximately 10 times more Ca total in mature leaves than in young ones. The calcium levels in the different fractions of the plant follow the following order: Leaves (Leaf > Petioles) > Tendrils > Root > Growth apices > Stems > Flowers > Fruits (Bark > Pulp > Juice). The treatments with Ca-EDTA present values much inferior to the rest and are not even able to

produce fruit. It does not seem appropriate to use commercial correctors of calcium deficiency based on Ca-EDTA, since this form presents an enormous stability and makes difficult the absorption and transport of the Ca inside the plant.

A Esther y Néstor

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN A LOS CULTIVOS SIN SUELO.	1
1.1.1. CONCEPTO DE HIDROPONÍA Y CULTIVO SIN SUELO. ANTECEDENTES.	1
1.1.2. CLASIFICACIÓN Y PANORÁMICA DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO HIDROPÓNICO.	2
1.1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLANTACIÓN DEL CULTIVO HIDROPÓNICO EN NUESTRA ZONA.	3
1.1.4. CULTIVOS HORTÍCOLAS BAJO HIDROPONÍA MÁS EXTENDIDOS EN EL SURESTE ESPAÑOL.	4
1.1.5. SUSTRATOS: CONCEPTO, CLASIFICACIÓN Y CONSIDERACIONES GENERALES.	4
1.1.6. CULTIVOS SIN SUELO FRENTE AL TRADICIONAL CULTIVO EN SUELO.	5
1.1.7. EL AGUA DE RIEGO EN CULTIVO HIDROPÓNICO.	7
1.1.8. NUTRICIÓN HÍDRICA EN CULTIVO HIDROPÓNICO.	8
1.1.9. NUTRICIÓN MINERAL EN CULTIVO HIDROPÓNICO.	9
1.2. INTRODUCCIÓN AL CULTIVO DE MELÓN.	10
1.2.1. ORIGEN Y SITUACIÓN DEL CULTIVO.	10
1.2.2. CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS.	11
1.2.3. IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL CULTIVO.	14
1.2.4. CULTIVO DEL MELÓN.	17
1.2.5. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL MELÓN.	19
1.2.6. CULTIVO SIN SUELO DEL MELÓN.	21
1.3. EL CALCIO COMO NUTRIENTE ESENCIAL.	23
1.3.1. DINÁMICA DEL CALCIO EN EL SUELO.	23

1.3.2. EL CALCIO EN EL AGUA DE RIEGO.	24
1.3.3. ABSORCIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DEL CALCIO EN LA PLANTA.	25
1.3.4. FUNCIONES DEL CALCIO EN LA PLANTA.	28
1.3.5. DESÓRDENES RELACIONADOS CON UNA DEFICIENCIA DE CALCIO.	31
1.3.6. FORMAS DEL CALCIO.	39
2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO	42
2.1. OBJETIVOS.	42
2.2. PLAN DE TRABAJO.	42
2.2.1. FASE I: Elaboración del software para la gestión de la fertirrigación en cultivos sin suelo.	42
2.2.2. FASE II: Estudio de la nutrición cálcica.	42
2.3. PLANNING DE TRABAJO.	43
3. PARTE EXPERIMENTAL	44
3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ENSAYOS PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA.	44
3.1.1. FUNDAMENTOS Y OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA.	45
3.1.1.1. Fundamentos teóricos de la CE.	45
3.1.1.2. Concepto de pH e importancia en fertirrigación.	50
3.1.1.3. Acidificación de soluciones nutritivas en fertirrigación.	54
3.1.1.4. Modificaciones de la conductividad eléctrica en fertirrigación.	60
3.1.1.5. Abonado y salinidad en fertirrigación.	70
3.1.1.6. Otras consideraciones respecto a la caracterización de los fertilizantes para fertirrigación.	81
3.1.2. ENSAYOS DE CAMPO.	89

3.1.2.1. Hydric and Nutrient Element Nutrition of a Tomato Crop on rockwool: Ionic Interrelationships.	89
3.1.2.2. Nutrición hídrica y mineral en el cultivo de pepino (cv. Alaska) sobre lana de roca. Interrelación iónica.	102
3.1.2.3. Consumos de agua y nutrientes de dos cultivos de melón Galia sobre lana de roca con diferente calidad de agua de riego.	112
3.1.2.4. Consumos hídricos en cultivos hortícolas sin suelo bajo invernadero.	119
3.2. DISEÑO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA.	125
3.2.1. DESCRIPCIÓN Y MODO DE FUNCIONAMIENTO.	125
3.2.1.1. Datos del cultivo.	125
3.2.1.2. Disolución nutritiva inicial o de partida.	127
3.2.1.3. Cálculo de las disoluciones nutritivas sucesivas a lo largo del ciclo de cultivo.	129
3.2.1.4. Funcionamiento interno del software.	131
3.2.2. ALGORITMOS QUE COMPONEN LA APLICACIÓN INFORMÁTICA Y SU TOMA DE DECISIONES.	137
3.2.2.1. Designación parámetros iniciales.	137
3.2.2.2. Designación de los parámetros de referencia y del análisis de drenaje.	139
3.2.2.3. Cálculo de los parámetros ideales.	140
3.2.2.4. Cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes.	149
3.2.2.5. Datos para la programación de la fertirrigación.	160
3.2.2.6. Cálculo del porcentaje de drenaje idóneo.	180
3.2.2.7. Cálculo de la dosis de riego.	181
3.3. ESTUDIO DE LA NUTRICIÓN CÁLCICA EN MELÓN.	183
3.3.1. CALCIUM FORMS IN LEAVES OF MUSKMELONS (cv. REVIGAL) PLANTS TESTED WITH DIFFERENT CALCIUM COMPOUNDS.	183
3.3.2. CALCIUM DEFICIENCY PROVOKED BY THE APPLICATION OF	

DIFFERENT FORMS AND CONCENTRATIONS OF Ca ⁺² TO SOIL-LESS CULTIVATED MUSKMELONS.	195
3.3.3. DISTRIBUCIÓN DEL CALCIO EN VARIEDADES DE MELÓN CANTALOUPE BAJO FERTIRRIGACIÓN. CALIDAD DEL FRUTO.	206
4. CONCLUSIONES	213
5. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL	215
5.1. PUBLICACIONES EN REVISTAS LISTADAS EN EL JCR.	215
5.2. PUBLICACIONES EN LIBROS / REVISTAS NO LISTADOS EN EL JCR.	215
5.3. COMUNICACIONES EN CONGRESOS Y SIMPOSIUMS.	216
6. BIBLIOGRAFÍA	219

1. INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN A LOS CULTIVOS SIN SUELO

1.1.1. CONCEPTO DE HIDROPONÍA Y CULTIVO SIN SUELO. ANTECEDENTES

Etimológicamente el concepto hidroponía deriva del griego y significa literalmente trabajo o cultivo (ponos) en agua (hydros). El concepto “hidropónico” se utiliza actualmente a tres niveles distintos, cada uno de los cuales engloba al anterior (Jensen y Malter, 1995; Alarcón, 1996):

- Cultivo hidropónico puro, sería aquel en el que, mediante un sistema adecuado de sujeción, la planta, desarrolla sus raíces en medio líquido (agua con nutrientes disueltos) sin ningún tipo de sustrato sólido. Se trata de los denominados “Liquid Hydroponic Systems”, entre los que merece la pena citar NFT (Nutrient Film Technique) con todas sus variantes, hidroponía de flujo profundo (Deep Flow Hydroponics), hidroponía de raíz flotante DRF (Dynamic Root Floating Hydroponic), cultivo aeropónico (Aeroponics), etc.
- Cultivo hidropónico según la tendencia mayoritaria, es utilizado para referirnos al cultivo en agua o en sustratos sólidos más o menos inertes y porosos a través de los cuales se hace circular la disolución nutritiva (Aggregate Hydroponics Systems). De estos destacaremos los cultivos hidropónicos en bancadas o en surcos (Trough o Trench Culture); cultivo en sacos o tablas (Bag Culture) rellenos de sustratos lana de roca, perlita, vermiculita, turba, fibra de coco, mezcla de sustratos, etc. y cultivos con toda la superficie cubierta de arena (Sand Culture).
- Cultivo hidropónico en su concepción más amplia, engloba a todo sistema mediante el cual las plantas completan su ciclo vegetativo sin la necesidad de emplear el suelo, suministrando la nutrición hídrica y la totalidad o parte de la nutrición mineral mediante una disolución con los diferentes nutrientes esenciales para su desarrollo, en las concentraciones y relaciones apropiadas. El concepto es equivalente al de “cultivos sin suelo”, y supone el conjunto de cultivo en sustrato más el cultivo en agua (Soilless Culture).

El cultivo de las plantas sin suelo, se desarrolló a partir de experiencias llevadas a cabo para determinar las sustancias que hacían crecer las plantas. No obstante, las plantas fueron cultivadas fuera del suelo mucho antes. Los jardines colgantes de Babilonia; los jardines flotantes de los aztecas, en México, y los de la China imperial, son ejemplos de cultivos “hidropónicos”. También existen jeroglíficos egipcios fechados cientos de años antes de Cristo que describen el cultivo de plantas en agua (Resh, 1997). Muchos trabajos, generalmente encaminados a esclarecer aspectos relacionados con la nutrición mineral de los vegetales, demostraron que las plantas podrían cultivarse en un medio inerte humedecido por una disolución acuosa que contuviese los minerales requeridos por las plantas. El siguiente paso fue eliminar completamente el medio y cultivar las plantas en la disolución que contenía dichos minerales, lo que fue conseguido por dos científicos alemanes, Sachs (1860) y Knop (1860).

El interés sobre la aplicación práctica de este cultivo en nutrientes no llegó hasta cerca de 1925, cuando la industria de los invernaderos demostró interés en su uso, debido a la necesidad de

cambiar la tierra con frecuencia para evitar los problemas de estructura, fertilidad y enfermedades (Resh, 1997). A comienzos de los años treinta, Gericke puso los ensayos de laboratorio de nutrición vegetal a escala comercial, denominando a este sistema de cultivo en nutrientes “hydroponics” (Gericke, 1929, 1937, 1938 y 1940), llegando sus plantas de tomate a crecer hasta 7 metros de altura. Su sistema cayó en desuso debido a la creación de nuevas técnicas más ventajosas, si bien es cierto que actualmente, una adaptación de su sistema puede ser perfectamente rentable (Cunningham, 1998). En la década de los 70, en Japón y algunos países de Europa, se produce el despegue definitivo de la producción comercial de hortalizas y flores en cultivos sin suelo (Martínez y García, 1993).

La hidroponía es un sistema excelente para todo tipo de investigación en fisiología, patología y nutrición vegetal. Hasta hace cuatro o cinco décadas esta era su principal aplicación. Al ser un medio homogéneo, aislado del suelo y no contaminado, permite un tratamiento uniforme y sin interacciones de elementos extraños, con lo cual se simplifican los planteamientos para todo tipo de investigación. En nutrición la posibilidad de confeccionar la disolución nutriente sin interferencias del medio nos proporciona una oferta limitada de equilibrios, presencias y concentraciones, indispensables para el estudio de todo tipo de interacciones de elementos nutritivos, así como para el establecimiento de niveles de toxicidad y carencia (Cánovas, 1993).

1.1.2. CLASIFICACIÓN Y PANORÁMICA DE LOS SISTEMAS DE CULTIVO HIDROPÓNICO

Los sistemas de cultivo hidropónico se dividen en dos grandes grupos (Jensen y Malter, 1995):

- Cerrados: Aquellos en los que la disolución nutritiva se recircula aportando de forma más o menos continua los nutrientes que la planta va consumiendo. Todos los sistemas hidropónicos en medio líquido son cerrados.
- Abiertos o a solución perdida: Aquellos en los que los drenajes provenientes de la plantación son desechados. Los cultivos hidropónicos en sustratos, pueden ser sistemas abiertos o cerrados.

Dentro de estos dos grupos hay tantos sistemas como diseños de las variables de cultivo empleadas: Sistema de riego (goteo, subirrigación, circulación de la solución nutriente, tuberías de exudación, contenedores estancos de disolución nutritiva, etc.); tipo de sustrato (agua, materiales inertes, mezclas con materiales orgánicos, etc.); sistema de aplicación fertilizante (disuelto en la disolución nutritiva, empleo de fertilizantes de liberación lenta aplicados al sustrato, sustratos enriquecidos, etc.); disposición del cultivo (superficial, sacos verticales o inclinados, bandejas situadas en diferentes planos, etc.); recipientes del sustrato (contenedores individuales o múltiples, sacos plásticos preparados, canales variables en longitud, anchura y altura, etc.).

A nivel mundial, aproximadamente el 90% son sistemas abiertos, fundamentalmente debido a su mayor facilidad en el control de la nutrición mineral (Donnan, 1994). En España, la práctica totalidad de las parcelas con cultivo hidropónico están bajo invernadero y son, hoy en día, sistemas abiertos a solución perdida, es decir, los lixiviados se dejan percolar en el suelo, bien en el mismo emplazamiento de los sustratos, o bien son canalizados fuera del invernadero

donde se desechan. Aunque, es cierto que, en los últimos años, se ha puesto en funcionamiento una superficie considerable de cultivo hidropónico bajo sistemas cerrados, fundamentalmente consecuencia de iniciativas particulares. Lo que parece claro, es que cada día se impone con más fuerza la necesidad de regeneración y reutilización de estas aguas de drenaje, por motivos tales como (Alarcón, 1998):

- La escasez de recursos hídricos en las principales zonas de cultivo hortícola que obliga al máximo aprovechamiento de los mismos.
- La posibilidad de tener un sistema cerrado de fertilizantes donde son aprovechados al máximo los abonos empleados.
- La posibilidad, de igual forma, de mantener un sistema cerrado de productos de quimigación (fungicidas, insecticidas, desinfectantes, ácidos húmicos o cualquier producto corrector o mejorante apto para ser utilizado en fertirrigación).
- Evitar el problema medioambiental de contaminación de acuíferos, debida sobre todo a la acumulación de nitratos, fosfatos y plaguicidas.
- Las normativas europeas, que en países como Holanda ya obligan a establecer una recogida y reutilización de los drenajes y que en años próximos estarán vigentes en nuestro país.

1.1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA IMPLANTACIÓN DEL CULTIVO HIDROPÓNICO EN NUESTRA ZONA

La superficie dedicada a cultivo hidropónico crece de forma progresiva debido a las ventajas que presenta sobre el cultivo en suelo. Además, el desarrollo de los cultivos hidropónicos se verá reforzado en un futuro inmediato no sólo por los probados incrementos que supone en cuanto a producción, calidad y precocidad de las cosechas, sino también por el agotamiento, la salinización y la contaminación por patógenos de los suelos de los invernaderos, y de las zonas de producción hortícola en general, y por la prohibición del uso de bromuro de metilo y otros desinfectantes químicos de los suelos.

El cultivo sin suelo o hidroponía permite mantener una nutrición hídrica y mineral ajustada a las necesidades de la planta en cada momento de su desarrollo. Aún así, es preciso mantener un porcentaje de lixiviación o drenaje (20-50 % respecto a la solución nutritiva entrante) para evitar una excesiva concentración salina (total o específica de algún determinado ion) en el entorno radicular que se traduciría en pérdidas de rendimiento de los cultivos. Todo ello se traduce en incrementos de producción y calidad de cosechas (Alarcón, 1996).

Hay que reseñar que comercialmente la práctica totalidad de los sistemas de cultivo hidropónico en regiones templadas son protegidos para posibilitar un control de temperaturas, reducir las pérdidas de agua por evaporación, minimizar los ataques de plagas y proteger a los cultivos contra las inclemencias del tiempo como la lluvia, el granizo o el viento (Jensen y Malter, 1995). La elevada tecnificación que exige la implantación de técnicas hidropónicas implica una inversión económica considerable, para que exista rentabilidad, los cultivos deben

mantener una producción, calidad y precio de mercado elevados. Frecuentemente la demostrada mejora de productividad y calidad de las cosechas bajo cultivo hidropónico frente al tradicional cultivo en suelo, no justifican las costosas instalaciones necesarias para esta técnica a no ser que los precios de mercado sean altos, esto ocurre con la producción de hortalizas extratempranas (Jensen y Malter, 1995; Alarcón, 1996). El litoral del sureste español (Murcia y Almería, sobre todo), presenta las mejores condiciones climáticas (temperaturas y radiación solar) de toda Europa para un desarrollo óptimo de las hortalizas, en épocas que en el resto de Europa precisan costosas instalaciones de invernaderos con control climático, en esta zona las plantas vegetan correctamente incluso al aire libre, por tanto la proliferación de invernaderos en este área (más de 35,000 ha) va encaminada a la producción de hortalizas tempranas; si a ello unimos unas instalaciones algo más sofisticadas para el adecuado control de cultivos sin suelo, podemos disponer de hortalizas extratempranas, con muy buena productividad y calidad (si se realiza un correcto manejo del cultivo), mejor aprovechamiento de los recursos (agua y fertilizantes) y alcanzar un buen precio que hacen perfectamente rentable la instalación (Alarcón, 1996).

1.1.4. CULTIVOS HORTÍCOLAS BAJO HIDROPONÍA MÁS EXTENDIDOS EN EL SURESTE ESPAÑOL

En el sureste español existen en la actualidad más de 5,000 hectáreas de cultivo hortícola en explotación mediante sistema de cultivo sin suelo, desarrolladas paralelamente a la expansión tecnológica de los cultivos bajo plástico y las nuevas equipaciones de riego localizado (Urrestarazu, 2006). Cualquier hortaliza es susceptible de ser cultivada en hidroponía en mayor o menor medida. De este modo, las condiciones agroclimáticas disponibles (calidad del agua de riego, microclima, época de cultivo, etc.) junto a los canales de comercialización hortícolas existentes en la zona, son los que determinan los cultivos a implantar.

Podemos citar por orden de aceptación entre los cultivadores de hidroponía de la zona las hortalizas siguientes: Tomate, pepino holandés, melón tipo Galia, pimiento, judía de enrame, berenjena, melón tipo español, sandía, calabacín, etc. Cada uno de estos cultivos tiene unos cuidados culturales y unas exigencias medioambientales y nutricionales específicas, aunque existen formulaciones de soluciones nutritivas con las que la mayoría de los cultivos vegetan adecuadamente, el fin que se persigue (obtención de un rendimiento lo más cercano posible al potencial del cultivo), hace que para cada plantación y según las características agroclimáticas de la misma se efectúe una nutrición hídrica y mineral a medida (Alarcón, 1996).

1.1.5. SUSTRATOS: CONCEPTO, CLASIFICACIÓN Y CONSIDERACIONES GENERALES

Un sustrato es el medio material donde se desarrolla el sistema radicular del cultivo. En sistemas hidropónicos, presenta un volumen físico limitado, debe encontrarse aislado del suelo y tiene como funciones mantener la adecuada relación de aire y disolución nutritiva para proporcionar a la raíz el oxígeno y los nutrientes necesarios, y en el caso de sustratos sólidos ejercer de anclaje de la planta. No existe el sustrato ideal, cada uno presenta una serie de ventajas e inconvenientes y su elección dependerá de las características del cultivo a implantar y las variables ambientales y de la instalación.

La mayoría de los sustratos empleados son de origen natural. Los podemos dividir en orgánicos (turbas, serrín, corteza de pino, fibra de coco, cáscara de arroz, compost, etc.) e inorgánicos. Dentro de estos últimos distinguimos los que se usan sin ningún proceso previo aparte de la necesaria homogeneización granulométrica (gravas, arenas, puzolana, picón, etc.) y los que sufren algún tipo de tratamiento previo, generalmente a elevada temperatura, que modifica totalmente la estructura de la materia prima (lana de roca, perlita, vermiculita, arlita, arcilla expandida, etc.). Dentro de los materiales sintéticos podemos nombrar las espumas de poliuretano y el poliestireno expandido, aunque su uso está poco difundido (Abad y Noguera, 1997).

Los sustratos inertes deben presentar una elevada capacidad de retención de agua fácilmente disponible (20-30% en volumen), un tamaño de partículas que posibilite una relación aire/agua adecuada, baja densidad aparente (alta porosidad, >85%), estructura y composición estables y homogéneas, capacidad de intercambio catiónico nula o muy baja y ausencia total de elementos tóxicos, hongos o esporas, bacterias y virus fitopatógenos. Una posibilidad en cuanto a los sustratos es la utilización de materiales contaminantes del medio ambiente (algas) o de desecho procedentes de actividades humanas e industriales de la zona, como pueden ser: Ladrillo molido, plástico molido, residuos de la industria maderera, estériles de carbón, escorias y cenizas, residuos sólidos urbanos, lodos de depuradoras, etc., adecuándolos en cuanto a granulometría y esterilizándolos (Urrestarazu y col., 2006).

Dentro de las explotaciones hortícolas de nuestro país, son la arena, la perlita, la lana de roca y la fibra de coco los sustratos más extendidos. Las propiedades físicas más generalizadas de estos tres sustratos se expresan en la tabla 1 (Martínez y García, 1993; Abad y Noguera, 1997; Resh, 1997; Rincón, 1997; García, 2006; Cantera, 2006; Alarcón y Urrestarazu, 2006):

Tabla 1. Principales propiedades y características físicas de los sustratos de cultivo más comúnmente empleados en nuestra zona.

Propiedad	L. de roca	Perlita B-12	Arena	F. de coco
Densidad real (g/cm ³)	2,65	2,47	2,60	1,55
Densidad aparente (g/cm ³)	0,08-0,09	0,14-0,16	1,35-1,65	0,06
% Material sólido	3-5	4-6	58-62	5
% Porosidad total	95-97	94-96	38-42	95
% Agua fácilmente utilizable + reserva	78	32	20	25-35
% Agua difícilmente utilizable	4	25	5	20-35
% Aire retenido en saturación	15	37	15	35-50
Sustrato por planta normalmente utilizado (L)	3-4	7-10	12-15	7-10

1.1.6. CULTIVOS SIN SUELO FRENTE AL TRADICIONAL CULTIVO EN SUELO

El cultivo hidropónico es el método más intensivo existente en la agricultura actual, en combinación con los modernos invernaderos, representa una elevada tecnología y coste de capital, pero igualmente resulta altamente productivo, ofrece un óptimo aprovechamiento de las tierras y el agua y es conservador con el medio ambiente. Todo ello debido a la posibilidad

de controlar la parte aérea y el medio radicular de los cultivos a nivel de temperatura, luz, agua, nutrientes y condiciones climáticas adversas (Jensen y Malter, 1995; Alarcón, 2006).

El potencial máximo de una planta viene condicionado por su dotación genética, el aproximarse a este máximo teórico dependerá de una serie de condicionantes, ambientales (temperatura, humedad relativa, radiación, etc.), culturales (entutorados, podas, etc.), sanitarios (plagas y enfermedades) y de rizosfera (temperatura, aire y agua del sustrato), etc. Un sistema de cultivo con o sin suelo tiene prácticamente en común todos los factores de producción, a excepción de la rizosfera. Los carbohidratos de fotosíntesis son utilizados para generar elementos plásticos (tejidos y órganos) o energéticos (azúcares, almidones, etc.) que, o bien quedan en reserva, o por oxidación (respiración) proporcionan la energía necesaria a sus funciones vitales. En hidroponía la planta encuentra en óptimas condiciones los elementos que necesita (agua, nutrientes, oxígeno, etc.) y los toma con un ahorro energético notable. Esto supone que un mayor porcentaje de carbohidratos se destinan a fines productivos (Cánovas, 1993).

La planta realiza un mayor consumo de energía para la toma de agua y nutrientes del suelo que de un sustrato y, para un mismo nivel de actividad biológica la respiración de la raíz será más intensa, siendo necesaria una temperatura superior, así como más oxígeno. Un sustrato generalmente es más homogéneo, suelto y ligero que el suelo y posee una mayor porosidad y de mejores características (regular y abierta) que le confiere una capacidad muy superior en agua y aire, con un equilibrio entre ambos fluidos rápidamente desplazable ante pequeñas variaciones de presión de succión. En el suelo el agua es retenida sólo en los microporos con una fuerza mayor, mientras el aire ocupa los macroporos liberados por el agua.

Los suelos siempre presentan actividad química. Cuando los sustratos son artificiales generalmente son químicamente inertes. Se busca que no interfieran en la composición de la disolución nutritiva aportada y también que no se degraden, para que conserven intactas sus propiedades físicas de partida. Controlar en el suelo el equilibrio y concentración de nutrientes es difícil, complicado y lento, mientras que en los sustratos es mucho más fácil y rápido, sobre todo si son inertes (Cánovas, 1993).

De este modo se pueden establecer las siguientes ventajas e inconvenientes de los cultivos sin suelo de elevada tecnología respecto a los tradicionales en suelo (Mason, 1990; Resh, 1992; Cánovas, 1993; Jensen y Malter, 1995):

- Ventajas:
 - Posibilitan una alta densidad de plantación y máximos rendimientos del cultivo. El número de plantas queda limitado únicamente por la iluminación.
 - Permiten la producción vegetal donde las condiciones edáficas son inadecuadas.
 - Permiten el control ambiental, resultan virtualmente indiferentes a la estacionalidad.
 - Resultan mucho más eficientes en el uso del agua y los fertilizantes.
 - Posibilitan una mejor mecanización y control de plagas y enfermedades.
 - La mano de obra se minimiza, al reducirse las labores culturales necesarias.
 - Se eliminan problemas intrínsecos del suelo como enfermedades, agotamiento, salinización, degradación de estructura, drenaje inapropiado, problemas de

germinación de las semillas, etc.

- La producción es altamente intensiva, sin necesidad de establecer rotaciones de cultivos para paliar efectos negativos.
 - Menor y más fácil esterilización del medio de cultivo.
 - Control completo y homogéneo de la nutrición vegetal.
 - Cosechas de elevada calidad, muy homogéneas, y más precoces.
 - Riesgo mínimo de contaminación por agentes patógenos.
 - Homogeneidad del medio de cultivo.
 - El control de la salinidad de la solución a nivel de la raíz es mucho más fácil en los “sin suelo”, lo que posibilita el uso de aguas mediocres, si bien a costa de un mayor consumo de agua y abonos.
 - La calefacción en un sustrato es más fácil y económica que en suelo.
- Desventajas:
 - Elevados costes de capital e inputs energéticos.
 - Elevado nivel de cualificación en el manejo para la obtención de resultados exitosos.
 - Resultan menos frecuentes los ataques de plagas y enfermedades, pero una vez presentes, se pueden desarrollar más rápidamente.
 - Las plantas responden con antelación, tanto a las buenas como a las inadecuadas condiciones.
 - Existe un más bajo poder tampón o amortiguador ante situaciones desfavorables como valores inapropiados de pH, estados hídricos y nutricionales inadecuados, condiciones ambientales adversas, etc. La falta de inercia de los sistemas “sin suelo” los hace muy vulnerables ante cualquier fallo o error en el manejo.
 - Los residuos sólidos constituidos por la retirada de ciertos sustratos artificiales (lana de roca) y plásticos, ocasionan un serio problema ya que no son degradables.

1.1.7. EL AGUA DE RIEGO EN CULTIVO HIDROPÓNICO

La calidad del agua de riego es uno de los factores que más puede condicionar un cultivo hidropónico. El sistema de riego más extendido, riego por goteo, permite la utilización de aguas de mala calidad que serían inutilizables bajo otros sistemas de riego como aspersión o inundación. Ahora bien, la frecuente presencia de elementos tóxicos para las plantas en elevada concentración como sodio, cloruros o boro, condicionan el tipo de cultivo y el manejo del mismo en cuanto a nutrición, riego y volumen de drenaje recomendable.

Cada cultivo tiene una tolerancia específica a los elementos citados y a la cantidad total de sales solubles (cuantificada por la medida de la CE), que puede mantener en su entorno radicular sin merma importante de rendimientos. Estos niveles no deben sobrepasarse y ello se consigue mediante el adecuado control del volumen drenado. Con agua de buena calidad los porcentajes de drenaje serán menores (mejor aprovechamiento de los recursos hídricos) mientras que aguas salinas sólo nos permitirán cultivar especies más o menos tolerantes a la salinidad (tomate, melón) y nunca especies sensibles a la misma (judía, fresa) y además habrá que dejar

un mayor volumen de drenaje para evitar excesivo aumento de la CE en el sustrato y acumulaciones de elementos fitotóxicos (Alarcón, 1996).

Esta es una de las razones por las que el empleo de sistemas cerrados en nuestra zona está limitado; la pobre calidad de las aguas hace que rápidamente se acumulen elementos indeseables en la solución recirculante con lo que hay que desecharla. Para este tipo de sistemas es necesaria una calidad de agua muy alta, con una concentración de sodio y cloruros tal, que el cultivo pueda asimilarlos sin presentar síntomas de toxicidad (Alarcón, 1996)

1.1.8. NUTRICIÓN HÍDRICA EN CULTIVO HIDROPÓNICO

Los riegos deben ser frecuentes en relación a la demanda evapotranspirativa y al estado fenológico del cultivo, siendo las dosis acordes con el tipo de sustrato usado (volumen y características físico - químicas), altura del contenedor, relación entre el contenido volumétrico aire/agua y la tensión matricial y el volumen de reserva hídrica disponible del sistema y porcentaje de drenaje requerido (Lorenzo, 1997).

Es obvio que las necesidades hídricas varían notablemente a lo largo del día y de un día para otro. En un cultivo tan tecnificado como el hidropónico, es contraproducente que las plantas sufran estrés hídrico que afecte su rendimiento final o que existan despilfarros de disolución nutritiva (agua y fertilizantes). Actualmente existen en el mercado numerosos métodos capaces de solucionar este problema, son los denominados métodos de riego por demanda, que accionan el riego según las necesidades instantáneas del vegetal. Así tenemos, sensores de radiación (solarímetros o radiómetros) (Boulard y Jemaa, 1993), unidades evaporimétricas y tensiómetros (Marfá, 1996), métodos gravimétricos (Welleman y Verwer, 1984), microvariaciones del diámetro del tallo (Lorenzo, 1997), activación del riego mediante sensores de nivel (Lorenzo y col., 1996), de peso (Moreno, 2006), registro continuo del volumen de solución lixiviada (Göhler y col., 1989), determinación del flujo de savia (Zhang y Kirkham, 1995), etc.

El sistema más extendido y que ofrece excelentes resultados es la bandeja de riego por demanda. Este dispositivo consta de una bandeja soporte sobre la que se sitúan unidades de cultivo representativas (generalmente dos unidades), el agua de drenaje se acumula en la parte más baja de la bandeja (que lleva un orificio para desalojar parte del excedente drenado) donde se sitúan uno o varios electrodos que cierran un circuito eléctrico cuya señal impide el inicio del riego. Cuando los procesos evaporativos y de succión directa de las raíces, hacen descender el nivel de agua, el circuito eléctrico queda abierto y se acciona el inicio del riego. Este sistema permite la obtención del drenaje prefijado de forma uniforme lo que evita despilfarros de agua y fertilizantes o estrés salino temporal si el drenaje estimado es el idóneo, ya que el aporte hídrico se corresponderá con la evapotranspiración que en cada momento sufra la planta.

Estos sistemas de riego por demanda ajustan la frecuencia de los riegos, mientras que la dosis de los mismos se mantiene fija, en función de las características físico - químicas del sustrato y de las condiciones culturales y ambientales. En cualquier caso, interesan riegos numerosos y cortos, al tratarse de sustratos con volumen limitado por planta y mantener siempre un estado hídrico óptimo.

1.1.9. NUTRICIÓN MINERAL EN CULTIVO HIDROPÓNICO

La racional conducción de la hidroponía implica el conocimiento no sólo de los procesos fisiológicos relativos a la absorción mineral e hídrica, sino también de otros aspectos como la respiración, la fotosíntesis y la transpiración que están estrechamente ligados con los primeros.

La nutrición mineral a la planta debe aportarse por completo a través de la disolución nutritiva, lo que trae consigo la posibilidad de un control preciso según especie, momento fenológico, características climáticas, etc., para obtener la mayor rentabilidad del cultivo. Ahora bien, al tratarse de sustratos inertes carecen de capacidad tampón, equivocaciones o fallos en el control de la nutrición mineral o el ajuste del pH pueden ocasionar graves perjuicios a la plantación (Alarcón, 1996).

La nutrición mineral de un cultivo hidropónico debe controlarse según la demanda de la planta efectuando los oportunos análisis químicos, sobre todo, de la disolución de drenaje o la extraída del mismo sustrato. Dependiendo del análisis del agua de riego, la especie cultivada y las condiciones climáticas se elabora la disolución nutritiva de partida, entonces será el propio cultivo el que dicte las siguientes disoluciones nutritivas. Se aconseja analizar al menos la solución de drenaje cada 15 días. En función de lo que la planta vaya absorbiendo, las condiciones climáticas y el estado fenológico del cultivo, se vuelven a ajustar los nutrientes (Alarcón, 1996).

Para la preparación de la disolución nutritiva final, se parte de disoluciones concentradas, separando los fertilizantes incompatibles entre sí, y adicionándolos, en la debida proporción, al agua de riego en una cuba de mezcla donde se ajusta el pH (normalmente aportando ácido nítrico) y la CE. Es aconsejable utilizar disoluciones nutritivas de menor concentración (manteniendo el equilibrio) en verano y más concentradas en invierno, ya que siendo similares los requerimientos nutritivos de las plantas en una u otra época, durante los meses estivales la demanda hídrica es mucho mayor (Resh, 1997).

El futuro del cultivo hidropónico en España pasa por dos aspectos inexcusablemente. El primero una investigación y tecnificación del sector en cuanto a estructuras, sustratos, equipos de fertirrigación, optimización de la nutrición hídrica y mineral por cultivos, épocas y zonas, etc. El segundo de forma paralela al anterior, un desarrollo respetuoso con el medio ambiente, en el que por valores ecológicos y por imperativos de las directivas de Unión Europea se debe tender a la recirculación de drenajes (acoplando si es preciso desaladoras a los sistemas para tener agua de buena calidad), uso de sustratos y otros materiales reciclables o reciclados, control de plagas integrado, etc.

1.2. INTRODUCCIÓN AL CULTIVO DE MELÓN

1.2.1. ORIGEN Y SITUACIÓN DEL CULTIVO

Los botánicos creen que el cultivo del melón es originario de la India y Beluchistán en Asia y de Guinea en África, no obstante, se han encontrado semillas de cucurbitáceas en los antiguos palafitos de Parma (Italia) donde habitaba el hombre primitivo. En estas zonas de origen se encuentra su punto de dispersión, expandiéndose a partir de allí en todas direcciones a la mayor parte de las zonas de cultivo mundiales. Esta amplitud de ámbitos es consecuencia de su gran variabilidad genética, que ha permitido la adaptación de diferentes tipos de melón en condiciones agronómicas diversas. Hoy día podemos encontrar en los mercados de todo el mundo melones con diferentes colores, formas y aromas.

Los primeros datos del cultivo del melón provienen de fuentes egipcias (24 siglos a. C.) y son citados en la Biblia. Posteriormente existen evidencias de que los romanos eran muy aficionados a su cultivo y consumo. En el siglo XI, los árabes los producían en sus huertos de Murcia y Valencia por sus propiedades medicinales y digestivas. Hasta el siglo XVII no se desarrollan las formas carnosas hoy conocidas. En Europa, a mediados de los 50 y principios de los 60, el melón experimentó una progresiva y lenta expansión, convirtiéndose a finales de los 60 en un producto de amplio consumo.

Las principales zonas de producción mundial que encontramos son las siguientes (Deulofeu, 1997):

- *Mediterránea.* Los países ribereños del mediterráneo son las zonas donde el consumo es tradicionalmente más popular. La aparición en los 70 de los melones tipo Galia a partir de los trabajos de los genetistas de la Universidad de Israel y la obtención de variedades de melones con una buena conservación postcosecha, además de la resistencia a enfermedades que han incorporado las diferentes casas de semillas, ha hecho que hoy, no solamente se cultiven variedades para el consumo local, sino que se estén produciendo en los países mediterráneos diferentes tipos de melones para los mercados con más poder adquisitivo, como son los del centro y norte de Europa.
- *Centro y sur de África.* El aumento de la demanda de melón en los mercados europeos también ha hecho que se estén probando nuevas zonas de producción. Así, en las antiguas colonias francesas (Senegal, Camerún, Gambia, Ghana) se cultivan melones tipo *Charentais* o en Zimbabue y Sudáfrica donde se producen 'Honeydew' o tipo americano para el mercado local y Galia para exportar, sobre todo a Gran Bretaña.
- *Asia.* En este continente se cultivan una gran variedad de tipos. En China el tipo Hami y en Japón el tipo japonés o Arus, de cultivo artesanal y escriturado perfecto al dejar un fruto por planta y que se vende como regalo a precios elevadísimos.
- *América.* En EEUU el melón más popular es el 'Western Shipper', un tipo *Cantaloup*. Su interés ha hecho extender su cultivo a países centroamericanos. Sin embargo, la creciente demanda de melón de los mercados europeos durante los meses de invierno

ha motivado el cultivo de *Galia*, *Charentais*, piel de sapo o amarillo, exclusivamente para exportación en países del centro y sur de América.

La globalización de los mercados hace que hoy sea fácil encontrar melones en Finlandia o Rusia, donde antes eran considerados como una fruta exótica. A ello ha contribuido la productividad de las explotaciones agrícolas, la buena red de comunicaciones y el trabajo de los genetistas al crear variedades superproductivas con resistencias y vida postcosecha aumentada (Deulofeu, 1997).

1.2.2. CARACTERÍSTICAS BOTÁNICAS

Descripción de la planta

El melón es una planta termófila, muy exigente en calor, cuyo ciclo vegetativo suele situarse por encima de 12°C. Para que no sufra problemas de polinización la temperatura no debe descender de 18°C, y para que maduren los frutos requiere un intervalo térmico entre 20 y 30°C, según cultivares (Maroto, 1997).

El melón es una planta con un sistema radicular abundante y ramificado, de crecimiento rápido; algunas raíces pueden alcanzar una profundidad de 1,20 m, aunque la mayor parte de ellas se encuentran en los primeros 30-40 cm del suelo. Sus tallos pueden ser rastreros o trepadores en función de los zarcillos y son vellosos al igual que sus hojas. De las axilas de las hojas del tallo principal nacen los secundarios, siendo los 3-4 primeros los más desarrollados. Las flores son pedunculadas y salen de las axilas de las hojas, pueden ser masculinas, femeninas o hermafroditas; las masculinas aparecen en tallos primarios; y las femeninas y hermafroditas aparecen en secundarios y terciarios, pero siempre acompañadas de flores masculinas. La polinización es entomófila (Maroto, 1995; Maroto, 1997; Torres, 1997). Cuando se inicia la floración, la apertura de flores tiene lugar a primera hora de la mañana, permaneciendo las flores pistiladas receptivas 2-3 días (Gómez-Guillamón, 1997).

El fruto del melón es una infrutescencia denominada pepónide que podemos dividir en piel (puede mostrar diferentes colores y estar escriturada o reticulada), placenta (donde se sitúan las semillas y que está dividida en 3-4 lóbulos dobles) y pulpa (de diferente color). Las formas, coloraciones y dimensiones del fruto son muy variables. Las semillas ocupan la cavidad central del fruto, son fusiformes, aplastadas y de color blanco o amarillento, pudiendo existir entre 200 y 600 por fruto (Maroto, 1995).

Para la formación y maduración de los frutos de melón deben transcurrir unos 40 días. En los primeros 15, tras la fecundación, el fruto alcanza la mitad de su volumen total y, a partir de ese momento, inicia la pérdida de color de la pulpa por degradación de carotenos. Cuando ha transcurrido un mes desde la fecundación, el fruto ha alcanzado prácticamente su tamaño definitivo, produciéndose la maduración durante los últimos 10 días, en los que se producen importantes cambios bioquímicos que conducen a un incremento notable de su contenido en azúcares (Maroto, 1995).

La composición en azúcares de los frutos a lo largo de su desarrollo y maduración es un aspecto primordial en la determinación del punto óptimo de madurez del melón. Si es recolectado prematuramente, como su contenido en sacarosa procede de la descomposición y movilización de hidratos de carbono (almidón fundamentalmente) de las hojas y este proceso se produce muy tardíamente, la pulpa no alcanza el suficiente grado de dulzor y el contenido en azúcares no aumenta durante la postrecolección. A medida que los frutos de melón maduran, dicho contenido en azúcares aumenta hasta superar el 97% del total de sólidos solubles, siendo la sacarosa la sustancia predominante con más del 50 % del total (Maroto, 1997). De esta forma, la determinación del momento óptimo de recolección es un tema complejo, lo que complica el establecimiento de un calendario estricto y conlleva a la correlación de síntomas externos en planta o fruto (aparición de grieta concéntrica en la base del pedúnculo del fruto, marchitamiento de la primera hoja sobre el fruto, viraje de coloración de la corteza, incremento de aromas, mayor elasticidad en la base u ombligo de los frutos, amarilleamiento de la parte inferior del fruto, etc.) con este momento óptimo (Maroto, 1995). Los frutos de cultivares con el gen «larga vida» o LSL (*Long Shelf Life*) de larga conservación, inhiben en algún momento la producción de etileno, por lo que permiten un período de cosecha más dilatado sin que los frutos sufran una sobremaduración o senescencia en la planta (Navarro, 1997).

Descripción taxonómica y tipos de melón

La planta de melón es una angiosperma dicotiledónea, perteneciente a la subclase *Dilledae*, orden *Cocurbitales* y familia *Cucurbitaceae*. El botánico sueco Carlos Linneo le puso al melón el nombre científico *Cucumis melo*, el primer nombre deriva del griego «kukumeren», serpentino y retorcido a modo de culebra, haciendo referencia al fruto de algunas cucurbitáceas, y «melo» proviene de su etimología latina.

La familia tiene muchos géneros, pero solo tres, son de importancia: *Citrullus* (son las sandías cultivadas, especies *C. lanatus* y *C. vulgaris*), *Cucumis* (especies *C. sativus* –pepino– y *C. melo* –melón–) y *Cucurbita* (calabazas *C. maxima*, *C. moschata* y *C. mixta*, y el calabacín *C. pepo*) (Dane y Tsuchiya, 1976).

Existen muchas diferentes variantes de melón en función del color externo e interno, la forma, los tamaños, el tacto de la piel, el sabor, etc. Una clasificación botánica propuesta por Münger y Robinson (1991) establece los siguientes grupos dentro de la especie (*Cucumis melo* L.):

- *C. melo agrestis* Naud.: Tipos silvestres con frutos pequeños e incomedibles.
- *C. melo cantalupensis* Naud.: Frutos de tamaño medio, reticulados o rugosos, muy aromáticos y normalmente andromonoicos.
- *C. melo inodorus* Naud.: Melones de invierno, lisos o asurcados, grandes, tardíos, poco aromáticos y normalmente andromonoicos.
- *C. melo flexuosus* Naud.: Frutos muy alargados, en ocasiones se utilizan como sustitutivos del pepino.
- *C. melo cocomon* Mak.: Dulces, lisos, precoces y normalmente poco aromáticos.

- *C. melo dudaim* Naud.: El melón «mango», monoicos, con o sin fragancia.
- *C. melo momordica* Naud.: Poco dulce, carne blanca y harinosa, con frutos lisos que se deshacen al madurar y monoicos.

La mayoría de los melones cultivados en nuestro país pertenecen a los grupos (o variedades) *Cantalupensis* e *Inodorus*. Sin embargo, en variedades pertenecientes a otros grupos se encuentran algunas características interesantes, particularmente resistencias a plagas y enfermedades, que se utilizan en la depuración genética de las variedades.

Independientemente de la clasificación botánica, quizá tenga mayor importancia la clasificación comercial de melones por tipos, que puede establecerse de la siguiente forma (Torres, 1997):

- *Melón amarillo*: De origen español, piel amarilla y pulpa color blanco cremoso. A su vez se divide en dos grupos:
 - *Amarillo rugoso*: Forma oval y tamaño grande.
 - *Amarillo redondo liso*: Frutos redondos lisos de alrededor de 1 kg.
- *Melones verdes españoles*: Color verde más o menos oscuro, forma alargada y elevado tamaño (1,5 a 3 kg). Se distinguen 3 grupos:
 - *Rochet*: Pulpa color verde de consistencia mantecosa y aromático.
 - *Piel de sapo*: Pulpa verde y crujiente.
 - *Tendral*: Variedad tardía, color verde oscuro, piel muy rugosa y dura, pulpa verde.
- *Melones Charentais*: De origen francés, actualmente hay variedades tanto de piel lisa como reticulada que presentan los genes «larga vida». Se distinguen 2 grupos:
 - *Charentais de piel lisa*: Forma redondeada, en algunos casos un poco achatados y tamaño 0,8-1,3 kg. Piel color verde claro o ligeramente gris y dividida por suturas de color verde oscuro (acostillado). Pulpa de color salmón y bastante aromáticos.
 - *Charentais de piel reticulada*: Frutos redondeados o semiovalados con un reticulado más o menos grueso. También están acostillados y son bastante olorosos.
- *Melón Galia*: Origen israelí (variedad muy antigua hibridada en los años 70). Forma redondeada, piel de color verde que evoluciona a amarillo en madurez y que presenta un reticulado fino; el color de la pulpa es blanco-verdoso y la consistencia es mantecosa. El peso oscila entre 0,7 y 1,3 kg.
- *Melón Cantaloup*: Origen americano. Forma esférica, reticulado grueso en toda su superficie. La pulpa es de color salmón y aromática.

- *Melón Honeydew o blanco*: Piel lisa, color verde tenue o casi blanco y pulpa verdosa.
- *Otros tipos*: Existen muchos tipos de orígenes muy antiguos, con aceptación comercial local: *Casaba, Crenshaw, Sharlyn, Ananás, Orange, Flesh, Cavaillon, Persa*, etc.

Las empresas comerciales, en sus programas de mejora genética, encuentran nuevos productos con caracteres fijados y manifiestos que aportan lo que podría ser un nuevo tipo, como ocurrió con el Galia o con el amarillo canario redondo liso.

1.2.3. IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL CULTIVO

Los datos de producción mundial (FAOSTAT, 2015), indican una cifra alcanzada actualmente de unos 29,4 millones de toneladas incluyendo todos los tipos de melón y según los últimos datos actualizados de 2013 (tabla 2).

Zona	2003	2005	2007	2009	2011	2013	%
África	1,27	1,46	1,83	2,08	2,16	2,00	6,80
América	3,48	3,66	3,80	3,46	3,77	4,00	13,59
Asia	17,60	19,14	20,61	18,53	23,75	21,30	72,45
Europa	2,32	2,38	2,43	2,27	2,05	2,01	6,83
Oceanía	0,07	0,09	0,08	0,08	0,08	0,10	0,32
Mundo	24,75	26,73	28,73	26,43	31,80	29,39	

Tabla 2. Producción en millones de toneladas de todos los tipos de melón en el mundo (Fuente: FAOSTAT).

El incremento en la última década ha sido cercano al 19% considerado globalmente. Bien es cierto que Asia asume más del 70% de la producción mundial y son sus fluctuaciones productivas las que gobiernan este incremento.

En este aspecto, los principales países productores se muestran en la tabla 3.

China tiene la mitad de la producción mundial, el siguiente país (Turquía), tiene una producción actual casi diez veces inferior, por tanto, es el gigante asiático quien determina en buena parte la producción mundial. España es el séptimo mayor productor mundial con casi el 3%, siendo con mucho el más importante dentro de la UE. La presencia en este grupo de países como Egipto, Marruecos, Guatemala, Brasil u Honduras, obedece a producciones para ser exportadas fundamentalmente a la UE o USA.

País	2003	2005	2007	2009	2011	2013	%
China	11,79	13,05	14,21	12,22	17,26	14,40	50,0
Turquía	1,74	1,83	1,66	1,68	1,65	1,70	5,8
Irán	1,41	1,58	1,66	1,28	1,40	1,50	5,1
Egipto	0,47	0,57	0,83	0,92	1,04	1,02	3,5
India	0,71	0,64	0,79	0,81	0,95	1,00	3,4
USA	1,24	1,18	1,11	1,04	1,02	0,99	3,4
España	1,07	1,09	1,18	0,98	0,87	0,86	2,9
Kazajstán	0,14	0,16	0,19	0,27	0,46	0,77	2,6
Marruecos	0,55	0,65	0,73	0,89	0,78	0,70	2,4
Guatemala	0,32	0,31	0,49	0,46	0,50	0,57	1,9
Brasil	0,35	0,35	0,50	0,40	0,50	0,57	1,9
México	0,46	0,58	0,54	0,55	0,56	0,56	1,9
Venezuela	0,23	0,29	0,21	0,19	0,34	0,50	1,7
Italia	0,57	0,61	0,62	0,62	0,54	0,48	1,6
Honduras	0,21	0,21	0,20	0,23	0,33	0,29	1,0

Tabla 3. Producción en millones de toneladas de todos los tipos de melón en los principales países productores (Fuente: FAOSTAT).

Datos del año 2014 cifraron en unas 23.790 has la superficie de melón en España, con una producción de unos 750.150 Tm, un rendimiento medio por tanto de unos 3,2 kg/m².

Datos cerrados por el Ministerio de Agricultura en España se tienen hasta el año 2012, en la tabla 4 se expone un resumen de superficies, rendimientos y valor económico alcanzado para el agricultor.

Zona	2002	2004	2006	2008	2010	2012
Superficie (miles ha)	39,2	37,6	40,3	33,4	30,6	28,1
Producción (mil. Tm)	1,10	1,07	1,09	1,04	0,93	0,88
Rendimiento (kg/m ²)	2,81	2,85	2,70	3,12	3,03	3,14
Precio percibido por agricultor (€/kg)	0,24	0,30	0,31	0,42	0,37	0,27

Tabla 4. Superficie, producción, rendimiento y precio percibido por el agricultor en España (Fuente: MAGRAMA).

Aunque el rendimiento ha aumentado ligeramente, en la última década de la que se disponen datos, tanto la superficie de cultivo como la producción se han visto disminuidas. Los precios percibidos por el agricultor tras unos buenos años entre 2008 y 2010, han vuelto a caer a valores bajos.

En cuanto a los tipos de melón, que habitualmente de forma tradicional en las estadísticas oficiales se vienen diferenciando en 4 clases (melones de piel lisa, tendral, cantalupos y otros), clasificación bajo mi punto de vista totalmente anacrónica y de difícil comparación con lo

conceptos que habitualmente se manejan en los mercados actuales, los datos correspondientes a 2012 (los últimos disponibles) se muestran en la tabla 5.

Tipo	Superficie (miles ha)	Producción (miles Tm)	Rendimiento (kg/m ²)
Melones de piel lisa	6,3	191,9	3,05
Tendral	1,7	49,2	2,89
Cantalupos	4,3	136,3	3,17
Otros	15,9	505,5	3,18

Tabla 5. Superficie, producción y rendimiento de los diferentes tipos de melón en España en 2012 (Fuente: MAGRAMA).

Por Comunidades Autónomas, los datos correspondientes a 2012 (los últimos disponibles) se muestran en la tabla 6, y realmente no tienen una clara relación con las encuestas disponibles en años sucesivos.

Comunidad Autónoma	Superficie (miles ha)	Producción (miles Tm)	Rendimiento (kg/m ²)	% del total producido	Superficie protegida (ha)
Castilla – La Mancha	10,38	325,3	3,13	36,8	0
Comunidad Valenciana	1,74	38,3	2,20	4,3	447
Región de Murcia	6,06	226,4	3,74	25,6	52
Extremadura	1,88	60,2	3,20	6,8	1531
Andalucía	7,08	211,8	2,99	24,0	3135
Total España	28,13	882,9	3,14	-	5272

Tabla 6. Superficie, producción y rendimiento de en las principales Comunidades Autónomas productoras de melón en España en 2012 (Fuente: MAGRAMA).

Las principales zonas productoras en España son Andalucía (Almería fundamentalmente) para producciones tempranas, fundamentalmente en invernadero, a continuación, entra en producción la zona de Murcia, con la mayor parte de producción al aire libre o con protección bajo microtúnel o bajo manta térmica y finalmente entra en producción Castilla - La Mancha, principalmente en la provincia de Ciudad Real.

En España, la superficie dedicada al melón aumentó progresivamente hasta alcanzar el máximo histórico de 73,400 ha en 1988. Desde entonces la superficie ha ido paulatinamente disminuyendo. Los rendimientos han ido en aumento desde 1,4 kg/m² en 1960, hasta estar por encima de 3 kg/m² en la actualidad, esto es consecuencia de la introducción de mejores variedades, así como unos sistemas de cultivo más especializados, que incluyen los sistemas forzados, las técnicas de fertirrigación y cultivo sin suelo, etc.

Una buena parte de estas producciones es destinada a la exportación fundamentalmente a países de Europa. Los últimos datos definitivos dados por FEPEX corresponden al 2014, con un

total 404 mil Tm que supusieron 256 M€, siendo los países compradores más relevantes Francia (78,9 M€), Alemania (54,9 M€), Reino Unido (30,2 M€), Países Bajos (28,2 M€) y Portugal (17,6 M€). Los datos provisionales de 2015 reflejan un aumento del valor de las exportaciones llegando hasta prácticamente 435 mil Tm que suponen 270 M€.

Por provincias, según los datos de FEPEX definitivos correspondientes a 2014, las exportaciones principales pertenecen a Murcia (209,8 mil Tm), Almería (73,4 mil Tm) y Valencia (38,4 mil Tm). Los datos aún provisionales de 2015 sitúan a Murcia con 230,5 mil Tm con más del 53% de la cantidad de melones exportados por España.

1.2.4. CULTIVO DEL MELÓN

Siembra y plantación

Aunque la siembra directa es factible, lo habitual es obtener la planta en semilleros especializados, lo que permite asegurar un cultivo homogéneo. Hay que considerar que para el óptimo desarrollo de la planta de melón se necesitan 24-30°C durante el día y 13-15°C durante la noche.

En semilleros se suele emplear como sustrato turba rubia mezclada con materiales porosos (perlita) en proporción del 20-30 % en volumen. La siembra se lleva a cabo en bandejas alveolares donde, una vez depositada la semilla, se cubre con vermiculita para evitar la pérdida de humedad (Gómez-Guillamón *et al.*, 1997). Conviene realizar algún abonado durante la fase de semillero, especialmente durante los últimos 20-30 días. La plantación se suele efectuar cuando la planta tiene 2-3 hojas verdaderas.

La planta utilizada suele ser sin injertar, tanto en los tipos piel de sapo, *Cantaloup*, amarillo y Galia. Los distintos ensayos de melón injertado sobre pies de calabaza no han prosperado porque el fruto es de peor calidad a la hora de la recolección. Asimismo, se han probado injertos de melón (variedades comerciales) sobre pie de melón resistente a plagas, enfermedades y condiciones desfavorables de suelo, pero los resultados no han sido demasiado buenos para el coste económico que conlleva.

Densidades y marcos de plantación

La densidad de plantación oscila entre las 8.000 plantas/ha en los tipos amarillo, *Charentais* o Galia, las 5.000 plantas/ha de piel de sapo en la provincia de Almería y las 3.500-4.000 plantas/ha en las provincias de Murcia, Ciudad Real y Toledo.

Esto viene a ser una distancia entre líneas de cultivo de 1,8 a 2 m y entre plantas de 0,7-0,8 m en caso de melón amarillo, Galia o *Charentais* o 1,2 - 1,6 m en caso de los tipos piel de sapo.

Sistemas de cultivo

Los sistemas de cultivo predominantes en las principales zonas productoras de melón en España son:

- Almería. Invernadero de plástico, trasplantes en enero-febrero, ciclos de 90 días entre trasplante e inicio de recolección.
- Murcia. Invernadero de plástico, túnel/tunelillo de plástico (microtúnel) o manta térmica, según la fecha de trasplante. De marzo-abril los ciclos son de 90 a 80 días.
- Castilla-La Mancha y Extremadura. Manta térmica o melón de «calle», sin ningún tipo de material de cobertura. De mayo a junio los ciclos son de 80-70 días desde trasplante a inicio de recolección.

Recolección

La recolección del melón suele iniciarse a los 75-90 días del trasplante, dependiendo de la zona de producción, sistema de cultivo y tipo/variedad de melón.

Entre la polinización-cuajado de frutos y el inicio de recolección suelen pasar entre 30 y 40 días, según el tipo y variedad de melón. El momento óptimo de recolección tiene mucha importancia, puesto que el contenido en azúcares no aumenta después de haber sido cortado el fruto, por lo que debe recolectarse completamente maduro. Normalmente la recolección la efectúa personal especializado.

Los síntomas aparentes de madurez del fruto son:

- Anillo de color marrón y pequeña hendidura alrededor del pedúnculo.
- Desaparición de la capa cerosa del fruto.
- Aparición de color amarillo en la parte inferior del fruto, la que está en contacto con el suelo, y color verde a marrón en la piel del fruto en caso de piel de sapo.
- Al golpear el fruto con el dedo se oye un sonido apagado.

Antes de recolectar una parcela se hacen controles previos de calidad de la fruta, como son muestreos de azúcar en la parte media de la pulpa, dureza de la pulpa, sensibilidad al desprendimiento del fruto del pedúnculo, aspecto externo de la fruta (forma, color, tamaño), aspecto interno de la fruta (aspecto y color de la pulpa, forma y distribución de la cavidad interna, grosor y consistencia de la pulpa), etc.

La recolección del melón es habitualmente semimecanizada. El corte del fruto por la zona peduncular se lleva a cabo de forma totalmente manual por empleados especializados, que previamente conocen la variedad para determinar el punto óptimo de madurez. A continuación, se deposita la fruta cosechada en una cinta de recolección, en cajas o suelta, que va desplazándose de forma mecánica al mismo ritmo que los recolectores y que el tractor/remolque, de forma que la fruta va al remolque y al almacén de confección/manipulación.

En otros casos, la fruta recolectada se deposita en cajas o piezas sueltas en las líneas de cultivo contiguas al carril o paso del tractor/remolque de recolección, desde donde de forma manual se pasan al remolque y de ahí al almacén de confección / manipulación.

1.2.5. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL MELÓN

Requerimientos generales

Las necesidades de agua y abono de la planta difieren en función de su estado fenológico. Durante la etapa de desarrollo radicular y hasta la floración, el fósforo cobra gran importancia, siendo convenientes riegos cortos y poco frecuentes para forzar el enraizamiento y la aparición de flores. Desde la floración al cuajado se deben evitar los excesos de nitrógeno para controlar el excesivo desarrollo vegetativo, los riegos serán cortos y regulares, evitando acumulaciones de humedad en el cuello de la raíz. Desde el cuajado de los frutos hasta su desarrollo completo se incrementa la demanda de agua y nutrientes, debiendo ser los riegos uniformes y abundantes.

Cuando los frutos alcanzan su tamaño y hasta su maduración se disminuyen esas necesidades, debiendo ser los riegos más espaciados y prestando especial atención al potasio de cara a lograr una óptima calidad del fruto. Demasiado nitrogenado durante esta fase aumenta el riesgo de rajado (Gómez-Guillamón, 1997).

Para el establecimiento de las necesidades hídricas del cultivo de melón en fertirrigación resulta muy útil la instalación de estaciones tensiométricas con dos tensiómetros por estación: Uno a máxima densidad radicular (20 cm de profundidad) y el otro por debajo de las raíces activas (45-55 cm). Los intervalos de potencial matricial medio a mantener en el tensiómetro situado a máxima densidad radicular, en el intervalo entre riegos, variarán entre 10 y 15 kPa para suelos arenosos, entre 15 y 20 kPa para suelos de textura media y entre 18 y 25 kPa en suelos de textura fina (Rincón, 1997). Las necesidades totales de agua para un cultivo de melón son dependientes de multitud de parámetros. Al aire libre existen datos que hablan de necesidades totales de agua en torno a 4.000 m³/ha (Castilla *et al.*, 1990).

En cuanto a la distribución del abono para un cultivo del sureste español bajo fertirrigación puede emplearse orientativamente los datos de la tabla 7, para unas necesidades totales de 300 UF/Ha de N, 200 de P₂O₅, 200 de K₂O, 100 de Ca y 60 de Mg (Rincón, 1991).

Estado fenológico	% N	% P ₂ O ₅	% K ₂ O
Nascencia-Aclareo	5	20	5
Aclareo-Floración inicial	15	50	15
Floración inicial-Cuajado inicial	15	30	15
Cuajado inicial-Engorde de frutos	35	-	30
Engorde de frutos-Maduración	30	-	35

Tabla 7. Distribución de fertilizantes NPK, para un cultivo de melón bajo fertirrigación.

En cualquier caso, es muy complicado establecer unos requerimientos nutricionales del melón, al ser un cultivo con tantos tipos diferentes y que se presenta bajo una enorme variabilidad de escenarios.

Fertirrigación en melón

Toda la superficie de cultivo protegido del melón, y más del 90 % de la cultivada al aire libre, utiliza el riego por goteo y la fertirrigación como técnica de cultivo, quedando en situación marginal las técnicas tradicionales con riego por inundación o las plantaciones de secano.

En el contexto económico actual, el objetivo de las explotaciones agrícolas es la obtención del máximo rendimiento, incluyendo la búsqueda de sistemas de cultivo más racionales y eficaces que los tradicionales. Son de sobra conocidas las ventajas que supone la fertirrigación localizada (ahorro de agua, fertilizante, mano de obra, labores culturales) a la vez que se incrementa el rendimiento de los cultivos (mayor producción, calidad y precocidad de las cosechas). Un adecuado manejo de estos sistemas incide en una plena disponibilidad para que las raíces puedan obtener el agua y los nutrientes esenciales para un crecimiento óptimo y armónico de acuerdo con el momento fenológico del cultivo (Alarcón, 2013).

Bajo fertirriego se tiene la posibilidad de poner directamente a disposición de la raíz una solución balanceada de nutrientes que se adapte a la demanda del cultivo o a los intereses determinados del proyecto agrícola. En fertilización, la herramienta nutricional que se tiene para manejar el balance vegetativo/generativo de un cultivo es la relación N/K, y dentro del N total, la proporción existente de N amoniacal. El correcto manejo de dicha relación permitirá contrarrestar los factores (fundamentalmente ambientales) y adaptar el cultivo a nuestros intereses de acuerdo a la etapa fenológica en la que se encuentre, sin tener que inducir situaciones de estrés superfluas en la plantación.

En cultivos con etapas fisiológicas claramente definidas, donde la fenología del cultivo no está solapada, como por ejemplo melón, generalmente se distinguen 4 fases que merecen un enfoque nutricional (relación N/K) diferente (Alarcón, 2013).

- I. Desarrollo vegetativo (vegetativa).
- II. Floración-cuaje (generativa).
- III. Engorde del fruto (media-vegetativa).
- IV. Maduración-cosecha (generativa).

Lo que resulta decisivo es definir una estrategia nutricional previa basada en este enfoque, aunque posteriormente la propia sintomatología de la plantación indicará si es oportuno, o no, llevar a cabo reajustes de la misma. En el caso del melón se definirían al menos 3 soluciones nutritivas (SN) (vegetativa, media y generativa): La vegetativa se emplearía en la I, la media en la III y la generativa tanto en la II como en la IV. Aunque estas últimas son etapas bien diferenciadas, los efectos que se desean provocar en la planta son idénticos, detención del crecimiento vegetativo, inducción de los procesos reproductivos y acumulación de azúcares en reserva.

Lógicamente, todos estos cambios nutricionales deben estar en concordancia con otros aspectos del manejo del cultivo, por ejemplo, el cambio a SN generativa para inducir una abundante floración y un cuajado efectivo no tendría sentido si no está asegurado el correcto funcionamiento de las colmenas de abejas en ese momento. A modo de ejemplo, y sabiendo que los niveles específicos dependen de multitud de factores, se podría proponer para un

cultivo de melón al aire libre las siguientes soluciones nutritivas en mM (Tabla 8) (Alarcón, 2017):

SN	N	P	K	Ca	Mg	S
Vegetativa	10	0,6	3	2-3	1-1,5	Mín 1
Media	8	0,4	4	2-3	1-1,5	Mín 1
Generativa	4	0,4	6	2-3	1-1,5	Mín 1

Tabla 8. Soluciones nutritivas para un cultivo de melón al aire libre.

1.2.6. CULTIVO SIN SUELO DEL MELÓN

El melón es una especie que se adapta bastante bien a las condiciones del cultivo hidropónico. La mayor parte del cultivo de melón bajo invernadero a lo largo de la costa sudoriental se realiza sobre suelo enarenado, con riego por goteo. Sin embargo, para algunos tipos de melón y cuando se dispone de personal especializado se utiliza también el cultivo hidropónico, con el que se mejora la uniformidad, se controla mejor la nutrición del cultivo y disminuyen los riesgos de enfermedades vasculares, lo que, en algunos casos, puede compensar el importante coste económico que supone. Como sustrato se emplea lana de roca o perlita, y como sistema de riego emisores de laberinto o membrana con microtubo y pinza de sujeción (Martínez y García, 1993).

Las superficies dedicadas a cultivo hidropónico en las provincias de Murcia y Almería están básicamente ocupadas por tomate, pepino y melón. La expansión de este tipo de superficies se debe fundamentalmente a la necesidad de aumentar la producción y mejorar la calidad en los cultivos de tomate y pepino, y de aportar una alternativa de lucha contra determinadas enfermedades del suelo, mal conocidas y, actualmente, no controlables por métodos químicos, sanitarios o de resistencia genética, en el cultivo del melón (Gómez, 1993).

En general, el melón da buen resultado en hidroponía, pudiéndose obtener producciones de 7-8 kg/m² el segundo o tercer año de experiencia, y llegando a los 10-12 kg/m² afinando el cultivo y en fechas favorables de plantación, entre el 15 de febrero y el 15 de marzo (Posadas, 1993). El melón Galia en manos de cultivadores expertos, en suelo virgen, de buena textura y bien abonado, también puede rendir 12 kg/m², ahora bien, se contaminará en poco tiempo, y los rendimientos bajarán hasta 7 kg/m² como mucho (Posadas, 1993). Escobar (1995) no encontró diferencias significativas entre la productividad de melón en enarenado o en cultivo sin suelo (lana de roca y perlita). Para cultivo sin suelo de melón tipo Galia se pueden tomar como valores aceptables de producción 5 kg/m² en cultivo rastrero y 8,5 kg/m² en cultivo entutorado (Posadas, 1993).

El primer desarrollo que tiene la planta hasta llegar al alambre del entutorado (a unos 2 metros del suelo), es muy rápido. Los frutos van cuajando de abajo hacia arriba, hasta que, llegado un punto, empiezan a abortar los frutos cuajados, esta vez de arriba abajo, hasta que la carga de frutos se equilibra con el porte de la planta y las condiciones ambientales. Este número puede

ser 6-8 para densidades de 1,6 plantas/m² y hasta 10-12 en plantaciones de 1,2 plantas/m² (Posadas, 1993).

La fusariosis vascular (agente causal *Fusarium oxysporum f. sp. melonis*) y el virus de las manchas necróticas del melón (MNSV) parecen ser las enfermedades más graves que afectan al cultivo sin suelo del melón (Gómez, 1993).

1.3. EL CALCIO COMO NUTRIENTE ESENCIAL

1.3.1. DINÁMICA DEL CALCIO EN EL SUELO

El contenido medio de calcio en la corteza terrestre es 3,64%, el quinto elemento más abundante. El calcio en el suelo se encuentra en varios minerales como silicatos aluminicos (feldespatos y anfíboles), fosfatos (apatitos), carbonatos (calcita y dolomita) y sulfato (yeso). El contenido en calcio de los diferentes tipos de suelo varía ampliamente dependiendo principalmente de los materiales de origen y del grado en que la meteorización y la lixiviación han influenciado el proceso de edafización. La meteorización de los minerales primarios ricos en calcio depende fundamentalmente de la presencia de hidrogeniones y agentes quelantes, que liberan el calcio de la estructura de los minerales, causando la disolución de los mismos. Igualmente, los protones son capaces de desplazar al calcio de sus posiciones en los coloides del suelo, favoreciendo su lixiviación bajo condiciones de clima húmedo (Makeyev y Berkgaot, 1989).

Una sustanciosa cantidad de calcio es adsorbido por los coloides inorgánicos y orgánicos del suelo. Este calcio cambiante es muy importante para la estructura, ya que el calcio provoca la floculación de los coloides del suelo, mejorando su estructura y estabilidad. La adsorción de los coloides orgánicos y, especialmente, a los ácidos húmicos es específica, de tal forma que estos se encuentran presentes principalmente como humatos de calcio. El calcio adsorbido a los coloides del suelo está en equilibrio con el calcio de la disolución del suelo. La mayoría de los suelos inorgánicos contienen elevadas cantidades de calcio en la disolución del suelo y sus zonas de cambio están bastante bien saturadas con calcio para satisfacer adecuadamente la demanda de los cultivos.

Bajos contenidos de calcio son comunes en suelos tropicales ácidos de zonas con elevada pluviometría. Las principales pérdidas de calcio en el suelo son debidas a los procesos de lixiviación y erosión, y las extracciones por los cultivos. La solubilización del carbonato cálcico, como la de otros minerales de calcio, así como la liberación del calcio de cambio depende de los procesos acidificantes del suelo. Es decir, el calcio es solubilizado por acción de los protones:

Las fuentes de protones en suelos son:

- CO_2 : El dióxido de carbono procedente del agua de lluvia, respiración de los microorganismos, descomposición de la materia orgánica, etc., al disolverse en la disolución del suelo forma ácido carbónico, incluso el mismo CO_2 disuelto actúa como ácido.
- Nitrificación: Otra fuente de protones muy común es la transformación de amonio en nitrato. El abonado con amonio, o la adición de materia orgánica favorece la lixiviación de calcio (Fenn y Wu, 1987). En suelos de cultivo, la nitrificación afecta más al lixiviado de calcio que la producción de CO_2 .

- Azufre: En suelos ricos en azufre orgánico, también puede haber una acidificación debida a la oxidación del azufre y formación de ácido sulfúrico. La adición de azufre como enmienda o fertilizante al suelo puede producir el mismo efecto.
- Raíces: Las raíces de las plantas son también capaces de aportar H^+ y ácidos orgánicos al medio y, así, contribuir a la acidificación de los suelos.
- Lluvia ácida: La quema de combustibles fósiles libera ácidos tales como sulfúrico, sulfuroso, nítrico y nitroso que vuelven de la atmósfera al suelo arrastrados por las lluvias. En contacto con el suelo estas lluvias disuelven minerales, al mismo tiempo que bajan el pH del suelo y producen la lixiviación del calcio (Majumdar y col., 1989).

Las principales aportaciones de calcio al suelo se llevan a cabo con la aplicación de fertilizantes cálcicos y sobre todo con el encalado, práctica habitual empleada en la corrección de suelos ácidos. La aplicación de sales agrícolas (óxido de calcio, hidróxido cálcico, carbonato cálcico, carbonato cálcico-magnésico y silicatos cálcicos) al suelo tiene dos efectos: Suministran Ca^{+2} e inducen un incremento del pH del suelo debido a su reacción alcalina. Sobre suelos donde no es deseable un aumento del pH, pero donde el Ca^{+2} es necesario para mejorar la estructura del suelo se aplican sales neutras de calcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$). Estos suelos suelen ser salinos caracterizados por un pH neutro a alcalino y por un exceso de Na^+ . Con la aplicación de sales neutras se reemplaza el Na^+ adsorbido por el Ca^{+2} , aumentando así la saturación de Ca^{+2} de los coloides del suelo, induciendo su floculación y mejorando la estructura del suelo, favoreciendo la lixiviación de las sales sódicas solubles (Mengel y Kirkby, 1987; Frenkel y col., 1989).

1.3.2. EL CALCIO EN EL AGUA DE RIEGO

El agua es conocida como el disolvente universal, ya que casi todas las sustancias son solubles en agua en alguna extensión. La solubilidad de una determinada sustancia en agua es controlada por variaciones de temperatura, presión, pH, potencial redox y las concentraciones relativas de otras sustancias en disolución. El CO_2 , es muy reactivo en agua y tiene una particular importancia en la disolución y precipitación de las sales. El agua absorbe cierta cantidad de CO_2 del aire, pero mayores cantidades son procedentes de la descomposición de la materia orgánica que el agua arrastra al pasar a través del perfil del suelo. Bajo presión, como sucede en aguas subterráneas, la concentración de CO_2 se incrementa hasta formar ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido débil, puede disolver fácilmente compuestos minerales tales como el carbonato cálcico, muy abundante en el caso de acuíferos subterráneos que proveen de agua a gran número de nuestras zonas de cultivo, para formar bicarbonato cálcico que es soluble en agua. Este proceso permite al carbonato cálcico ser disuelto, transportado y, bajo ciertas condiciones, ser redepositado de nuevo como carbonato cálcico.

El carbonato cálcico es el constituyente más común de las incrustaciones, generalmente en la forma mineral de calcita, que se forma a las temperaturas comunes dentro de los sistemas de fertirrigación, debido a que las aguas que manejamos frecuentemente contienen cantidades significativas de bicarbonato cálcico y teniendo un pH superior a 7, poseen un riesgo potencial de inducir obstrucciones. Cuando un agua de pozo es bombeada a la superficie y descargada a través del sistema de riego, la temperatura, la presión y el pH de la misma, a menudo cambian.

Esto puede inducir la precipitación de carbonato cálcico u otros minerales que forman incrustaciones en las superficies internas de los componentes del sistema de riego. Además, la evaporación producida a la salida del agua de los emisores concentra las sales en solución favoreciendo enormemente la precipitación y, en consecuencia, la obstrucción de los mismos.

La propia técnica de fertirrigación puede también contribuir a los problemas de ensuciamientos y obstrucciones de redes de riego y emisores, ya que se aportan fertilizantes minerales que no son más que sales solubles que contiene elementos nutritivos necesarios para el cultivo. Generalmente el elemento adicionado que puede inducir mayores problemas de precipitaciones es el fósforo, concretamente por la posible formación de fosfatos de calcio. A pH superior a 7, la mayor parte del fósforo en solución se encuentra como ion monohidrógeno fosfato (HPO_4^{2-}), este ion se une al calcio formando CaHPO_4 , que es muy poco soluble en agua. Por el contrario, a pH 6, la mayor parte del fósforo disuelto se encuentra como ion dihidrógeno fosfato (H_2PO_4^-), que al unirse al calcio forma $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, compuesto de muy elevada solubilidad.

1.3.3. ABSORCIÓN, TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DEL CALCIO EN LA PLANTA

El calcio es absorbido por las regiones jóvenes (insuberrizadas) de las raíces de las plantas como Ca^{+2} . Su concentración en la planta puede variar desde 0,1% hasta porcentajes superiores al 5%, dependiendo de la especie vegetal, condiciones de cultivo y del órgano de la planta considerado, si bien es cierto, que los requerimientos de calcio para monocotiledóneas son muy inferiores a los de dicotiledóneas. En las plantas jóvenes, se encuentra preferentemente en el protoplasma y en las membranas celulares, mientras que, en las adultas, se encuentra principalmente en vacuolas, formando oxalato cálcico. Se encuentra en mayor proporción en hojas y tallos que en semillas y frutos (Lucena, 1992).

Sus contenidos dependen directamente del calcio asimilable presente en el entorno radical y de la presencia de otros cationes en la disolución (que interaccionan en su absorción). Los altos contenidos presentes en plantas superiores están más relacionados con los elevados niveles presentes en la disolución del suelo que con la eficacia del mecanismo de absorción cálcica por las células de la raíz (Kazda y Weilgony, 1988).

El calcio en la planta se encuentra tanto en forma mineral soluble (sulfato cálcico) como mineral insoluble (formando fosfatos y carbonatos) y especialmente en forma orgánica (oxalatos y pectatos). A pesar de que el calcio es absorbido en grandes cantidades y su contenido en los tejidos vegetales es elevado, la concentración de Ca^{+2} libre en el citoplasma y los cloroplastos es muy baja, del orden de 1 μM (White, 2000; Dodd y col.; 2010).

El calcio, una vez incorporado dentro de los tejidos de la planta, es inmóvil, así pues, es necesario un aporte constante para el crecimiento. Las concentraciones de calcio son elevadas en hojas viejas, de este modo, es en las más jóvenes donde aparecen los primeros síntomas de deficiencia.

El tejido vascular de la planta está formado por los vasos del xilema y los del floema. Los vasos del xilema son responsables de conducir el agua y los nutrientes disueltos desde las raíces hasta

las hojas. La pérdida de agua desde la masa foliar bajo el proceso de transpiración crea una succión que arrastra el agua hacia arriba por los vasos xilemáticos y alrededor de toda la planta. El floema es el sistema de transporte de azúcares, donde los azúcares sintetizados durante la fotosíntesis son transportados a las regiones que requieren asimilados, tales como extremidades de raíces, frutos y puntos de crecimiento de las hojas.

Una vez que los iones calcio son tomados por las regiones jóvenes de la raíz, progresan célula a célula hasta alcanzar los conductos del xilema, una vez allí, se movilizan pasivamente dentro del torrente de savia bruta. Una marcada influencia en la distribución y asimilación final del calcio tienen el tipo de transportadores y la morfología y grado de suberización de las células de la raíz (Kudla y col., 2010; Conn y col.; 2011).

Como el calcio es transportado principalmente en el xilema, cualquier factor que influya sobre la pérdida de agua en la planta (y, por tanto, el flujo xilemático) o el tejido del xilema en sí mismo, afectará la nutrición cálcica. El calcio, siendo un elemento relativamente inmóvil, sigue el flujo de transpirativo del agua y de esta manera, se trasloca más lentamente a órganos que mantienen una baja relación transpirativa, tales como frutos y hojas encerradas o en expansión, que a hojas con elevada actividad transpirativa. Por esta razón, los desórdenes relacionados con deficiencia de calcio tienden a ocurrir en frutos y hojas en crecimiento (Battey, 1990; Taylor y Locascio, 2004; Hocking y col., 2016).

La dificultad de absorción del calcio (de forma pasiva) y su transporte (vía xilema), sin prácticamente translocación, le hacen muy susceptible a carencias locales y estacionales. Su toma por la raíz se ve afectada por la concentración salina de la disolución principalmente debida al antagonismo con el ion sodio (Cramer y col., 1989), y el efecto competitivo debido a elevadas concentraciones de otros cationes rápidamente tomados por la raíz como K^+ , Mg^{+2} , NH_4^+ , e incluso iones H^+ o Al^{+3} (Wilkinson y Duncan, 1993) y factores que afectan la transpiración de la planta como temperatura del suelo/sustrato, estado hídrico del suelo, vigor radicular, humedad relativa, viento, cultivar seleccionado, etc. (Wiersum, 1979b).

Una deficiencia de boro parece inducir una ligera mayor extracción de calcio o apenas afectarla, aunque inhibe significativamente su traslocación y su distribución en el interior de la planta y provoca cambios anormales en el metabolismo del calcio en la pared celular (Ganmore-Neumann y Davidov, 1993).

Una vez incorporado a la savia bruta, como se ha dicho, se dirige preferentemente a las partes de la planta de mayor transpiración, de este modo cuando la transpiración es intensa y la entrada de calcio insuficiente, los órganos de menor índice de transpiración (frutos y hojas jóvenes) presentan una carencia localizada de este elemento, ya que el calcio apenas se retransporta vía floema, ello provoca la aparición de trastornos nutricionales tales como el "blossom end rot" en tomate, pimiento y sandía, "bitter pit" en manzana, "tipburn" en lechuga, "encamado" en tulipanes, "blackheart" en apio y "vitrescencia" en melón debidos, más que a una baja absorción, a la limitada capacidad de las plantas para regular la distribución interna de calcio en relación con la demanda de órganos de baja transpiración (hojas de rápido crecimiento, tubérculos, frutos, tejido vegetal encerrado) (Kirkby and Pilbeam, 1984; Bangerth, 1979). Es decir, para que los requerimientos de crecimiento de un órgano se alcancen, la mayor parte del calcio ha de ser aportada vía xilema, de este modo puede que sea más eficaz, para

aumentar el contenido de calcio en frutos, el ritmo de transpiración que su incremento en el medio de nutrición (Marschner, 2012). Al contrario, en órganos como las hojas internas de repollos o lechugas, puede producirse un descenso en la incorporación del calcio cuando la transpiración es alta, ya que esta se centra mayoritariamente en las hojas externas y hacia allí se dirigen la mayor parte del flujo del xilema (Wiebe y col., 1977).

El transporte de calcio a través de los vasos xilemáticos está controlado, además de por el flujo de masas asociado al proceso de transpiración, por la densidad de carga negativa en las paredes celulares de los vasos, la concentración de otros cationes en el xilema y la capacidad de las células adyacentes de eliminar calcio de los sitios intercambiables del interior de los vasos del xilema (Hanson, 1984). La escasa movilidad del calcio en el interior de la planta es debida a su capacidad de formar complejos insolubles y de formar enlaces en las paredes celulares (Marschner, 2012).

Respecto a la distribución del calcio en frutos, es conocido que la concentración en la corteza adyacente al tallo en sandía se incrementa durante el desarrollo del fruto, esto indica que el calcio importado al fruto es primero depositado en el extremo del tallo y que el transporte a la parte del fruto más alejada del tallo puede ser impedida (Scott y col., 1993). Este gradiente de concentración desde la parte del tallo a la zona apical del fruto, también se ha observado en pepino (Frost y Kretchman, 1989) y en kiwi (Clark y Smith, 1991). Además, una adecuada nutrición en boro favorece esta traslocación del calcio desde el extremo del tallo hasta el extremo apical del fruto (Combrink, 1995). En kiwi, el calcio total es acumulado durante los primeros estadios de crecimiento del fruto (Clark y Smith, 1991). Siendo los niveles de calcio encontrados en kiwis mucho más elevados que en frutos sensibles a la deficiencia cálcica como la manzana (Turner, 1980).

Durante el cuajado de los frutos la tasa de transpiración está en su máxima expresión, por ejemplo en kiwis puede ser tan alto como $2,3 \text{ mM} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, pero rápidamente disminuye a casi la décima parte de este valor durante el desarrollo del fruto, mientras que la transpiración de la hoja se mantiene en valores estables siempre por encima de $10 \text{ mM} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Montanaro y col., 2014). Es durante las primeras etapas de desarrollo de los frutos cuando se entrega la mayor parte de Ca^{+2} a los mismos (Tilbrook y Tyerman, 2009; Montanaro y col., 2012). A diferencia de Ca^{+2} , que es solo móvil vía, el K^{+} es móvil tanto por el xilema como por el floema, con concentraciones de K^{+} en el floema de hasta diez veces respecto a las que se encuentran en el xilema (Hocking, 1980). Por ejemplo, en uva, la acumulación de potasio se produce durante el desarrollo de la baya, alcanzando una tasa de absorción máxima durante el post - envero, con continuidad de la captación durante la maduración (Rogiers y col., 2006b), mientras que el contenido en calcio no aumenta después del envero (Rogiers y col., 2006a).

En la mayoría de las especies, el suministro de agua, azúcar e insumos nutricionales básicos durante las últimas etapas de la maduración del fruto se produce principalmente a través del floema (Drazeta y col., 2004; Rogiers y col., 2006b; Choat y col., 2009). Dado que el Ca^{+2} tiene una movilidad baja del floema, la acumulación de calcio en los órganos de los sumideros aéreos, tales como los frutos, depende de su administración por el xilema (Rogiers y col., 2000). La baja movilidad del Ca^{+2} en el floema puede crear una situación que conduce a deficiencias localizadas de calcio en la fruta.

Tras el cuajado y crecimiento rápido del fruto, se produce una gran caída de la conductancia hidráulica del xilema, que resulta una fuerte reducción o bloqueo en la importación del calcio (Rogiers y col., 2006b; Tilbrook y Tyerman, 2009; Choat y col., 2009; Plavcova y col., 2011; Mazzeo y col., 2013; Knipfer y col., 2015).

Así pues, las altas temperaturas y la baja humedad relativa inducen deficiencias de calcio manifestadas en los frutos por el aumento desmesurado de la transpiración en hojas, por el contrario, en las épocas frías, las bajas temperaturas y elevada humedad relativa provocan deficiencias cálcicas manifestadas, ahora, preferentemente en hojas, debido a la ralentización del proceso de transpiración (Adams y Hand, 1993; Clearwater y col., 2012).

En situaciones de transpiración reducida, el flujo del xilema depende, sobre todo, de la presión radicular, por lo que la absorción cálcica dependerá de la disponibilidad de agua en el entorno radicular. Por esta razón en soluciones salinas con elevada presión osmótica, se reduce el transporte de calcio originando los trastornos nutricionales ya citados (Bradfield y Guttridge, 1984). Este hecho explica la elevada presencia de alteraciones debidas a falta de calcio en tomates y pimientos en el sureste español, en cultivos protegidos.

El calcio se absorbe y transporta en forma iónica, y su movilidad es mucho mayor en el apoplasto que en el simplasto (Russell y Clarkson, 1976). El calcio, como catión Ca^{+2} , entra en el apoplasto (canales entre paredes celulares y células adyacentes) y es ligado en forma intercambiable en las paredes celulares y en la superficie interior de la membrana plasmática. El ritmo de entrada al citoplasma está muy restringido y poco asociado a procesos metabólicos. La movilidad de célula a célula es muy baja, así como en el floema (Lucena, 1992; Hocking y col., 2016). De esta forma, el calcio absorbido por las raíces es transportado en la corriente transpiratoria y depositado fundamentalmente en las hojas, donde el contenido en este elemento aumenta gradualmente con la edad. Gran parte del calcio se acumula en las vacuolas y, de este modo, es inactivo desde el punto de vista metabólico. El calcio acumulado en las vacuolas puede estar en forma soluble neutralizado por aniones orgánicos (malato) o inorgánicos (nitratos), o bien precipitado en forma de oxalato y/o fosfato. La acumulación de calcio en las hojas por encima de las necesidades nutritivas de la planta no implica necesariamente que los órganos de baja transpiración, y que reciben los nutrientes básicamente por el floema, como son los frutos, hojas en desarrollo y tubérculos, reciban una cantidad adicional de este elemento.

Existen una serie de mecanismos de regulación que mantienen la concentración de calcio en el floema a niveles bajos, y cuando el crecimiento de los órganos descritos es rápido, la concentración de calcio en los mismos puede caer por debajo del nivel crítico necesario para mantener la integridad celular (Duarte y Guardiola, 1995).

1.3.4. FUNCIONES DEL CALCIO EN LA PLANTA

El papel del calcio en las plantas incluye muchos factores, gran número de los cuales están sólo relacionados con el valor nutritivo del elemento de forma indirecta (Poovaiah, 1988). El calcio, salvo quizá el boro, es el único nutriente que ejerce su función, principalmente, fuera de la célula vegetal. Su acción, como puente intermolecular, se desarrolla preferentemente en

paredes celulares y membranas plasmáticas. Presenta, fundamentalmente, funciones estructurales, de fortalecimiento de las paredes celulares, y de control de la permeabilidad e integridad de la membrana (Hepler y Winship, 2010). En las vacuolas, el calcio se encuentra precipitado, en forma de oxalato y fosfatos cálcicos. Igualmente, el calcio soluble está mayoritariamente en vacuolas y asociado a aniones orgánicos, como malato o inorgánicos como nitrato.

Una de las principales funciones del calcio en la planta es la de actuar formando parte de la estructura de la protopectina de la lámina media y la pared primaria celular, como agente cementante (pectato cálcico) para mantener las células unidas. El calcio se localiza en la zona fronteriza entre el citoplasma y la pared celular, con altos contenidos en el plasmalema. El calcio situado en la parte más interna de las paredes celulares, en contacto con el plasmalema, estabiliza las membranas celulares, disminuyendo su permeabilidad, impidiendo la difusión de los componentes citoplásmicos y regulando la selectividad de la absorción iónica. El calcio estabiliza las membranas enlazando grupos fosfato y carboxilato de fosfolípidos y proteínas, preferentemente en la superficie de las membranas. Puede haber un intercambio entre el calcio y otros cationes como K^+ , Na^+ o H^+ por los lugares de fijación, pero estos no pueden hacer de puentes y por tanto desestabilizan las membranas. Incluso el ion divalente magnesio no puede reemplazar al calcio en esta función.

En la lámina media, el calcio se encuentra unido al complejo de proteínas y pectinas, al que confiere resistencia frente al ataque por poligalacturonasas, enzimas responsables de su hidrólisis (Cabanne y Doneche, 2001). Niveles bajos de calcio en esta zona reducen su resistencia a la degradación enzimática, y un síntoma característico de la deficiencia en calcio en algunos tejidos es la desorganización de las paredes celulares y el colapso de los tejidos afectados (Battey, 1990; Hocking y col., 2016). En este sentido, los tratamientos con calcio se muestran efectivos como opción de control de algunos patógenos tipo *botrytis* en frutas (Osorio y col., 2008; Dayod y col., 2010).

El calcio está involucrado en la división y elongación celular (Hepler y Wayne, 1985; Dodd y col., 2010). Si no se suministra un adecuado nivel de calcio durante la formación de las células, la estructura del tejido empieza a ser menos estable y más propensa a desintegrarse. Este elemento es el componente mayoritario de las paredes celulares de toda la planta, de ahí su importancia en el soporte del tejido de la misma. También es necesario para el crecimiento del tubo polínico (Jiang y col., 2005; Rounds y col., 2011; Konrad y col., 2011) que, además, es orientado quimiotrópicamente por los gradientes de calcio en el medio (Steer y Steer, 1989).

El calcio modula la actividad de más de 150 proteínas diferentes (Moncrief y col., 1990), como son α -amilasa, fosfolipasas, NAD-quinasa, dehidrogenasas, polimerasas y ATPasas, en general, enzimas asociados a las membranas. También se han hallado efectos inhibidores de calcio sobre varios enzimas del citoplasma y de los cloroplastos (Gavalas y Manetas, 1980), de ahí que el mantenimiento de una baja concentración citoplasmática de calcio (10^{-6} - 10^{-8} M) sea vital para las células vegetales (Evans, 1988). También de esta manera se impide la precipitación de fosfatos (fosfatos de calcio) y la competencia con magnesio por los sitios de unión (Hepler y Wayne, 1985).

La función más importante del calcio citoplásmico puede ser comprendida de forma relacionada con la calmodulina, un polipéptido cuya función fue puesta de manifiesto por Cheung en 1980, que es activada por el calcio y que, a su vez, activa otras proteínas (Allan y Hepler, 1989). La calmodulina es capaz de unir 4 iones de calcio formando una estructura compacta por cambio de conformación y cambiando de sitio una sección hidrofóbica de la cadena polipeptídica. Esta parte hidrofóbica del complejo Ca-calmodulina puede ser adsorbida por proteínas enzimáticas y puede activar por inducción alostérica enzimas claves del metabolismo.

Actualmente se conoce que el calcio intracelular juega un papel esencial en la regulación del metabolismo en plantas y animales (Wagner y col., 2016). Existen evidencias de que procesos como el bombeo de protones a la membrana plasmática (Schaller y Sussman, 1988), la producción de calosa (Kauss, 1987), la polimerización y depolimerización de la actina (Kohn y Shimmen, 1988) y la regulación de la actividad enzimática antes mencionada (Hepler y Wayne, 1985; Gilroy y col., 1987), son regulados por los niveles de calcio intracelular. Incluso existe la hipótesis de que los desórdenes relacionados con la deficiencia de calcio se desencadenan a raíz de los desarreglos metabólicos causados en el interior de las células con niveles bajos de calcio, niveles que, a su vez, se encuentran regulados por la presencia de calcio extracelular (Battey, 1990).

El calcio es muy importante en el desarrollo de raíces (a nivel de multiplicación y crecimiento celular y neutralización de los hidrogeniones). La presencia cálcica es esencial para un buen crecimiento, en densidad y longitud, de los pelos radiculares que son fundamentales para la absorción de nutrientes (Jaunin y Hofer, 1988). También la deficiencia cálcica interfiere con los procesos fotosintéticos causando importantes reducciones en la eficacia de la carboxilación y capacidad fotosintética, lo que conlleva a descensos notables en la producción de biomasa de las plantas afectadas (Ramalho y col., 1995).

Además, el calcio es esencial desempeñando las siguientes funciones:

- Regula la absorción de nitrógeno.
- Actúa en el transporte de azúcares y proteínas en el interior de la planta.
- Neutraliza ácidos orgánicos (oxalato cálcico).
- Amortigua los efectos nocivos debidos al exceso de otros cationes como potasio, sodio o magnesio. De ahí sus efectos positivos en condiciones de salinidad, fundamentalmente debida al ion sodio (Nakamura y col., 1990; Ortiz y col. 1994) o ante excesos de aluminio o metales pesados (Hawkins y Lewis, 1993).
- Favorece la formación de nódulos en las leguminosas.
- Participa en la economía hídrica de la planta (papel contrario al potasio, al tender a disminuir la absorción de agua), regulando el movimiento de agua en las células (Conn y col., 2011; Wang y col., 2014). Existen evidencias de que el calcio actúa como transductor de señales (Roberts y Harmon, 1992; Gilliam y col., 2011), particularmente,

en la expresión de genes específicos y de nueva síntesis proteica bajo situaciones de estrés hídrico, resultando como consecuencia, un incremento de la tolerancia al déficit hídrico (Funkhouser y col., 1993).

El calcio tiene un importante papel en los procesos metabólicos que afectan a la maduración y almacenamiento de los frutos, cuando está presente en cantidades inadecuadas hay considerables pérdidas de calidad durante la postrecolección de los frutos, por lo que se emplean comúnmente aplicaciones de sales cálcicas al fruto, antes y después de la cosecha, para mantener la firmeza de la pulpa durante el período de almacenaje (Kirkby y Pilbeam, 1984; Poovaiah y col., 1988; Bhat y col., 2012; Wojcik y Borowik, 2013). Algunos síntomas típicos de senescencia son similares a aquellos de deficiencia de calcio y pueden ser retardados si se añade este elemento. Estos síntomas incluyen una rotura de la compartimentación de la célula y un incremento en la respiración seguida de fugas de sustratos respiratorios endógenos de las vacuolas hacia los enzimas respiratorios en el citoplasma (Bangerth y col., 1972).

A este respecto, Lester (1996) investiga la regulación de la senescencia de frutos de melón tipo Galia por el calcio. En su estudio, sumerge discos del mesocarpio del fruto en soluciones de cloruro cálcico durante 10 días, a 22 °C y en la oscuridad. Se comprueba que la pérdida de clorofila se retrasa y que el porcentaje de pérdida de fosfolípidos de la membrana plasmática, de proteínas y de actividad H⁺-ATPasa es menor en los tratamientos de calcio que en los testigos.

Además, las aplicaciones de calcio reducen los daños causados por el frío durante el almacenamiento. Esto se ha comprobado en achicoria (Van Saane y Van Kruistum, 1987), cítricos (Slutzky y col., 1981), manzanas (Kramer y col., 1991) y plátano (López y Marrero, 1995).

Por tanto, el calcio desempeña un papel principal en la compartimentación celular y especialmente sobre la permeabilidad de la pared celular. La pérdida de permeabilidad de las membranas conduce a la destrucción del tonoplasto y de la membrana citoplasmática. En plantas completas, el desorden tiene lugar primero en zonas meristemáticas tales como puntas de la raíz, puntos de crecimiento de la parte superior de la planta y órganos de almacenamiento. Compuestos melánicos marrones, resultantes de oxidaciones polifenílicas, están asociados con tejidos deficientes. Dekock y col. (1975) proponen que, en tejidos con los niveles adecuados de calcio, esta oxidación es inhibida por la quelación de los compuestos fenólicos por el calcio.

1.3.5. DESÓRDENES RELACIONADOS CON UNA DEFICIENCIA DE CALCIO

Una vez depositado en las hojas, el calcio es inmovilizado y los síntomas de deficiencia tienden a desarrollarse en hojas jóvenes tan pronto como el suministro decae. Unos inadecuados niveles de calcio en la disolución nutritiva provocan la muerte anticipada de regiones meristemáticas (puntas de crecimiento) de tallos y raíces, mientras sucede una malformación de hojas jóvenes, donde las puntas se retuercen en forma de gancho como síntoma característico. Las hojas pueden mostrar clorosis marginales y esas áreas progresivamente comienzan a necrosarse. El tejido afectado se ablanda debido a la disolución de las paredes

celulares, se producen sustancias pardas que se acumulan en los espacios intracelulares y en el tejido vascular donde pueden afectar al mecanismo de transporte.

A nivel celular, la deficiencia de calcio provoca necrosis del plasmalema y ruptura del tonoplasto o membrana vacuolar, proliferación de vesículas, alteración de la estructura de orgánulos citoplasmáticos como mitocondrias y cloroplastos, presencia de gran contenido de almidón en cloroplastos, presencia de inclusiones cristalinas en algunos cloroplastos y ennegrecimiento general de los tejidos (De Felipe y Sánchez, 1984). Síntomas similares ya fueron observados con anterioridad (Pozuelo, 1982).

En plantas de tomate, los síntomas han sido descritos como hojas superiores de color verde oscuro, las cuales comienzan a amarillear en los bordes. El tejido intervenal clorótico, con hojas que se muestran fuertemente curvadas hacia abajo y hacia adentro, es otro signo de deficiencia cálcica. En plantas de tomate, los ramilletes de frutos pueden ver disminuido su cuajado y se seca la parte distal de los frutos. En ausencia de calcio, las raíces no crecen adecuadamente, a menudo se tornan color marrón y aparecen achaparradas, la presencia de magnesio parece acrecentar este efecto.

La degeneración del ápice de frutos jóvenes (blossom end rot) es un síntoma común de deficiencia cálcica en tomates y pimientos, mientras que áreas necróticas en los márgenes de hojas (tip burn) indican una carencia de calcio en lechugas, como enfermedades más relevantes.

Los desórdenes de deficiencia cálcica, los cuales pueden o no ser resultado de un inadecuado contenido en la disolución nutritiva, ocurren a menudo o se desarrollan más severamente, en las regiones más distales de los órganos afectados. El desorden de las manzanas almacenadas, bitter pit, es frecuentemente más intenso hacia el extremo del cáliz de los frutos (Perring, 1986). Desórdenes que se desarrollan durante el crecimiento activo de los tejidos del fruto (blossom end rot) son encontrados en los extremos distales de tomates y pimientos, mientras que, en fresa, lechuga y col china, los síntomas de deficiencia cálcica ocurren en los extremos de hojas en expansión (tip burn). Esto puede ser el resultado de un menor desarrollo xilemático, de esta manera, menor cantidad de agua rica en calcio es trasladada a estas regiones, y/o la operación de transporte es más inefectiva debido a factores como una reducida transpiración (Battey, 1990).

Existe la posibilidad que la deficiencia de calcio durante los inicios del crecimiento de la planta pueda directamente retardar la diferenciación del xilema, lo que reduciría el transporte de calcio y comenzaría a incrementarse la deficiencia de este elemento en los tejidos (Battey, 1990). Esto se ha sugerido para plantas de tomate creciendo en condiciones de elevada salinidad, en la que parece reducirse el desarrollo del xilema (Ehret y Ho, 1986). También es destacable el papel que juegan las auxinas en la formación de tejido vascular, dado que la mayor parte del calcio se mueve por el xilema, son lógicos los efectos ejercidos por las auxinas sobre el movimiento del calcio (De Gúzman y De La Fuente, 1984 y 1986; Ho y Adams, 1994).

Shear (1975) cita una lista de 35 desórdenes relacionados con calcio en frutos y vegetales, siendo bien conocidos además de los mencionados tip burn de la lechuga, podredumbre apical (blossom end rot) del tomate, pimiento y sandía y los nódulos amargos (bitter pit) de la

manzana, la vitrescencia en melón, el corazón negro del apio (blackheart), el rumple del limón, el amarronamiento interno (internal browning) de coles de bruselas, los hoyos manchados (cavity spot) de zanahorias y el centro marrón (brown centre) de la patata (Alarcón y col., 1996; Madrid y col., 1996). Todos estos tejidos son provistos de calcio principalmente a través del flujo de transpiración que transporta calcio directamente de la disolución.

El calcio parece solamente ser transportado desde la disolución a las partes superiores de la planta a través de los ápices radiculares (Russell y Clarkson, 1976). Cualquier factor que impida el crecimiento de nuevas raíces, (aireación pobre, temperaturas bajas, etc.), puede inducir la deficiencia. Esto puede explicar que desórdenes relacionados con el calcio se produzcan a menudo en suelos adecuadamente provistos de calcio, y que las condiciones agroclimáticas puedan ser el factor decisivo (Bangerth, 1979, Kirkby, 1979). La limitada capacidad de las plantas para regular la distribución interna de calcio, particularmente hacia los órganos de baja transpiración y rápido crecimiento, propicia la aparición de la deficiencia cálcica en los frutos, ello se acrecienta por la elevada relación Mg/Ca (hecho frecuente en las aguas de riego procedentes de pozo en el sureste español) debido a la competencia que ejerce y a la capacidad que tiene el magnesio para interferir la asimilación de calcio (Valverde y col., 1997).

Tip Burn

El tip burn puede darse en numerosos cultivos hortícolas, siendo más común en lechuga, particularmente las variedades acogolladas. El tip burn ha sido observado en col, como un amarronamiento de los bordes de algunas de las hojas del cogollo, las cuales no pueden ser vistas al cosecharse, pero que se muestran cuando son cortadas. También ha sido observado en espinaca y acelga. En apio se denomina “blackheart” (corazón negro) (Wood, 1993).

Es observado en lechuga comúnmente durante los días cálidos de primavera y verano (Bes y Weston, 1991). La causa del tip burn (como la del resto de desórdenes tratados) es una carencia de calcio en las hojas afectadas, pero que usualmente no es resultado de un bajo aporte de calcio en la disolución nutritiva. El problema es frecuentemente causado cuando el cultivo tiene un período de baja extracción de calcio y seguidamente un rápido crecimiento.

Tanto en el tip burn normal (que afecta a hojas jóvenes y centrales del cogollo), como en el tipburn marginal (que afecta a las hojas exteriores), parte del tejido foliar se seca y cae. Los daños son causados cuando la masa foliar pierde agua por transpiración más rápidamente que las raíces puedan tomarla, con elevada humedad y condiciones de baja pérdida de agua y cuando el torrente transpirativo, en el que el calcio es transportado, se restringe. La mayoría de veces el tip burn es observado cerca de la recolección, constituyendo un serio problema. En variedades acogolladas, la transpiración de las hojas expandidas dentro de la cabeza es limitada por las hojas de alrededor, especialmente bajo condiciones de elevada humedad, el tip burn puede ser intenso.

Blossom end rot (BER)

El BER ha sido descrito en todas las áreas de cultivo de tomate del mundo. La fisiopatía es comúnmente atribuida a numerosos factores como estrés hídrico, deficiencia cálcica, elevada salinidad, desequilibrios de nutrientes en la disolución, condiciones ambientales desfavorables o una combinación de estos factores. La primera descripción del BER se debe a Plowright (1881), que se refirió a este desorden como “mancha negra” (black spot).

Como ocurría con el tip burn, el BER de los frutos, es más frecuentemente el resultado de condiciones ambientales e internas de la planta, que una consecuencia directa de insuficiente nivel de calcio en la disolución nutriente. En realidad, el BER está asociado a estados carenciales de calcio en el fruto, mientras que los niveles en disolución nutriente del elemento pueden ser más que suficientes.

El BER aparece inicialmente como una región reseca alrededor de la cicatriz estilar, la cual, gradualmente, se torna color marrón oscuro y comienza a mostrarse como un área deprimida, en la que los tejidos afectados pierden su contenido acuoso. Esta muerte tisular, a menudo induce maduración prematura de los frutos, es decir, bajo condiciones favorables para el desarrollo del BER, los primeros frutos madurados en la planta tienden a estar afectados por la fisiopatía, incluso pequeños frutos inmaduros, pueden mostrar una coloración relacionada con la madurez.

Está demostrado, que la incidencia del BER está determinada por el correcto suministro de calcio durante el desarrollo de los frutos, niveles bajos del mismo en la disolución nutritiva antes del desarrollo de los frutos, tienen muy poco o ningún efecto sobre este desorden. Así pues, la aparición del BER estaría relacionada con un descenso en el suministro de calcio al fruto durante la etapa de fructificación (Coolong y col.; 2014; De Freitas y Mitcham, 2014).

Prácticamente, nada de calcio es translocado a los frutos desde las hojas adyacentes, de este modo, hay que prestar especial atención a la nutrición cálcica durante la fase de fructificación. Esto significa que el análisis del calcio foliar tiene un valor limitado de cara a diagnosticar si los frutos poseen un adecuado nivel del elemento, excepto bajo condiciones de deficiencia extrema. La determinación del estado del calcio en los frutos es el mejor indicador en el diagnóstico del BER (Morgan, 1998). La fumigación con una disolución de nitrato cálcico al 0,2% puede reducir el problema, si bien, los frutos verdes deben recibir la aplicación, si esta es realizada solamente sobre las hojas, no se obtendrá ningún efecto beneficioso.

Peterson y Willumsen (1992), establecieron que el BER es el resultado de un desequilibrio en el transporte de azúcares, nitrógeno, fósforo y potasio por el floema, y el transporte de calcio por el xilema hasta los frutos, causando una desintegración de membranas celulares en la parte distal del fruto, teniendo en cuenta que un suficiente nivel de calcio es necesario para mantener una correcta permeabilidad de las membranas celulares. Este desequilibrio puede producirse por un incremento del transporte floemático debido al aumento del proceso fotosintético (causado por una brusca elevación de la radiación solar) o por una disminución del transporte xilemático, producido por:

- Condiciones ambientales que favorecen la transpiración foliar, como baja humedad relativa.

- Descenso de la presión radicular debido a un incremento de la salinidad.
- Resistencia del tejido xilemático en el fruto y en pedúnculo del mismo, al flujo de agua y, en consecuencia, al calcio suministrado.

Si bien la incidencia de la fisiopatía aumenta cuando el contenido de calcio en la disolución es menor (Adams y Ho, 1993), muchas condiciones ambientales y de cultivo pueden incidir sobre la manifestación del BER, estrés hídrico y elevada conductividad eléctrica (Ehret y Ho, 1986), aumento rápido de temperaturas, altos niveles en la disolución de potasio y magnesio, elevados contenidos de nitrógeno en forma amoniacal (Kirkby y Mengal, 1976), reducidos niveles de transpiración causados por elevada humedad relativa alrededor de los frutos (Baker, 1984), situación opuesta con elevados niveles transpirativos causados por baja humedad relativa (Brandfield y Guttridge, 1984), una escasa radiación, un pobre desarrollo de vasos xilemáticos en el fruto (Hocking y col., 2016), fuerte efecto competitivo por parte de las hojas por el calcio durante el desarrollo del fruto (Ho y White, 2005; De Freitas y col., 2014), obstrucción o rotura de los vasos del xilema (Drazeta y col., 2004; De Freitas y col., 2012), etc. Además, el cultivo demasiado precoz y la falta de luz durante el cuaje deben considerarse como causas principales de la mala alimentación cálcica de los frutos (Madrid y col., 1997).

Existen especies susceptibles a la manifestación de BER, como el pimiento, la sandía (los cultivos con frutos cilíndricos o subcilíndricos, ya que los esféricos son resistentes) (Cirulli y Ciccicarese, 1981) y el tomate (Adams y Ho, 1993), mientras que otras como el pepino, no se ven afectadas habitualmente por desórdenes relacionados con la deficiencia de calcio (Ward y Miller, 1970). Bajo condiciones similares de cultivo, el pepino acumula tres veces más calcio que el tomate (Ward, 1967; Ward y Miller, 1970), con una mayor proporción del calcio total de la planta presente en los frutos (24%) que el hallado para el tomate (4,8%) (Ward, 1967).

Bajo situaciones de estrés cálcico, los síntomas de deficiencia ocurren antes en los extremos foliares en plantas de pepino que en el fruto (Ward y Miller, 1970), pero pueden llegar a producirse lesiones en los frutos análogas al BER (Frost y Kretchman, 1989), sobre todo en condiciones de elevada humedad (Staub y col., 1988) o de estrés hídrico (Thomas y Staub, 1992). Este desorden fisiológico sucede con concentraciones de calcio menores del 0,2% en el tejido afectado de los frutos de pepino (Ho y Adams, 1994). Ho y Adams (1994) encontraron niveles de calcio en frutos 10 veces superiores en pepino que en tomate. Dos factores pueden contribuir a este hecho:

- El fruto de pepino puede recibir calcio tanto del xilema como del floema, si bien los rangos de concentración en floema (0,5-0,9 mM) son inferiores a los del xilema (0,9-7,3 mM) (Richardson y col., 1982). En el fruto del tomate, el calcio importado proviene casi exclusivamente vía xilema (Ho y col., 1987), con una concentración en savia sobre 10 mM (Ehret y Ho, 1986).
- La transpiración potencial del fruto de pepino es muy superior a la de los tomates. Se han observado una frecuencia de estomas de 20-30 mm⁻² en pepino (Ho y Adams, 1994), mientras que el tomate no muestra apenas presencia de estomas, menos de 1 mm⁻² (Blanke, 1986). De esta manera, la contribución a través de los estomas al proceso transpirativo en el fruto de tomate es muy escasa, alcanzando un fruto de tomate en su

estado de máximo crecimiento relaciones de unos 0,7 g de agua por día (Ho y col., 1987), mientras que un fruto de pepino de 400 g de peso, transpira unos 20 g de agua diarios (Ho y Adams, 1994).

De esta manera, la importancia de la transpiración del fruto en proporcionar calcio al fruto de pepino está fuertemente influenciada con el factor humedad. Cuando las plantas están sujetas a elevada humedad relativa, la concentración de calcio en fruto decrece y el riesgo de aparecer síntomas de deficiencia (pillowyness) se eleva (Staub y col., 1988). Esto es diferente en el tomate, que es capaz de acumular más calcio a elevada humedad relativa, cuando el movimiento de calcio hasta las hojas se ve reducido (Adams y Holder, 1992), aunque en situaciones de baja humedad relativa también puede desarrollar el BER (Adams y Ho, 1992).

Se ha comprobado que incluso cuando se cubren las necesidades totales de calcio, en condiciones de elevada salinidad, se manifiesta la enfermedad (Adams y Ho, 1992; Ho y col., 1995).

Desde hace mucho tiempo se conoce que la diferente resistencia de los distintos cultivares al BER son debidas a diferencias en la eficacia en la absorción cálcica y en la acumulación en el fruto (Greenleaf y Adams, 1969).

Normalmente, la distribución del calcio se favorece por la noche, cuando la humedad tiende a incrementarse y el nivel de transpiración foliar desciende marcadamente, esto permite al agua y al calcio movilizarse hacia los tejidos de más baja o nula transpiración. Este proceso se ve reforzado por el incremento de presión del fluido xilemático, generalmente desarrollado por la noche, debido a la mayor actividad radical (Morgan, 1998).

Vitrescencia del melón

La vitrescencia del melón es otra fisiopatía causada por una insuficiencia cálcica en el fruto. Consiste en una alteración de la textura de la pulpa del fruto del melón, acompañada de una degradación del sabor y el aroma, aunque la tasa de azúcares se mantiene a un nivel normal. La carne presenta los síntomas de una sobremaduración precoz, tendiendo hacia la fermentación alcohólica de los azúcares del fruto, de ahí su nombre común “avinado” (Navarro, 1997). En general, el aspecto vítreo comienza en los vasos que alimentan la placenta y después crece hacia la periferia ocupando todo el volumen del fruto. La pulpa tiene entonces un aspecto traslúcido y adquiere un color oscuro (Madrid y col., 1997). El gen “larga vida” que se introduce en algunos nuevos cultivos, confiere a las variedades una muy buena tolerancia a la vitrescencia, que, en algunos casos, llega a ser total (Navarro, 1997).

Los cultivos precoces parecen ser los más propensos a la aparición de la fisiopatía (Musard y Yard, 1990). Se observa a menudo en cultivos con falta de vigor, o que presentan un desequilibrio entre el sistema radicular y la parte aérea.

Los factores influyentes sobre la presencia e intensidad de la vitrescencia son los mismos que los anteriormente descritos para tip burn y BER.

Como ya se ha indicado, el calcio es suministrado al fruto vía xilema. En el fruto, sólo el 15% del agua proviene de los conductos xilemáticos, y esto ocurre casi exclusivamente en la fase de multiplicación celular, durante los 20 días siguientes al cuaje. Durante esta fase de multiplicación celular, la relación superficie/volumen del fruto es elevada, y el nivel de transpiración se mantiene, lo que favorece el movimiento xilemático hacia el fruto y, consecuentemente, un buen suministro de calcio. En la fase de crecimiento, la relación superficie/volumen del fruto disminuye y la epidermis se hace menos permeable. Durante esta fase, el suministro de agua al fruto es a través del floema con los productos de asimilación fotosintética, prácticamente sin abastecimiento de calcio. En el interior del fruto, el calcio es transportado en su mayor parte por los vasos del xilema, cuya densidad disminuye del pedúnculo a la parte distal, lo que puede explicar la distribución diferencial del calcio en el fruto. Toda esta dinámica incide de forma directa en la manifestación de la vitrescencia del melón en condiciones desfavorables para la absorción, el transporte y la distribución del calcio (Madrid y col., 2004; Nishizawa y col., 2004).

A partir de exudados de floema y xilema, se puede concluir que aquellos órganos vegetales que se alimentan fundamentalmente vía floema, como son los frutos, presentan bajos contenidos de calcio y altos de potasio.

Durante la maduración de los frutos, la lámina media puede romperse y causar un ablandamiento del fruto, este cambio puede estar asociado con una reducción del calcio ligado a las paredes (Rigney y Wills, 1981; Knee, 1982). Se ha indicado que el contenido de calcio en las paredes de las células aumenta hasta el completo crecimiento del fruto inmaduro, pero disminuye justo antes del comienzo de la maduración. Simultáneamente, el calcio soluble aumenta. Este cambio está asociado con un incremento repentino de etileno. Si se eleva el contenido de calcio del fruto durante el desarrollo y la postrecolección, se produce un aumento en la dureza del fruto, previniendo la sobremaduración anticipada (Rigney y Wills, 1981).

El número de frutos presentes en la planta y la vegetación suficiente que garantice una adecuada red de vasos xilemáticos, juegan un importante papel en la posible manifestación de la vitrescencia. Frutos numerosos y/o precoces presentan un mayor riesgo de incidencia de la fisiopatía. Está demostrado que los procesos precocidad y senescencia se aceleran en condiciones de bajos niveles de calcio (Combrink y col., 1995)

Conviene reseñar que numerosos estudios han demostrado la inexistencia de una correlación entre el estado interno de la pulpa (presencia o no de vitrescencia) y los criterios visibles o medibles externamente, con los problemas que ello acarrea debido a la presencia de melones afectados en el mercado de consumo.

Factores influyentes y prevención de estas fisiopatías

La aparición de la fisiopatía, puede ser resultado, no solo de condiciones ambientales (temperatura, intensidad y duración luminosa, humedad relativa), sino también de estrés inducido por una elevada conductividad eléctrica en la disolución nutritiva. Resumiendo, los

factores que más pueden contribuir al desarrollo de este tipo de desórdenes son (Morgan, 1998; Lu y col., 2013):

- Elevadas temperaturas durante días soleados.
- Vientos secos y cálidos.
- Elevada conductividad eléctrica en la disolución nutriente.
- Un pobre desarrollo radicular, debido a una inadecuada oxigenación o a la muerte de raíces.
- Elevado contenido de potasio y nitrógeno, particularmente de ion amonio (Mengel y Kirkby, 1987), los cuales reducen la absorción de calcio.
- Humedad relativa elevada.

En base a esto, y admitiendo que la completa eliminación en los cultivos comerciales, de este tipo de desórdenes relacionados con la deficiencia cálcica, bajo condiciones favorables para su manifestación, puede resultar imposible, la incidencia de la fisiopatía puede ser reducida al mínimo mediante los procedimientos siguientes:

- Mantenimiento de adecuados niveles de calcio en la disolución nutriente, particularmente durante la fase de desarrollo de los frutos, en el caso de desórdenes que afecten a los mismos.
- Evitar niveles excesivos de potasio y nitrógeno.
- Usar la forma nítrica en preferencia a la forma amónica, en el suministro de nitrógeno.
- Sombrear los cultivos durante períodos de elevadas temperaturas e intensidad luminosa.
- Seleccionar cultivares resistentes.
- Mantener un adecuado vigor, tanto de la parte aérea como del sistema radicular, sobre todo, durante la etapa de cuaje y desarrollo de frutos.
- Evitar niveles de conductividad eléctrica excesiva, realizando un seguimiento de la misma durante los períodos de transpiración elevada del cultivo o de riesgo de estrés hídrico (elevada radiación y temperatura).

Se ha sugerido que un aporte de disolución de nitrato cálcico (100 mg/l de calcio) solamente durante la noche, puede constituir una solución comercial a este tipo de desórdenes en hidroponía (Cresswell, 1991). También Ho (1989) manifestó que cuando las hojas no se encuentran totalmente expandidas, la transpiración cuticular nocturna puede suponer un importante factor de transportar calcio hacia las hojas.

1.3.6. FORMAS DEL CALCIO

El conocimiento de las formas químicas de cada elemento en la planta puede ser utilizado como herramienta para el estudio de la nutrición mineral de los vegetales, ya que suministra información sobre la utilización de los iones absorbidos y el recorrido metabólico que han seguido. Así pues, químicamente, esto puede traducirse en una serie de reacciones de integración del nutriente en estructuras orgánicas cada vez más complejas, como sucede con el nitrógeno; o en procesos de formación de compuestos de naturaleza química diversa, pero de insolubilidad creciente, como ocurre con el calcio. El equilibrio entre las formas químicas de un nutriente determinado no es necesariamente el mismo para cada especie ni para cada órgano de la planta considerado (Carpena y col., 1973). La edad de la hoja o la posición de un foliolo dentro de la misma y cambios fisiológicos producidos por desórdenes nutricionales o la aplicación de fertilizantes (Valenzuela y col., 1992) afectan a la composición iónica de los tejidos.

El calcio fundamentalmente presenta funciones estructurales de fortalecimiento de las paredes celulares y de control de la permeabilidad de las membranas. El calcio aparece en los vegetales en diferentes formas: Ca^{+2} soluble asociado a aniones como malato o nitrato, calcio adsorbido a grupos carboxílicos, fosforílicos o hidroxifenólicos, calcio precipitado formando carbonatos, fosfatos y oxalatos. Generalmente, estos compuestos aparecen como depósitos en las vacuolas y mitocondrias, si bien, en semillas el calcio está predominantemente como fitato (Mengel y Kirkby, 1987). La composición iónica de los distintos órganos de la planta con relación a las fracciones de calcio está estrechamente relacionada con procesos fisiológicos como absorción, transporte y almacenamiento. En estos procesos, la influencia del medio de cultivo y la especificidad genética del vegetal es determinante (Mengel y Kirkby, 1987).

La distribución del calcio entre sus distintas fracciones varía durante el desarrollo del fruto, incluso durante el almacenamiento, por lo que las concentraciones de calcio total pueden no estar bien relacionadas con la calidad de los frutos, siendo preciso recurrir a su distribución bajo las diferentes formas como alternativa (Himelrick, 1981). La relación entre calcio libre y calcio ligado es muy importante en los procesos de maduración del fruto, el incremento en la producción de etileno junto a un aumento en la permeabilidad de la membrana, como consecuencia de un descenso del calcio fisiológicamente activo, es un paso esencial en el proceso de maduración que, en consecuencia, requiere el movimiento del calcio de la lámina media. Eso se correlaciona con un incremento en la actividad de poligalacturonasa, enzima responsable de disolver los pectatos de la lámina media y los tejidos de sostén (Mengel y Kirkby, 1987).

Para la determinación de las distintas formas del calcio se sigue la técnica propugnada por Carpena y col. (1972), que tomaron como base los estudios llevados a cabo con anterioridad por Abutalybov (1956) y Nadir (1969). Consiste en un proceso de extracción diferencial que separa cuatro fracciones de calcio de insolubilidad creciente: Calcio soluble, calcio ligado, calcio de sales insolubles inorgánicas y calcio insoluble orgánico. Para ello se efectúa una extracción sucesiva con agua, nitrato sódico 2N, ácido acético 10% y ácido clorhídrico 2N, que extraen respectivamente el calcio soluble, el calcio ligado (formando pectatos y carbonatos

principalmente), el calcio insoluble inorgánico (formando fosfatos fundamentalmente) y el calcio insoluble orgánico (en forma de oxalato) (Minamide y col., 1986; Carpena y col., 1973; Valenzuela y col., 1994).

Minamide y col. (1986) emplean una ligera modificación de los extractantes, utilizando secuencialmente agua, cloruro sódico 1N, ácido acético 2% y ácido clorhídrico 5%. Encuentran que el calcio soluble predominaba en perejil, plántulas de rábano y en *Prunus mume*; el calcio soluble y ligado predominan conjuntamente en bananas y tomates y el calcio insoluble orgánico en espinaca. En esta, niveles relativamente altos de calcio ligado e insoluble inorgánico se encuentran en hojas jóvenes, tanto como calcio insoluble orgánico, incrementándose este en las hojas maduras (Minamide y col., 1986). Gallaher y Jones (1976) también consideran que la extracción con ácido acético 2% es representativa del calcio total de la planta excepto el precipitado como oxalato. Clark y col. (1987) utilizan secuencialmente una extracción con ácido acético 14M seguida de otra con ácido clorhídrico 0,25M, para separar la fracción de calcio más o menos lábil de aquélla que es metabólicamente inactiva (precipitada como oxalato).

En limón Verna, en los primeros estados de desarrollo de la hoja predominan las fracciones de calcio ligado e insoluble inorgánico, conforme la hoja va madurando se produce una acumulación de calcio bajo las formas soluble e insoluble orgánico, en la hoja adulta estas dos fracciones alcanzan el 75% del calcio total (Carpena y col., 1973). Sin embargo, en los órganos florales, el calcio soluble y el que forma oxalatos influyen escasamente en el contenido total del nutriente, mientras que el calcio ligado presenta un papel preponderante, quizá y al igual que ocurre en los primeros estados de la hoja, porque esta forma, no acumulativa, interviene como compuesto intermedio del metabolismo de este elemento, siendo más representativa en las primeras etapas del crecimiento de los órganos. Al igual que sucede en la hoja, la fracción de calcio insoluble orgánico va acumulándose en función de la edad (Carpena y col., 1973).

La capacidad fotosintética de un órgano determinado puede implicar la acumulación de calcio bajo las formas soluble y insoluble orgánica, que puede ser tomado como un índice de la actividad metabólica, tal y como constatan Carpena y col. (1973) en frutos de limón jóvenes (rápido incremento de sus valores tras el cuaje respecto al gineceo) y órganos florales (en los que el cáliz presenta mayores niveles). Así, cuando el órgano, bien por su naturaleza o por su incipiente desarrollo, muestra necesidades heterotróficas, predominan en él las fracciones de calcio ligado e insoluble inorgánico, que parecen englobar compuestos intermedios del metabolismo de este elemento, mientras que las formas soluble e insoluble orgánica, de carácter acumulativo, aparecen y se incrementan en función de la capacidad de síntesis, o sea, del carácter autotrófico del órgano. De esta forma, cualquier alteración nutritiva que implique una reducción de la capacidad de síntesis de la hoja llevará a una menor acumulación foliar de calcio insoluble orgánico.

En hojas de limonero se ha constatado que, en casos de deficiencia de hierro en suelos calizos, descienden los valores de las fracciones de calcio soluble y de calcio insoluble orgánico, mientras que los contenidos del calcio ligado y el de sales inorgánicas insolubles no experimentan cambio alguno (Carpena y col., 1972). El fenómeno de que el hierro condiciona la absorción y transporte de calcio ya fue sugerido por Wallace y De Kock (1966) en hortalizas. Del mismo modo, limoneros Verna deficientes en cinc y manganeso presentan valores más reducidos de calcio soluble e insoluble orgánico, principalmente en esta segunda fracción

(Carpena y col., 1973).

En hojas bien dotadas de calcio durante su período de crecimiento o desarrolladas bajo una alta intensidad luminosa, gran parte de los pectatos de la lamela interna de las células se encuentran como pectato cálcico, lo que hace que el tejido sea muy resistente a la degradación por efecto del enzima poligalacturonasa (Rigney y Wills, 1981).

En kiwi, Clark y Smith (1991) encontraron que las fracciones soluble y ligada eran minoritarias en los primeros estados de crecimiento del fruto, para ir aumentando paulatinamente hasta igualar a la correspondiente al oxalato cálcico. Paralelamente, el contenido total en calcio iba disminuyendo con el desarrollo del fruto, quizá debido al efecto de dilución que sufren los diferentes solutos del mismo. Estudios anteriores indican que el calcio en forma de oxalato es el que predomina en el fruto del kiwi (Hallet, 1989).

En invernadero sobre suelo, con plantas de melón Galia, Valenzuela y col. (1994) muestrearon quincenalmente hojas para determinar el contenido foliar de calcio total y sus distintas fracciones. La mayor concentración foliar de calcio total aparece en los tratamientos que presentan un contenido más elevado de calcio como oxalato, constituyendo esta fracción casi el 60% del total, pudiendo jugar esta fracción un papel osmorregulador en condiciones de salinidad y con niveles elevados de nitratos como ocurre en este caso (Hanson, 1984), de este modo, el oxalato cálcico, escasamente soluble, se acumula en las vacuolas de las plantas abonadas con esta forma de nitrógeno sin incrementar la presión osmótica de las mismas (Kirkby y Pilbeam, 1984). Valenzuela y col. (1994) encuentran concentraciones de calcio soluble, ligado e insoluble inorgánico inferiores a las halladas en tomate (Valenzuela y col., 1992), sandía (Vargas y col., 1990) o remolacha (Mostafa y Ulrich, 1976), mientras que la fracción del calcio insoluble orgánico es mayor. La totalidad de las fracciones de calcio en pepino (Valenzuela y col., 1992) resultaron ser inferiores a las encontradas en melón (Valenzuela y col., 1994).

Según Mostafa y Ulrich (1976) y Armstrong y Kirkby (1979), la fracción mayoritaria resulta ser en un 50% la correspondiente al calcio ligado cuando la planta se encuentra bien abastecida de calcio. Un aumento de fósforo en el sustrato puede inducir mayores concentraciones foliares de calcio total en melón (Valenzuela y col., 1994) y berenjena (López-Cantarero, 1992), quizá debido a que, al predominar la absorción aniónica, se tienda a un aumento en el transporte del catión (López-Cantarero, 1992).

2. OBJETIVOS Y PLAN DE TRABAJO

2.1. OBJETIVOS

Los objetivos básicos perseguidos en este trabajo se resumen a continuación:

- a) Caracterizar convenientemente el estudio de la nutrición hídrica y mineral (fertirrigación) en cultivo sin suelo, bajo las condiciones agroclimáticas características del Sudeste español.
- b) Crear una aplicación informática (software) que permita la adecuada gestión del programa de fertirrigación, en base a información recopilada y ensayos agronómicos establecidos a tal efecto.
- c) Utilizando dicho programa para el desarrollo de ensayos de cultivo bajo diferentes condiciones, llevar a cabo un estudio de la nutrición cálcica en melón, desde el punto de vista químico y fisiológico, que permita optimizar la nutrición de este elemento, de gran importancia de cara al valor comercial de las cosechas, así como otros parámetros de calidad.

2.2. PLAN DE TRABAJO

2.2.1. FASE I: Elaboración del software para la gestión de la fertirrigación en cultivos sin suelo

- Recopilación de datos.
- Caracterización del comportamiento en laboratorio de componentes esenciales (fertilizantes de uso más difundido) de cara al ajuste del fertirriego.
- Ensayos de cultivos bajo diferentes condiciones agroclimáticas.

De acuerdo con la información preliminar recogida, se plantean y llevan a cabo diferentes ensayos de cultivo, con el fin de confirmar su aplicación práctica y de obtener los parámetros más significativos de cara al proceso de fertirrigación. Para ello se establecen diversos ensayos, si bien bajo condiciones de cultivo habituales del sudeste español, abarcando las más amplias posibilidades de parámetros implicados.

- Diseño, programación y presentación del software en base a los apartados anteriores.

2.2.2. FASE II: Estudio de la nutrición cálcica

- Desarrollo de ensayos bajo condiciones adversas para la absorción del calcio y con diferentes compuestos que lo aporten, fundamentalmente en cultivo de melón.
- Desarrollo de ensayos bajo condiciones normales de cultivo en el sudeste español.

- Estudio de la distribución del calcio en las diferentes fracciones de la planta.
- Estudio de las diferentes formas bajo las que se presenta el calcio en las fracciones estudiadas.

2.3. PLANNING DE TRABAJO

3. PARTE EXPERIMENTAL

Esta tesis engloba una serie de trabajos publicados, que constituyen la mayor parte de los resultados expuestos, junto a multitud de experiencias que complementan el objeto del presente trabajo. Algunas de estas publicaciones fueron escritas y publicadas en inglés, en tales casos, se ha decidido respetar el cuerpo del trabajo en ese idioma, tal cual fue aceptada por los revisores para preservar de forma íntegra la información que contiene.

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN Y ENSAYOS PARA EL DESARROLLO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA

La caracterización físico - química de los fertilizantes a emplear, en condiciones habituales de uso, resulta imprescindible para poder abordar la elaboración de una aplicación informática que gestione la fertirrigación de cultivos sin suelo.

Especialmente importante resulta el estudio relativo a los parámetros CE y pH, ya que sus medidas en continuo son las empleadas por los modernos equipos automáticos de fertirrigación, para controlar la mezcla de agua de riego y fertilizantes. El empleo de estos equipos resulta indispensable en los cultivos sin suelo, ya que es preciso mantener un exhaustivo control en las dosis y frecuencias de disoluciones nutritivas para lograr unos adecuados rendimientos. Estos dispositivos utilizan la medida en continuo del pH para el ajuste de la dosificación del ácido aportado, mediante la apertura y cierre de electroválvulas, e igualmente emplean la medida en continuo de la CE para controlar la dosificación de la mezcla fertilizante, previamente estimada, que va a provocar un incremento de CE sobre la inicial correspondiente al agua de riego.

Evidentemente, una adecuada caracterización de estos parámetros para cada uno de los productos a emplear, teniendo en cuenta sus concentraciones habituales de utilización, sus riquezas comerciales, sus mezclas con el agua de riego y entre sí, etc., es la única forma de poder lograr una herramienta que nos permita programar un equipo de fertirrigación de manera fiable para que a cada planta llegue exactamente las cantidades que requiere en cada momento.

3.1.1. FUNDAMENTOS Y OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA

3.1.1.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE LA CE

AUTOR: ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: Horticultura, 128, Vol. XVII: 97-98. ISSN: 1132-2950

El término fertirrigación es ya de uso cotidiano entre las personas vinculadas a la agricultura intensiva, y sobre su concepto, que engloba la nutrición hídrica y mineral de los cultivos, se concentra buena parte de los avances técnicos y tecnológicos que sustentan la revolución que en la actualidad está aconteciendo en la agricultura española, y que consiste en la aplicación a gran escala de la electrónica y la informática a los sistemas de cultivo.

La técnica de la fertirrigación involucra el empleo de determinados parámetros físico - químicos, la mayor parte de ellos conocidos intuitivamente por parte de la gente que los maneja, pero que muy pocos conocen de manera exhaustiva.

Bajo mi punto de vista, resulta interesante que los técnicos que desarrollan su labor en este campo conozcan los fundamentos teóricos de estos parámetros para que después puedan realizar una más correcta aplicación e interpretación práctica de los mismos.

En este artículo y en otros sucesivos, se pretende definir teóricamente algunos de los referidos parámetros tales como conductividad eléctrica y pH, así como encuadrar su significado agronómico en el sistema suelo/sustrato-planta y su aplicación práctica en la agricultura intensiva.

Conductividad eléctrica

En general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevarse a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos:

- Conductores metálicos o electrónicos.
- Conductores iónicos o electrolíticos.

A este segundo tipo pertenecen las disoluciones acuosas que es el caso que aquí interesa. En ellas la conducción de electricidad al aplicar un campo eléctrico se debe al movimiento de los iones en disolución, los cuales transfieren los electrones a la superficie de los electrodos para completar el paso de corriente.

La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la aptitud de ésta para transmitir la corriente eléctrica, y dependerá, además del voltaje aplicado, del tipo, número, carga y movilidad de los iones presentes y de la viscosidad del medio en el que éstos han de

moverse. En nuestro caso, este medio es agua, y puesto que su viscosidad disminuye con la temperatura, la facilidad de transporte iónico o conductividad aumentará a medida que se eleva la temperatura.

Según la ley de Ohm, cuando se mantiene una diferencia de potencial (E), entre dos puntos de un conductor, por éste circula una corriente eléctrica directamente proporcional al voltaje aplicado (E) e inversamente proporcional a la resistencia del conductor (R).

$$I=E/R$$

En disoluciones acuosas, la resistencia es directamente proporcional a la distancia entre electrodos (l) e inversamente proporcional a su área (A):

$$R= \rho \cdot l/A$$

Donde ρ se denomina resistividad específica, con unidades $\Omega \cdot \text{cm}$, siendo su inversa ($1/\rho$), la llamada conductividad específica (κ), con unidades $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ o mho/cm (mho, viene de ohm, unidad de resistencia, escrito al revés).

En términos agronómicos, cuando medimos la CE de un agua de riego, una disolución fertilizante, un extracto acuoso, un drenaje, etc., determinamos la conductividad específica (κ) de dicha disolución. Actualmente se emplea la unidad del Sistema Internacional, siemens (S), equivalente a mho; y para trabajar con números más manejables se emplean submúltiplos:

$$1 \text{ mS/cm} = 1 \text{ dS/m} = 1000 \text{ }\mu\text{S/cm} = 1 \text{ mmho/cm}$$

Como la CE varía según la temperatura de medida, debe ir siempre acompañada de la temperatura a la que se efectúa la medición, 20°C según la norma AFNOR o 25°C según la norma CEE ($\text{CE a } 25^\circ\text{C} \approx 1.112 \times \text{CE a } 20^\circ\text{C}$). Cuando la medida no se realiza a esta temperatura y el conductímetro no posee compensación automática de la misma, se usan unos factores de conversión que existen tabulados para cualquier temperatura.

La conductividad específica de una solución de electrolitos, que es el caso que nos atañe, depende de la concentración de las especies iónicas presentes. Kohlrausch, definió la conductividad equivalente (Λ) como:

$$\Lambda = \kappa/c^* = \kappa \cdot (1000/c)$$

Donde c^* , es la concentración en equivalentes por cm^3 , y c es la concentración en equivalentes por litro (N). La conductividad equivalente es pues, la conductividad generada por cada meq/l existente en disolución de una especie dada.

La conductividad de una solución es igual a la suma de las conductividades de cada tipo de ion presente. Para una sola sal disuelta, la conductividad equivalente se puede expresar como:

$$\Lambda = \lambda_+ + \lambda_-$$

Donde, λ_+ es la conductividad equivalente del catión y λ_- la del anión. Así pues, teóricamente sería muy sencillo predecir la CE de una solución conociendo su composición iónica, ya que λ_+ y λ_- son constantes que dependen del tipo de ion en cuestión. Para mezclas, Λ debería ser igual a la suma de todas las conductividades equivalentes de cationes y aniones, pero la conductividad equivalente de sales o iones disminuye con el aumento de concentración.

Este fenómeno está directamente relacionado con las fuerzas interiónicas presentes en la solución. Un catión siempre tendrá más aniones en su vecindad que los que le corresponderían por pura distribución de probabilidades. Esta atmósfera iónica tiende a frenar la movilidad del ion. Además, se comprueba que el descenso de conductividad equivalente con la concentración es mucho más acusado cuando la carga de los iones es mayor. Por esta razón, aguas de riego salobres, donde el componente aniónico principal son los sulfatos unidos a calcio y/o magnesio (todos ellos iones divalentes), presentan CE mucho más bajas de lo esperado a tenor de la cantidad de sales totales disueltas.

Para soluciones más diluidas, la atmósfera iónica empieza a debilitarse, y a dilución infinita las fuerzas interiónicas no influyen sobre la movilidad de los iones, alcanzando la conductividad equivalente su máximo valor:

$$\Lambda^\circ = \lambda^\circ_+ + \lambda^\circ_-$$

Siendo Λ° , la conductividad equivalente del electrolito a dilución infinita; λ°_+ , la conductividad equivalente a dilución infinita debida al catión y λ°_- la debida al anión.

La tabla 9 muestra las conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita en disoluciones acuosas a 25°C para los iones más usuales en agronomía, expresados en $\mu\text{S}/\text{cm}$ por cada meq/L.

Tabla 9. Conductancias equivalentes iónicas a dilución infinita ($\mu\text{S}/\text{cm}$ por cada meq/L) en disoluciones acuosas a 25 °C para los iones más usuales en agronomía.

CATIONES	λ°_{+}	ANIONES	λ°_{-}
H^{+}	349,7	OH^{-}	198,0
Na^{+}	50,1	Cl^{-}	76,3
K^{+}	73,5	NO_3^{-}	71,4
NH_4^{+}	73,5	HCO_3^{-}	44,5
Mg^{+2}	53,0	CO_3^{-2}	69,3
Ca^{+2}	59,5	SO_4^{-2}	80,0
		HPO_4^{-2}	33,0
		$\text{H}_2\text{PO}_4^{-}$	33,0

Fuente: Handbook of Chemistry and Physics. David R. Lide, Editor in Chief. 73rd Edition. 1992-1993.

En la tabla 10 se puede comprobar la diferencia entre la CE real y la teórica (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) si no existieran fuerzas interiónicas en el seno de la disolución para cuatro tipos distintos de aguas de riego.

Tabla 10. Diferencia de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) real y teórica sin considerar las fuerzas interiónicas, para cuatro aguas de riego de diferente composición.

IONES (meq/L)	Agua 1	Agua 2	Agua 3	Agua 4
Ca^{+2}	1,55	5,50	6,17	31,60
Mg^{+2}	0,07	4,72	9,97	24,82
Na^{+}	1,04	4,12	42,99	10,34
K^{+}	0,34	0,13	1,59	0,32
HCO_3^{-}	1,34	2,76	4,62	8,64
Cl^{-}	0,83	4,18	46,90	10,46
SO_4^{-2}	0,82	7,58	9,30	48,28
CE teórica	362	1842	7694	9057
CE real	323	1310	5960	4360

Fuente: Elaboración propia.

Se puede comprobar como la CE real se aleja de la teórica a medida que hay mayor cantidad de iones en disolución y conforme predominan los divalentes sobre los monovalentes. Asimismo, queda claro que, usado directamente, este no es un buen método para el cálculo de la CE final

de una mezcla fertilizante que a veces se hace necesario conocer de antemano. En trabajos sucesivos se verá qué métodos existen para este propósito y cuál de ellos es el más preciso.

El aparato necesario para hacer medidas de conductividad es, generalmente, barato y simple. Por esta razón, las medidas de conductividad encuentran gran aceptación en la industria, como una herramienta analítica y también en laboratorios y en procesos de control. Instrumentos compactos y relativamente baratos son equipados, con células especiales que leen directamente la conductividad específica, o la traducen a ppm de sales.

Existen tipos de sensores de inserción, flujo y sumersión, que trabajan en sistemas automatizados en continuo para controlar flujos de agua tratada en desmineralizadores, aguas de calderas, circuitos de refrigeración, contaminaciones en ríos y lagos, ósmosis inversa y operaciones similares. Una de ellas son las máquinas de fertirrigación que trabajan a CE final o por incrementos de CE, que han proliferado enormemente en todas las zonas hortícolas de España y que se han hecho imprescindibles en cualquier explotación agraria que pretenda una fertirrigación razonable y eficaz de sus cultivos.

3.1.1.2. CONCEPTO DE PH E IMPORTANCIA EN FERTIRRIGACIÓN

AUTOR: ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: *Concepto de pH e importancia en fertirrigación*

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: *Horticultura*, 132, Vol. XVII: 46-49. ISSN: 1132-2950

La mayoría de la gente sabe que el pH es un valor variable entre 0 y 14 que indica la acidez o la alcalinidad de una solución. Y, además, conoce que el mantenimiento del pH apropiado en el flujo del riego ayuda a prevenir reacciones químicas de fertilizantes en las líneas, que un valor de pH elevado puede causar obstrucciones en los diferentes componentes de un sistema de fertirrigación debidas a la formación de precipitados, que un adecuado pH asegura una mejor asimilabilidad de los diferentes nutrientes, especialmente fósforo y micronutrientes. etc.

Simplificadamente, podemos afirmar que las sustancias capaces de liberar iones hidrógeno (H^+) son ácidas y las capaces de ceder grupos hidroxilo (OH^-) son básicas o alcalinas. De este modo, el ácido nítrico, al adicionarlo al agua se ioniza aportando iones hidrógeno o protones a la solución.

El agua puede comportarse como un ácido o como una base:

Las letras pH son una abreviación de “pondus hydrogenii”, traducido como potencial de hidrógeno, y fueron propuestas por Sørensen en 1909, que las introdujo para referirse a concentraciones muy pequeñas de iones hidrógeno. Sørensen, por tanto, fue el creador del concepto de pH, que se define como el logaritmo cambiado de signo de la actividad de los iones hidrógeno en una solución:

$$pH = -\log |H^+|$$

A 25°C, el producto iónico del agua pura $|H^+| \times |OH^-|$ es 10^{-14} , con lo que en un medio neutro $|H^+| = |OH^-| = 10^{-7}$. Un medio ácido es aquel en el que $|H^+| > |OH^-|$ y uno básico aquel en el que $|H^+| < |OH^-|$. Es decir, en una solución ácida $|H^+| > 10^{-7}$ y $pH < 7$, en una neutra $|H^+| = 10^{-7}$ y $pH = 7$ y en una básica $|H^+| < 10^{-7}$ y $pH > 7$.

Importancia del pH para los cultivos

El pH de la solución nutriente en contacto con las raíces puede afectar el crecimiento vegetal de dos formas principalmente:

- El pH puede afectar la disponibilidad de los nutrientes: Para que el aparato radical pueda absorber los distintos nutrientes, estos obviamente deben estar disueltos. Valores extremos de pH pueden provocar la precipitación de ciertos nutrientes con lo que permanecen en forma no disponible para las plantas.
- El pH puede afectar al proceso fisiológico de absorción de los nutrientes por parte de las raíces: Todas las especies vegetales presentan rangos característicos de pH en los que su absorción es idónea. Fuera de este rango la absorción radicular se ve dificultada y si la desviación en los valores de pH es extrema, puede verse deteriorado el sistema radical o presentarse toxicidades debidas a la excesiva absorción de elementos fitotóxicos (aluminio).

En las condiciones agroclimáticas del sureste español, con pH de suelos y aguas de riego cercano o superior a 7,5, se ve afectada la correcta asimilabilidad de nutrientes como fósforo, hierro y manganeso; de hecho, la clorosis férrica es considerada fisiopatía endémica de la zona. El ajuste del pH a valores adecuados en el entorno de influencia de la raíz es, con frecuencia, suficiente para corregir estos estados carenciales de fósforo, hierro y manganeso.

pH en la solución de fertirrigación. Disponibilidad de nutrientes

El pH en las soluciones de fertirrigación, tanto en cultivo en suelo como en hidroponía, debe ser tal que permita estar disueltos a la totalidad de los nutrientes sin dañar las raíces, evitando de este modo la formación de precipitados (algunos de los cuales pueden presentarse en forma de finísima suspensión invisible al ojo humano) que pudieran causar obturaciones en los sistemas de riego e indisponibilidad para la absorción radical de dichos nutrientes.

De este modo, el hierro, que es el elemento esencial cuya solubilidad resulta más afectada por el pH, a menos que se adicione diariamente o en forma quelatada, se encuentra en forma iónica disponible para la planta en menos del 50% por encima de pH 7, mientras que a pH 8 no queda nada disponible debido a su precipitación en forma de hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (óxido, robín o herrumbre). Por el contrario, por debajo de pH 6,5, más del 90% del hierro permanece disuelto y disponible para las plantas. El manganeso sigue una dinámica similar al hierro.

De forma análoga, por encima de pH 6,5, la disponibilidad del fósforo y el calcio pueden decrecer considerablemente debido al predominio de la forma HPO_4^{2-} (que forma precipitados insolubles en contacto con el calcio) sobre la forma H_2PO_4^- (que forma compuestos muy solubles con el calcio). Y por encima de pH 7 el riesgo de precipitación de calcio y magnesio en forma de carbonatos, CaCO_3 y MgCO_3 , es muy alto, lo que puede provocar importantes

obturaciones de emisores y otros componentes en los sistemas de fertirriego. En resumen, en el rango de pH 5,0-6,5, la práctica totalidad de los nutrientes está en forma directamente asimilable para las plantas, por encima de pH 6,5 la formación de precipitados puede causar importantes problemas y por debajo de pH 5 puede verse deteriorado el sistema radical, sobre todo en cultivo hidropónico, donde el poder tamponador del sustrato suele ser muy pequeño.

pH del agua de riego

La inmensa mayoría de las aguas de riego que manejamos muestran un pH superior al óptimo. La cantidad de ácido a aportar para llevar el pH al rango antes mencionado depende principalmente de la concentración del ion bicarbonato presente en el agua de riego, ya que reacciona con el mismo según:

De esta forma, el ion bicarbonato actúa de tampón amortiguando los cambios de pH del agua de riego, y cuando su concentración es elevada, se precisa mayor cantidad de ácido para su neutralización y ajuste del pH al valor deseado.

El empleo de una solución ácida (pH 3-4) pasando lentamente durante una noche por las líneas de riego, se puede emplear para limpiar las incrustaciones y precipitados formados y devolver así las redes de riego a su funcionamiento habitual, resolviendo los problemas de pérdidas de uniformidad y obstrucciones provocados por el elevado pH del agua de riego.

El factor pH puede ser muy importante no sólo para el proceso exclusivo de fertirrigación, así también puede jugar un importante papel en el uso de plaguicidas a través del riego (quimigación). Aguas de naturaleza alcalina pueden romper las moléculas de ciertos plaguicidas reduciendo su actividad química, mediante un proceso denominado hidrólisis alcalina, sobre todo si los productos permanecen en tanques de mezcla durante un tiempo prolongado y si la temperatura ambiental es elevada.

Factores causantes de los cambios de pH en la solución de nutrientes

Muchos son los factores que afectan al pH de la disolución de nutrientes, uno de los más importantes es la relación de absorción de nutrientes negativamente cargados (aniones) y nutrientes cargados positivamente (cationes). En general, un exceso en la absorción de cationes sobre aniones provoca un descenso del pH, mientras que un exceso en la absorción de aniones sobre cationes produce un incremento del pH.

Si atendemos al nitrógeno (nutriente requerido en grandes cantidades), puede ser aportado a la planta como catión amonio (NH_4^+) o como anión nitrato (NO_3^-), pues bien, la relación existente entre estas dos formas nitrogenadas en la solución de nutrientes puede afectar sustancialmente a la dirección y magnitud de la modificación del pH de la misma. Efectivamente, la raíz de las plantas posee una marcada capacidad de modificar el medio inmediatamente alrededor de ellas, sobre todo a nivel de la superficie radical, con el fin de incrementar la disponibilidad de los nutrientes. Cuando la planta absorbe preferentemente cationes (NH_4^+), se produce un exceso de carga negativa que la propia planta intenta neutralizar segregando cationes hidrógeno (H^+), con lo que el pH de la solución desciende. De la forma contraria, cuando se absorben preferentemente aniones (NO_3^-), las raíces fomentan la creación de iones hidroxilo (OH^-) o iones bicarbonato (HCO_3^-) para mantener la neutralidad eléctrica en la superficie de la raíz, con lo que el pH de la solución tiende a incrementarse.

Se sabe experimentalmente que cuando un 10-20% del nitrógeno total es aportado como amonio (NH_4^+), el pH de la solución nutritiva en cultivos hidropónicos permanece estable en torno a 5,5. Así pues, jugando con la relación $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ podríamos, en cierta manera, ajustar el pH de la solución de nutrientes. Ahora bien, hay que tener en cuenta que el catión amonio resulta fitotóxico por encima de cierta concentración (en las latitudes del sureste español por encima de 0,75 mM, ya es probable que se presenten síntomas visibles), y, además, puede inducir interacciones considerables con otros cationes (K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}) en el seno de la solución.

3.1.1.3. ACIDIFICACIÓN DE SOLUCIONES NUTRITIVAS EN FERTIRRIGACIÓN

AUTOR: ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: Acidificación de soluciones nutritivas en fertirrigación

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: Horticultura, 129, Vol. XVII: 66-69. ISSN: 1132-2950

La acidificación de las disoluciones nutritivas en fertirrigación es una práctica común y ventajosa desde numerosos puntos de vista, como veremos a continuación. Aunque existe la posibilidad de utilizar otro tipo de sustancias, en general, la acidificación de las soluciones hasta alcanzar el pH deseado se efectúa mediante la aplicación de ácidos minerales.

De acuerdo con la composición química de las aguas de riego normalmente empleadas, el poder tampón o amortiguador de éstas ante la adición de un compuesto ácido, depende casi exclusivamente de la presencia de ion bicarbonato (HCO_3^-). Este anión es la especie predominante del equilibrio del ácido carbónico en disolución entre pH 4 y pH 8.3, y es determinante en el valor de pH de la solución. Al adicionar un ácido, es decir, cualquier sustancia capaz de aportar iones hidrógeno (H^+), se produce la siguiente reacción de neutralización:

Con lo que eliminamos los iones bicarbonato, para obtener agua y dióxido de carbono gas. Esta es la principal reacción que nos va a gobernar el pH de una solución nutritiva cuyo pH pretendemos controlar.

Ventajas de la acidificación de la solución nutritiva

El ajuste del pH de la solución nutriente en fertirrigación, nos proporciona múltiples aspectos ventajosos, los dos principales se citan a continuación:

a) pH óptimo para la disponibilidad de elementos nutritivos:

Cada uno de los elementos esenciales para las plantas presenta un rango de pH, en el que las formas asimilables por los cultivos se encuentran a la mayor disponibilidad. Este rango de pH es variable para cada uno de los nutrientes esenciales, presentándose en el valor de pH 6,5 la mejor disponibilidad de la mayor parte de los elementos nutritivos, si bien algunos de ellos muestran mayor disponibilidad a pH distintos.

Por esta razón, el pH de las soluciones nutritivas en cultivo hidropónico y en cualquier técnica de fertirrigación en general, se establece en torno a 5,5, este valor con los posteriores reequilibrios con el CO_2 , generalmente asciende hasta 6,0-6,5 a la salida del emisor.

Existen, además, unos valores de pH óptimos para la absorción y funcionamiento radicular de cada especie. De esta forma, existen plantas que se adaptan mejor a niveles bajos de pH (especies acidófilas) y otras que, por el contrario, se desarrollan más adecuadamente en condiciones de pH superiores (especies basófilas). Este factor, aunque generalmente muestra menor importancia que la disponibilidad de elementos nutritivos, también conviene tenerlo en cuenta.

b) Prevención y/o eliminación de obstrucciones y depósitos en redes de riego y emisores:

Las obstrucciones de emisores y redes de riego suceden fundamentalmente por tres causas diferenciadas: físicas (sólidos en suspensión), biológicas (bacterias y algas) y químicas (formación de precipitados). Las aguas de procedencia superficial presentan generalmente problemas asociados a obstrucciones de origen biológico, algas y bacterias que forman agregados obstruyendo los emisores. Los residuos de descomposición de algas pueden acumularse en tuberías y emisores y servir de soporte para el crecimiento de una masa viscosa de bacterias.

Por el contrario, las aguas de procedencia subterránea a menudo contienen elevados niveles de sales en solución que pueden precipitar formando incrustaciones. En las condiciones agroclimáticas del sureste español, muchas de las aguas utilizadas para el riego proceden de acuíferos subterráneos, y la mayor parte poseen un contenido de sales solubles elevado.

El agua es conocida como el disolvente universal, ya que casi todas las sustancias son solubles en agua en alguna extensión. La solubilidad de una determinada sustancia en agua es controlada por variaciones de temperatura, presión, pH, potencial redox y las concentraciones relativas de otras sustancias en solución.

El CO_2 , es muy reactivo en agua y tiene una particular importancia en la disolución y precipitación de las sales. El agua absorbe cierta cantidad de CO_2 del aire, pero mayores cantidades son procedentes de la descomposición de la materia orgánica que el agua arrastra al pasar a través del perfil del suelo. Bajo presión, como sucede en aguas subterráneas, la concentración de CO_2 se incrementa hasta formar ácido carbónico (H_2CO_3). Este ácido débil, puede disolver fácilmente compuestos minerales tales como el carbonato cálcico, muy abundante en el caso de acuíferos subterráneos que proveen de agua a gran número de nuestras zonas de cultivo, para formar bicarbonato cálcico que es soluble en agua. Este proceso permite al carbonato cálcico ser disuelto, transportado y, bajo ciertas condiciones, ser redepositado de nuevo como carbonato cálcico.

El carbonato cálcico es el constituyente más común de las incrustaciones, generalmente en la forma mineral de calcita que se forma a las temperaturas comunes dentro de los sistemas de fertirrigación.

La obstrucción química, usualmente resulta de la precipitación de uno o más de los siguientes elementos: calcio, magnesio, hierro y manganeso. Las aguas que manejamos frecuentemente contienen cantidades significativas de estos elementos y teniendo un pH superior a 7, poseen un riesgo potencial de inducir obstrucciones en los sistemas de riego. Particularmente común, como antes se dijo, es la precipitación de carbonato cálcico, la cual depende de la temperatura y el pH, el incremento de estos parámetros reduce la solubilidad del calcio en agua y da como resultado la precipitación del mineral.

Cuando un agua de pozo es bombeada a la superficie y descargada a través del sistema de riego, la temperatura, la presión y el pH de la misma, a menudo cambian. Esto puede inducir la precipitación de carbonato cálcico u otros minerales que forman incrustaciones en las superficies internas de los componentes del sistema de riego. Además, la evaporación producida a la salida del agua de los emisores concentra las sales en solución favoreciendo enormemente la precipitación y en consecuencia la obstrucción de los mismos.

El riesgo de formación de obstrucciones de origen químico es muy elevado por encima de pH 7,5; con dureza superior a 300 o con niveles de hierro o manganeso mayores de 1,5 ppm. La inyección de ácidos puede evitar o redissolver las incrustaciones, reducir o eliminar la precipitación mineral y crear un ambiente indeseable para el crecimiento microbiano.

La fertirrigación puede también contribuir a los problemas de ensuciamientos y obstrucciones de redes de riego y emisores, ya que estamos aportando fertilizantes minerales que no son más que sales solubles que contiene elementos nutritivos necesarios para el cultivo. Generalmente el elemento adicionado que puede inducir mayores problemas de precipitaciones es el fósforo, concretamente por la posible formación de fosfatos de calcio. A pH superior a 7, la mayor parte del fósforo en solución se encuentra como ion monohidrógeno fosfato (HPO_4^{-2}), este ion se une al calcio formando CaHPO_4 , que es muy poco soluble en agua. Por el contrario, a pH 6, la mayor parte del fósforo en solución se encuentra como ion dihidrógeno fosfato (H_2PO_4^-), que al unirse al calcio forma $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, compuesto de muy elevada solubilidad.

Principales ácidos minerales utilizados en fertirrigación

Los ácidos empleados en fertirrigación para la acidificación de soluciones nutritivas son fundamentalmente los siguientes:

- **Ácido fosfórico:** Se utiliza a 55-75% de riqueza, lo que equivale a 40-54% como P_2O_5 y una densidad de 1,38-1,58 g/cm³. Generalmente se emplea el de mayor gradación, con una riqueza en P_2O_5 variable entre 52-54%, dependiendo de la marca y la partida. Es el fertilizante fosfatado más utilizado en fertirrigación, y frecuentemente se cubren con él la totalidad de las necesidades de fósforo del cultivo.
- **Ácido nítrico:** Se emplea a 56-59% de riqueza, lo que equivale a 12,4-13,1% como nitrógeno nítrico y una densidad en torno a 1,35 g/cm³. Dado su carácter corrosivo y oxidante, es utilizado para la limpieza de redes de riego. Generalmente es utilizado en sistemas de hidroponía y de fertirrigación en general, para completar el ajuste del pH, una vez cubiertas las necesidades de fósforo con la adición de ácido fosfórico. Además, aporta una cantidad de nitratos que puede ser muy considerable de cara a cubrir las necesidades nitrogenadas del cultivo.
- **Ácido sulfúrico:** Se emplea a una riqueza del 98%, su densidad es aproximadamente 1,84 g/cm³. No está extendido su empleo en España, aunque sí a nivel mundial. Además del ajuste del pH de la solución nutriente, aporta una considerable cantidad de azufre.

Conductividad eléctrica (CE) de los ácidos en disolución de agua pura

Antes se comentó que los ácidos son compuestos que aportan o liberan protones (H^+), y este ion es el que posee una mayor conductancia equivalente iónica a dilución infinita, unas siete veces superior al catión sodio (Na^+), esto es, los iones hidrógeno ofrecen una elevada contribución a la CE de una solución dada.

Efectivamente, si observamos las figuras 1, 2 y 3, donde se representa la variación de CE de los principales ácidos empleados en fertirrigación, al adicionarlos sobre agua pura desionizada, podemos ver los grandes incrementos de CE alcanzados. Con sólo 1 ml/L el ácido fosfórico incrementa la CE unos 2,5 dS/m, el nítrico lo hace en torno a 4,6 dS/m y el sulfúrico lleva la CE hasta un valor de 10,1 dS/m.

Figura 1. Incremento de CE por adición de diferentes cantidades de ácido fosfórico 75% a agua pura desionizada. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Incremento de CE por adición de diferentes cantidades de ácido nítrico 56% a agua pura desionizada. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Incremento de CE por adición de diferentes cantidades de ácido sulfúrico 98% a agua pura desionizada. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Véase como el incremento de CE no es exactamente proporcional al aumento de la concentración del ácido en cuestión, lo que lleva a la obtención de curvas en lugar de líneas rectas, este aspecto es más acusado en el caso del ácido fosfórico.

Ahora bien, uno de los principales problemas, por no decir el mayor, de nuestras aguas de riego, es su alta CE debido a su elevado contenido en sales. Por lo tanto, resultaría contraproducente la acidificación de las soluciones nutritivas, a pesar de las numerosas ventajas reseñadas, si esto supone un sensible incremento de CE. Pero, al contrario de lo que cabría suponer, esto no es así, es más como veremos a continuación tras el ajuste del pH de la solución nutritiva mediante la adición de ácidos, la CE no se incrementa o lo hace muy escasamente, y en algunos casos hasta desciende con respecto a la solución inicial.

3.1.1.4. MODIFICACIONES DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN FERTIRRIGACIÓN

AUTOR: ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: *Modificaciones de conductividad eléctrica en fertirrigación*

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: *Horticultura*, 130, Vol. XVII: 50-53. ISSN: 1132-2950

En la primera parte habíamos visto la necesidad de acidificar las soluciones nutritivas en fertirrigación por las ventajas que esto supone, los ácidos minerales más comúnmente empleados en esta práctica y el comportamiento de las disoluciones de estas sustancias en agua pura desionizada desde el punto de vista de la conductividad eléctrica (CE). Ahora veremos lo que sucede en aguas de riego reales desde esta misma perspectiva.

Adición de ácidos a soluciones con presencia de bicarbonatos

Los ácidos se inyectan de la misma forma que un fertilizante, ahora bien, hay que ser cautos, la cantidad de ácido a inyectar depende de la capacidad tampón del agua de riego, un miliequivalente de ácido neutraliza un miliequivalente de bases en el agua, generalmente de ion bicarbonato (HCO_3^-).

La expresión que relaciona el pH de una disolución en función de su composición es:

$$\text{pH} = 6,3 + \log \frac{\text{HCO}_3^- \text{ (mg/L de CaCO}_3\text{)}}{\text{CO}_2 \text{ (mg/L de CO}_2\text{)}}$$

Por experiencia se conoce que neutralizando los bicarbonatos hasta dejar una concentración de 0,3-0,5 mM (mmoles/L), el pH de la solución nutritiva se sitúa en 5,3-5,5. Es decir, si nosotros disponemos de un agua de riego con 6 mM de bicarbonatos y deseamos que la solución nutritiva a emplear tenga un pH sobre 5,5, al ser este el valor idóneo en la mezcla fertirrigante de partida para tener una más adecuada disponibilidad de nutrientes en el entorno radicular y que además previene la formación de precipitados que pudieran ensuciar u obstruir la red de riego deberemos neutralizar 5,5 mM de bicarbonatos mediante el aporte de 5,6 miliequivalentes de ácido. En la tabla 11 se muestra la equivalencia aproximada entre el peso, el volumen y los miliequivalentes de ácido para los productos más comúnmente empleados.

Tabla 11. Equivalencia entre peso, volumen y miliequivalentes de ácido para los tres ácidos de uso más común en fertirrigación.

PRODUCTO	Volumen	Peso	Miliequivalentes de ácido
H ₃ PO ₄ 75%	1 cm ³	1,58 g	12,1
HNO ₃ 59%	1 cm ³	1,36 g	12,7
H ₂ SO ₄ 98%	1 cm ³	1,84 g	36,8

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se muestra el volumen de ácido fosfórico 75% necesario para ajustar el pH al valor de 5,3, en disoluciones de bicarbonato sódico en agua destilada. La curva generada es perfectamente trasladable a aguas de riego con esas concentraciones en bicarbonatos, así para un agua de riego 5 mM en bicarbonatos se requerirían, por cada 100 litros de la misma, unos 39 ml de ácido fosfórico 75%, para ajustar el pH a 5,3, aunque probablemente esto excediera las necesidades de fósforo del cultivo.

Figura 4. Volumen de ácido fosfórico 75%, necesario para ajustar el pH al valor de 5,3, en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente.

Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 5 y 6 muestran lo mismo para el ácido nítrico 59% y el ácido sulfúrico 98%, respectivamente. En el caso del nítrico, se necesita prácticamente la misma cantidad (40 ml), para llevar a pH 5,3 un volumen de agua de riego 5 mM en bicarbonato de 100 litros. En el caso del sulfúrico, mucho menos (13 ml).

Figura 5. Volumen de ácido nítrico 59%, necesario para ajustar el pH al valor de 5,3, en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Volumen de ácido sulfúrico 98%, necesario para ajustar el pH al valor de 5,3, en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente.

Fuente: Elaboración propia.

Modificación de la CE de aguas con bicarbonatos tras su acidificación

La acidificación de una solución nutritiva con presencia notable de bicarbonatos siempre supone una reacción de neutralización, de esta manera si adicionamos ácido nítrico, la reacción que se produce es la siguiente:

Es decir, a efecto de especies iónicas, que son las determinantes de la CE de la solución, se produce la desaparición del anión bicarbonato (HCO_3^-) y la nueva presencia en disolución del anión nitrato (NO_3^-).

Al tener el nitrato una contribución a la CE ligeramente superior debido a su mayor movilidad, la CE de la solución acidificada se verá incrementada, pero no en la proporción esperada por la adición del ácido, ya que hay que descontar la CE debida a la presencia del bicarbonato neutralizado en el agua de riego.

En el caso del ácido fosfórico, la neutralización de bicarbonatos nos genera en la disolución iones fosfato (H_2PO_4^- , a los valores de pH habituales de las disoluciones nutritivas), estos muestran una contribución a la CE inferior a la que presentaba el ion bicarbonato, con lo cual, tras la acidificación la CE de la solución no solo no se verá incrementada notablemente su CE, sino que esta descenderá respecto a la solución inicial (agua de riego).

La figura 7 muestra los incrementos de CE tras el ajuste a pH 5,3 de soluciones conteniendo diferentes concentraciones de bicarbonatos con ácido nítrico 59%. El ajuste de pH de un agua 5 mM en bicarbonatos, tan sólo supone un incremento de CE aproximado de 0,1 dS/m.

Figura 7. Incremento de CE en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente tras su ajuste a pH 5,3 con ácido nítrico 59%. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 8, muestra lo mismo referido a la utilización de ácido fosfórico. En este caso la tendencia es a disminuir la CE, de este modo el ajuste de pH de un agua 5 mM en bicarbonatos, supone un descenso de CE superior a 0,1 dS/m. Quede claro que, las necesidades de fósforo de la mayoría de los cultivos en fertirrigación, se cubren con un aporte máximo de 1,5-2 mM en la solución nutritiva, de esta forma, observando la gráfica, comprobaremos que la adición de tal cantidad de ácido fosfórico no supone cambio apreciable en la CE de la solución nutritiva.

Figura 8. Incremento de CE en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente tras su ajuste a pH 5.3 con ácido fosfórico 75%. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

La figura 9 muestra el comportamiento de la CE tras el ajuste de pH con ácido sulfúrico. Nótese como la CE en soluciones con baja concentración de bicarbonatos se incrementa ligeramente, mientras que, para soluciones más concentradas, el ajuste de pH con sulfúrico supone un descenso de CE. Este comportamiento es debido a la dinámica del ion sulfato generado, que por su carácter divalente muestra una acusada pérdida de movilidad conforme aumenta su concentración.

De este modo el ajuste de pH a 5,3 con ácido sulfúrico de un agua de riego 5 mM en bicarbonatos, supone un incremento de CE de 0,066 dS/m, mientras que este ajuste para un agua de riego 15 mM en bicarbonatos supone un descenso de CE de 0,155 dS/m.

Figura 9. Incremento de CE en disoluciones de bicarbonato sódico de concentración creciente tras su ajuste a pH 5,3 con ácido sulfúrico 98%. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

A efectos prácticos, interesa relacionar este incremento de CE con el volumen aportado del ácido correspondiente, de tal forma que podamos conocer la variación de CE prevista para cada ácido en función de la cantidad aportada a aguas con suficiente presencia de bicarbonatos. Así, podemos obtener las curvas representadas en las figuras 10, 11 y 12.

Figura 10. Incremento de CE tras ajuste a pH 5,3 en función del volumen de ácido nítrico 59% consumido. La ecuación expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Incremento de CE tras ajuste a pH 5,3 en función del volumen de ácido fosfórico 75% consumido. La ecuación expresa la variación de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Incremento de CE tras ajuste a pH 5,3 en función del volumen de ácido sulfúrico 98% consumido. La ecuación expresa la variación de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C .

Incremento de CE tras adición de ác. sulfúrico hasta pH = 5,3

Fuente: Elaboración propia.

Aguas con escasa presencia de bicarbonatos

Está claro que todo lo anteriormente referido es válido para soluciones y aguas de riego con cierta presencia del ion bicarbonato. En sistemas hidropónicos y de fertirrigación en general, el modo habitual de proceder es aportar las necesidades de fósforo (aproximadamente 1,5 mM) como fosfórico y completar el ajuste hasta el pH deseado (normalmente 5,5) con ácido nítrico, que a su vez aporta cierta cantidad de nitratos.

Para cubrir las necesidades de fósforo, en este caso general, y que queden unos 0,5 mM de bicarbonatos tras el ajuste, es preciso que el agua de riego empleada tenga, al menos, una concentración 2 mM en bicarbonato. Pero esto no sucede cuando operamos con aguas de mejor calidad, por ejemplo, procedentes de procesos de desalación, y escasa presencia de ion bicarbonato.

Una vez que se neutralicen la totalidad de bicarbonatos, se habrá agotado la capacidad tampón de nuestra disolución, estaremos a pH 4, y una mínima cantidad más de ácido aportado nos haría descender el pH de la solución hasta valores tremendamente peligrosos para el sistema radicular del cultivo (sobre todo si estamos operando en hidroponía). Cuando disponemos de

aguas con concentraciones bajas de bicarbonatos ($< 1,5\text{-}2,0\text{ mM}$), las necesidades de fósforo no pueden ser cubiertas, al menos en su totalidad, mediante el empleo de ácido fosfórico, y debemos recurrir al uso de otras fuentes de fósforo aptas para fertirrigación, esto es, hay que emplear fundamentalmente fosfato monoamónico o fosfato monopotásico. Este último es el más recomendable en hidroponía donde no se pueden efectuar aportes de amonio superiores a $0,5\text{-}0,8\text{ mM}$ en nuestras condiciones agroclimáticas, debido a la fitotoxicidad que induce, las probables modificaciones del pH de la solución que provoca y sus importantes interacciones con otros iones.

3.1.1.5. ABONADO Y SALINIDAD EN FERTIRRIGACIÓN

AUTOR: ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: Abonado y salinidad en fertirrigación

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: Horticultura, 131, Vol. XVII: 90-95. ISSN: 1132-2950

En este artículo se expone el estudio que recoge las curvas de aumento del contenido salino, incremento de conductividad eléctrica (CE), de los abonos más comúnmente empleados en nuestro país bajo técnicas de fertirrigación. Se excluyen los ácidos nítrico, fosfórico y sulfúrico, vistos anteriormente.

Se denomina fertilizante o abono a todo producto natural o sintético, orgánico o inorgánico, que se añade al suelo o a las plantas para poner a disposición de estas, nutrientes necesarios para su desarrollo. Los fertilizantes empleados en fertirrigación deben ser abonos líquidos o sólidos especiales de alta solubilidad, es decir, cuyo residuo insoluble en agua a 15°C, a la mayor dosis recomendada para su empleo sea menor del 0,5%.

El problema de la salinidad

En las zonas áridas y semiáridas, como la del sureste español, la salinidad constituye el principal factor limitante de la productividad de los cultivos. En estas zonas, el riego es una práctica imprescindible y las lluvias son demasiado escasas como para arrastrar las sales lejos del alcance de las raíces, lo mismo que sucede en cultivos protegidos (invernaderos). En condiciones húmedas, las sales solubles originariamente presentes en los materiales del suelo y las formadas por transformación de minerales, son llevadas a capas inferiores, hacia acuíferos subterráneos, y finalmente transportadas a los océanos.

La salinización de los suelos agrícolas como consecuencia de la práctica del riego constituye uno de los ejemplos más antiguos de contaminación del suelo. La tercera parte de las zonas de regadío mundiales se encuentran afectadas por contenidos salinos excesivos en la actualidad, y el problema tiende a crecer, ya que la expansión de los regadíos lleva al uso de suelos marginales hasta ahora no utilizados y a una sobreexplotación de acuíferos subterráneos cada vez con mayor cantidad de sales solubles.

La salinidad de un suelo puede tener principalmente tres orígenes diferentes. En primer lugar, que se trate de un asentamiento salino de por sí, es decir, suelos formados sobre yacimientos salinos, antiguas cuencas marinas, rocas que liberen gran cantidad de sales solubles, etc. En segundo término, que exista una capa freática alta y con elevado contenido en sales, que acumula en el suelo cada vez que crece su nivel. Y en tercer lugar que la salinidad sea debida a los aportes salinos del agua de riego empleada (o a un aporte incontrolado de fertilizantes), esta última forma es la más grave y sobre ella podemos ejercer acciones de control.

Como norma general, los abonos sólidos empleados en fertirrigación son sales altamente disociables, es decir, en disolución se separan en sus correspondientes partes catiónica y aniónica (lo que ya sucede en los abonos líquidos) generando un incremento específico de la CE, esto conlleva un aumento de la presión osmótica de la disolución disponible en el entorno radical, lo que dificulta la absorción hídrica por parte de la planta.

En multitud de bibliografía se recogen tablas de sensibilidades, tolerancias y resistencias de diversos cultivos a la salinidad en función de la CE, en este parámetro no sólo hay que considerar la CE del agua de riego, sino que hay que añadir el incremento sufrido en la misma al adicionar los fertilizantes.

De una manera muy genérica, ya que depende de numerosos factores (especie y estado fenológico, técnica de riego, sistema de cultivo, calidad del agua de riego, tipo de suelo / sustrato, condiciones climáticas, etc.), se puede considerar como idónea una CE total de 2-3 dS/m, con un máximo de incremento de CE debido al abonado de 1 dS/m.

Curvas de CE de los principales abonos para fertirrigación

En las figuras 13 a 24 se muestran las curvas de CE correspondientes a los 12 fertilizantes sólidos más empleados en fertirrigación. La ecuación mostrada en las figuras expresa el incremento de CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C.

Estos valores de CE han sido determinados en laboratorio utilizando agua pura desionizada y concentraciones de productos comerciales que abarcan los rangos reales empleados en fertirrigación, es decir, cantidades muy bajas de fertilizante en agua, las cuales han sido establecidas mediante balanza analítica de 0,0001 g de precisión. El hecho de determinar estas curvas en agua pura en lugar de utilizar aguas de riego obedece a que no existen patrones establecidos para las mismas, es decir, cada agua de riego presenta una composición distinta que interfiere, en mayor o menor medida, en los incrementos de CE ocasionados por la adición de fertilizantes.

Los valores de CE presentados en las curvas no pueden ser trasladados directamente como aumentos de CE previstos en un agua de riego determinada, ya que estos dependen directamente de factores intrínsecos del agua de riego, principalmente de su fuerza iónica y del tipo de iones presentes. En cualquier caso, resultan imprescindibles para, tras las adecuadas correcciones en función de la fuerza iónica del agua, servir como base de cálculo para establecer los niveles de salinidad inducidos por cada fertilizante y poder, de este modo, programar de forma correcta la CE que cabe esperar en una mezcla preestablecida de fertilizantes y agua de riego.

Figura 13. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de nitrato amónico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-0,2 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de urea. Aquí las unidades de CE son $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C, con lo que apenas resultan apreciables.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 15. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de nitrato potásico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-1,0 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 16. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de nitrato cálcico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-1,0 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 17. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de nitrato de magnesio en rango de concentraciones habitual en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 18. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de sulfato amónico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-0,2 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de sulfato de potasio en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de sulfato de magnesio en rango de concentraciones habitual en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de fosfato monoamónico en rango de concentraciones usual en cultivos sin suelo (0-0,2 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de fosfato monopotásico en rango de concentraciones usual en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de cloruro potásico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Incrementos de CE en agua desionizada ocasionados por adición de cloruro sódico en rango de concentraciones habitual de uso en cultivos sin suelo (0-0,5 g/L).

Fuente: Elaboración propia.

Particularidades de empleo de cada fertilizante

- Nitrato amónico (33,5% N) (figura 13): Es el conocido 33,5, quizá el abono sólido más empleado en fertirrigación, con la mitad de su nitrógeno en forma nítrica y la otra mitad en forma amoniacal. Sin embargo, en hidroponía su utilización se reduce al empleo de dosis muy pequeñas. Esto es debido a la fitotoxicidad del ion amonio (NH_4^+), esta forma nitrogenada es directamente asimilable por la planta y, en la zona del sureste español, por encima de 0,5 mM en la disolución nutritiva ya puede presentar problemas de toxicidad, por ello en cultivo hidropónico sobre sustratos inertes sólo se utiliza nitrato amónico en situaciones de gran demanda de nitrógeno. Sin embargo, para el cultivo en suelo y en sustratos orgánicos es un fertilizante cuyo empleo ofrece muchas ventajas, es acidificante, de gran riqueza y la forma amónica es retenida por el complejo coloidal (minimizando las pérdidas por lavado del perfil) y es absorbida por la planta a medida que se transforma en ion nitrato mediante el proceso de nitrificación realizado por bacterias nitrificantes. La CE de una solución de nitrato de amonio de 0,5 g/L en agua pura es de 0,850 dS/m, es decir, provoca aumentos de CE elevados.
- Urea (46% N) (figura 14): Es el fertilizante nitrogenado de mayor riqueza, con un 46% de nitrógeno en forma amídica, que debe pasar a ion nitrato para ser absorbido por el cultivo. Apenas se emplea en cultivo hidropónico, pero sí es muy utilizada en fertirrigación de cultivos en suelo, donde se transforma en la forma nítrica tras un paso intermedio por la forma amoniacal. Estas transformaciones son dependientes de múltiples factores tales como humedad, temperatura, tipo de suelo, contenido en materia orgánica, etc., lo que origina no tener totalmente controlado su grado de aprovechamiento en la nutrición del cultivo. Durante su proceso de fabricación puede quedar contaminada por un compuesto fitotóxico denominado biuret, este, como norma general, debe ser inferior al 0,3% para su empleo en fertirrigación. Desde el punto de vista de la CE, constituye una muy ventajosa excepción, al ser una forma orgánica no disociada en disolución, no provoca aumento alguno de la CE al añadirla al agua de riego.
- Nitrato potásico (13-46-0) (figura 15): Constituye la fuente potásica más utilizada en fertirrigación, frecuentemente se cubren las necesidades de potasio con el uso exclusivo de este fertilizante. Una disolución de 0,5 g/L en agua pura presenta una CE de 0,693 dS/m, es decir, muestra incrementos de CE relativamente elevados.
- Nitrato cálcico (15,5% N y 27% CaO) (figura 16): Es un fertilizante muy empleado en fertirrigación. El suministro de cantidades de calcio adicionales a las presentes en el agua de riego resulta a veces beneficioso ante excesos relativos de sodio (para prevenir la degradación de la estructura del suelo) y de magnesio o para prevenir fisiopatías ocasionadas por deficiencia cálcica tales como el blossom end rot (podredumbre apical) de tomates, pimientos y melones, el tipburn de lechugas, el bitter pit de manzanas o la vitrescencia del melón. Una pequeña parte de su nitrógeno (alrededor del 1%) está en forma amoniacal, y puede ser suficiente para cubrir las exigencias de esta forma nitrogenada en situaciones de gran demanda en cultivo hidropónico. El mayor

inconveniente de este fertilizante es su precio. Una disolución de 0,5 g/L presenta una CE de 0,605 dS/m, muestra niveles medios de incremento de CE.

- Nitrato de magnesio (11% N y 15,7% MgO) (figura 17): Abono empleado sólo ante situaciones de potencial carencia de magnesio, su empleo no está muy difundido. Una disolución de 0,5 g/L presenta una CE de 0,448 dS/m, es decir, muestra incrementos de CE bajos.
- Sulfato amónico (21%N y 58% SO₃) (figura 18): Abono empleado en situaciones de potencial carencia de azufre, es acidificante y su uso en hidroponía está muy limitado por lo anteriormente referido respecto al ion amonio. Una disolución de 0,5 g/L presenta una CE de 1,033 dS/m, es decir, muestra incrementos de CE extremadamente altos (además de mostrar una riqueza nitrogenada no muy elevada), por lo que su empleo con aguas de riego salinas es poco aconsejable, sobre todo si son ricas en sulfatos.
- Sulfato potásico (50-52% K₂O y 46,5-47,5% SO₃) (figura 19): Es el segundo abono potásico más ampliamente utilizado. Su empleo viene motivado principalmente por situaciones de carencia potencial de azufre o por necesidades de abonado potásico sin incrementos en el aporte de nitrógeno. Una disolución de 0,5 g/L muestra una CE de 0,880 dS/m, por lo que provoca aumentos de CE altos, limitando su empleo en aguas de alta salinidad, sobre todo si en ellas predomina el ion sulfato.
- Sulfato de magnesio (16% MgO y 31,7% SO₃) (figura 20): Es generalmente la fuente de magnesio empleada en fertirrigación ante situaciones potenciales de carencia magnésica, ya que se aporta el magnesio adicional necesario sin modificar el equilibrio NPK. Una disolución de 0,5 g/L tiene una CE de 0,410 dS/m, es un abono que provoca incrementos de CE bajos.
- Fosfato monoamónico (12% N y 60% P₂O₅) (figura 21): Es el abono fosfatado sólido más empleado en fertirrigación. En cultivo hidropónico su uso está limitado ya que la totalidad de su nitrógeno está en forma amoniacal, en suelo, su empleo está siendo cada vez más desplazado por las múltiples ventajas que supone la utilización de ácido fosfórico como fuente de fósforo. Una disolución de 0,5 g/L muestra una CE en agua pura de 0,455 dS/m, es decir, provoca incrementos bajos de CE.
- Fosfato monopotásico (51% P₂O₅ y 34% K₂O) (figura 22): Se trata de un abono de excelentes cualidades físico - químicas y nutricionales, pero con un precio muy elevado. En hidroponía puede ser empleado con aguas muy buenas, con escasa presencia de bicarbonatos (donde el empleo de ácido fosfórico hace caer el pH hasta valores extremadamente bajos). Una disolución de 0,5 g/L en agua pura presenta una CE de solo 0,375 dS/m, es un fertilizante que provoca aumentos de Ce muy bajos.
- Cloruro potásico (60% K₂O) (figura 23): Fertilizante de gran riqueza en potasio, pero con el inconveniente de aportar gran cantidad de cloruro, con lo que su uso queda restringido a aguas de buena calidad, con niveles de cloruros nulos o muy bajos, o para

aquellos casos donde económicamente compense su utilización la potencial merma en la producción del cultivo. Una disolución de 0,5 g/L muestra una CE de 0,948 dS/m, provoca incrementos de CE muy altos.

- Cloruro sódico (figura 24): Se utiliza en situaciones concretas de agua de muy baja CE en cultivos como tomate, que requieren CE relativamente altas para favorecer procesos de maduración, firmeza de la fruta y, sobre todo, elevación de su contenido en azúcares. La CE de una disolución de 0,5 g/L de cloruro sódico en agua pura es de 1,003 dS/m, es decir, se trata de un producto barato que genera incrementos de CE muy elevados, lo pretendido por su empleo.

3.1.1.6. OTRAS CONSIDERACIONES RESPECTO A LA CARACTERIZACIÓN DE LOS FERTILIZANTES PARA FERTIRRIGACIÓN

En este apartado se aporta información indispensable para abordar con posterioridad el diseño del software, basado en el cálculo de las diferentes disoluciones nutritivas que el cultivo va requiriendo según avanza su ciclo. De esta forma, se completa la caracterización de los diferentes productos fertilizantes a emplear en los cálculos según parámetros de riqueza, solubilidad, compatibilidad de mezcla, etc.

Elaboración de la solución nutritiva. Unidades de expresión

Tradicionalmente se ha manejado un abonado de fondo o de cobertera en estado sólido y de manera independiente del aporte hídrico, es decir, a cada árbol o a cada ha de cultivo había que aplicar cierta cantidad de fertilizantes y el volumen de agua que se estimara oportuno (si era factible). Las unidades a manejar eran peso de determinado abono o unidades fertilizantes NPK (como peso expresado en las formas N, P_2O_5 y K_2O , respectivamente), por unidad de cultivo, por lo que las unidades a manejar son sencillamente de cantidad (peso).

Cuando pasamos a las nuevas técnicas de fertirrigación, lo que aplicamos son disoluciones nutritivas, es decir, volúmenes de disoluciones acuosas con una composición determinada. Para expresar la composición de una disolución se utiliza el concepto de concentración, que se define como la cantidad de soluto en una determinada cantidad de disolvente o disolución.

La concentración de una disolución se puede expresar bajo las siguientes formas (entre otras de uso menos aplicado a este caso):

- Expresión de la concentración en unidades físicas:
 - Gramos por litro de disolución: Peso de una determinada especie por unidad de volumen. En nuestro caso manejamos frecuentemente mg/L, que equivalen a ppm al tratarse de disoluciones acuosas altamente diluidas.
 - %: Gramos de soluto por 100 gramos de disolución.
- Expresión de la concentración en unidades químicas:
 - Molaridad (M): Número de moles de un determinado soluto contenidos en 1 litro de disolución (moles/L). En nuestro caso empleamos mmoles/L (mM) para trabajar con cifras más manejables.
 - Normalidad (N): Número de equivalentes-gramo de un determinado soluto contenidos en 1 litro de disolución (eq/L). En nuestro caso empleamos meq/L para trabajar con cifras más manejables.

En la tabla 12 se muestran los pesos iónicos o moleculares de las especies que tenemos que manejar en la preparación de una disolución nutritiva, así como las formas químicas bajo las que son absorbidas por el cultivo.

Tabla 12. Elementos esenciales para las plantas y las formas en las que son principalmente absorbidos o asimilados.

ELEMENTO ESENCIAL	PESO ATÓMICO	FORMA DE ABSORCIÓN	PESO IÓNICO O MOLECULAR
Nitrógeno	14,0	NO_3^-	62,0
		NH_4^+	18,0
Fósforo	31,0	H_2PO_4^-	97,0
Potasio	39,1	K^+	39,1
Calcio	40,1	Ca^{+2}	40,1
Magnesio	24,3	Mg^{+2}	24,3
Azufre	32,1	SO_4^{-2}	96,1
Boro	10,8	H_3BO_3	61,8
Hierro	55,8	Fe^{+2}	55,8
Manganeso	54,9	Mn^{+2}	54,9
Cinc	65,4	Zn^{+2}	65,4
Cobre	63,5	Cu^{+2}	63,5
Cloro	35,5	Cl^-	35,5
Molibdeno	95,9	MoO_4^{-2}	159,9
Níquel	58,7	Ni^{+2}	
Carbono	12,0	CO_2	44,0
		HCO_3^-	61,0
		CO_3^{-2}	60,0
Hidrógeno	1,0	H_2O	18,0
		En otros iones	
Oxígeno	16,0	H_2O	18,0
		En otros iones	

Fuente: Elaboración propia.

Cuando nos referimos a la cantidad de nutrientes en disolución, los datos son referidos a concentraciones molares o equivalentes (mmoles/L o meq/L), por ser este término de expresión más correcto al manejar disoluciones acuosas, en las que los diferentes nutrientes se encuentran fundamentalmente en forma iónica, es decir, manejamos las mismas formas que

las plantas están absorbiendo para incorporar los diferentes elementos esenciales a su metabolismo.

Límites legales y composiciones normales comercializadas

La tabla 13 muestra los límites legales y las composiciones normales comercializadas de los fertilizantes sólidos y líquidos de uso más extendido para los cultivos sin suelo.

Tabla 13. Límites legales y composiciones normales comercializadas de los productos fertilizantes de uso más difundido para el cultivo sin suelo. Las cantidades se reseñan como porcentajes en peso del producto.

FERTILIZANTE	LÍMITES LEGALES DE COMPOSICIÓN Y CONTENIDOS QUE DEBEN DECLARARSE	COMPOSICIONES NORMALES DE PRODUCTOS COMERCIALES
Abonos simples nitrogenados sólidos		
NITRATO DE CALCIO (O DE CAL)	Límites: 15% N total mín.; 5% N-NH ₄ ⁺ máx. Información obligatoria: N total Información suplementaria: Contenidos en N-NO ₃ ⁻ y N-NH ₄ ⁺	*15,5-15,7% N total (14,4-14,7% N-NO ₃ ⁻ ; 1-1,1% N-NH ₄ ⁺) *27-28% CaO soluble en agua
NITRATO DE MAGNESIO	Límites: 10% N-NO ₃ ⁻ mín.; 14% MgO soluble en agua mín. Información obligatoria: N-NO ₃ ⁻ MgO soluble en agua	*11% N total *15-15,7% MgO soluble en agua
SULFATO AMÓNICO	Límites: 20% N-NH ₄ ⁺ mín. Información obligatoria: Contenido en N-NH ₄ ⁺	*21% N-NH ₄ ⁺ *58,8% SO ₃
NITRATO AMÓNICO CON ALTO CONTENIDO EN NITRÓGENO	Límites: 28% N total mín. Información obligatoria: Contenidos en N total, N-NO ₃ ⁻ y N-NH ₄ ⁺	*33,5% N total (16,75% N-NO ₃ ⁻ + 16,75% N-NH ₄ ⁺)
UREA	Límites: 44% N total expresado como N ureico; Biuret 1,2% máx. Información obligatoria: N total expresado como nitrógeno ureico	*46% N total ureico *Biuret máx. 0.25%

Abonos simples potásicos sólidos		
CLORURO DE POTASIO	Límites: 37% K ₂ O soluble en agua mín. Información obligatoria: K ₂ O soluble en agua	*60-63% K ₂ O soluble en agua
SULFATO DE POTASIO	Límites: 47% K ₂ O soluble en agua mín.; 3% Cl máx. Información obligatoria: K ₂ O soluble en agua Información suplementaria: contenido en Cl, si es inferior al 3%	*50-53.8% K ₂ O *46.5-48.4% SO ₃ *<1% Cl *<1% Na
Abonos binarios NP sólidos		
1. FOSFATO MONOAMÓNICO (MAP) 2. FOSFATO BIAMÓNICO (DAP)	Normativa general: Límites: 18% mín. en elementos fertilizantes (N+P ₂ O ₅), 20% si es sólido de alta solubilidad Información obligatoria: N total, especificando aquellas formas nitrogenadas de contenido superior al 1% (N-NH ₄ ⁺ o N-ureico); P ₂ O ₅ soluble en agua	MAP: *12% N-NH ₄ ⁺ *60-61% P ₂ O ₅ DAP: *16-21% N-NH ₄ ⁺ *46-54% P ₂ O ₅
Abonos binarios NK sólidos		
NITRATO POTÁSICO	Normativa general: Límites: 18% mín. en elementos fertilizantes (N+K ₂ O), 20% si es sólido de alta solubilidad Información obligatoria: N total, especificando aquellas formas nitrogenadas de contenido superior al 1% (N-NO ₃ ⁻); K ₂ O soluble en agua	*13% N-NO ₃ ⁻ *46% K ₂ O soluble en agua
Abonos binarios PK sólidos		
FOSFATO MONOPOTÁSICO	Normativa general: Límites: 18% mín. en elementos fertilizantes (P ₂ O ₅ +K ₂ O), 20% si es sólido de alta solubilidad Información obligatoria: P ₂ O ₅ y K ₂ O solubles en agua	*51,5-52,2% P ₂ O ₅ *34-34,5% K ₂ O
Abonos nitrogenados líquidos		
ÁCIDO NÍTRICO	Límites: 10% N en forma de N-NO ₃ ⁻ mín. Información obligatoria: N total en forma de N-NO ₃ ⁻ , además se incluirán los pictogramas, frases de riesgo y frases de seguridad que le sean aplicables como sustancia peligrosa	*12,4-13,1% N-NO ₃ ⁻ , que equivalen al 56-59% de riqueza en ácido y densidades de 1,345-1,362 g/cm ³

Abonos fosfatados líquidos		
ÁCIDO FOSFÓRICO	Límites: 40% P ₂ O ₅ mín. Información obligatoria: %P ₂ O ₅ total del ácido ortofosfórico, además se incluirán los pictogramas, frases de riesgo y frases de seguridad que le sean aplicables como sustancia peligrosa	*40-54% P ₂ O ₅ , que equivalen al 55-75% de riqueza en ácido y densidades de 1,38-1,58 g/cm ³
Abonos de elementos secundarios		
SULFATO DE MAGNESIO	Límites: 15% MgO soluble en agua mín.; 28% SO ₃ soluble en agua mín. Información obligatoria: MgO soluble en agua Información suplementaria: SO ₃ soluble en agua	*16% MgO *31,7% SO ₃
ACIDO SULFÚRICO	Información obligatoria: Riqueza en H ₂ SO ₄ , además se incluirán los pictogramas, frases de riesgo y frases de seguridad que le sean aplicables como sustancia peligrosa	*98% de riqueza en ácido

Aportes molares de los diferentes productos fertilizantes

Ya se vio en el apartado anterior la conveniencia de expresar la disolución nutritiva en unidades químicas de concentración (mM o meq/L). Para establecer las conversiones pertinentes a cantidades relativas de fertilizantes, se puede utilizar la tabla 14.

Se trata de una tabla de doble entrada donde podemos pasar de mmoles a peso de fertilizante comercial (no productos puros) donde ya se han tenido en cuenta las riquezas relativas y las impurezas de cada fertilizante, de acuerdo con las composiciones normales y las riquezas normalmente garantizadas (apartado anterior) en los productos fertilizantes de uso más difundido para el cultivo sin suelo.

Tabla 14. Cantidad de milimoles de componentes iónicos aportados por gramo (fertilizantes sólidos) o ml (líquidos) de los principales fertilizantes empleados en fertirrigación. Los cálculos se han efectuado teniendo en cuenta las composiciones normalmente garantizadas.

FERTILIZANTES LÍQUIDOS, 1 ml de:	IONES (mmoles/ml de fertilizante)									
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Na ⁺	H ⁺
Ácido fosfórico 75%			12,0							12,0
Ácido nítrico 59%	12,7									12,7
Ácido sulfúrico 98%							18,8			37,6
FERTILIZANTES SÓLIDOS, 1 g de:	IONES (mmoles/g de fertilizante)									
	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Na ⁺	H ⁺
Nitrato amónico 33.5% N	12,0	12,0								
Nitrato potásico (13-0-46)	9,3			9,8						
Nitrato cálcico 15.5% N, 27%	10,3	0,8			4,8					
Nitrato magnesio 11% N,	7,9					3,9				
Sulfato amónico 21% N, 58.8%		15,0					7,4			
Sulfato potásico 52% K ₂ O,				11,0			5,9			
Sulf. Magnesio 16% MgO,						4,0	4,0			
Fosfato monoamónico (12-61-		8,6	8,6							
Fosfato monopotásico (0-51-			7,2	7,2						
Cloruro potásico 60% K ₂ O				12,7				12,7		
Cloruro sódico								17,1	17,1	

Fuente: Elaboración propia.

Disoluciones madre o concentradas. Compatibilidad entre fertilizantes

Para elaborar una disolución nutritiva, generalmente se parte de disoluciones madre de fertilizantes, donde se separan los fertilizantes según su grado compatibilidad y se concentran según su solubilidad relativa y proporciones requeridas (tablas 15 y 16). Estas disoluciones concentradas se diluyen para obtener la disolución nutriente final que se aporta a la planta.

Tabla 15. Orientaciones sobre la compatibilidad de mezclas de los principales fertilizantes para fertirrigación.

	SA	U	NC	NM	NP	NA	AF	AN	AS	MAP	FMP	CP	SP	SM	CS
SA		X	O	X	+	+	X	X	X	X	X	+	+	+	+
U	X		X	X	X	O	X	X	X	X	X	+	+	X	+
NC	O	X		+	+	O	O	+	O	O	O	+	O	O	+
NM	X	X	+		+	+	X	+	X	X	X	+	X	X	+
NP	+	X	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NA	+	O	O	+	+		X	X	X	X	X	+	+	+	+
AF	X	X	O	X	+	X		X	X	X	X	+	+	X	+
AN	X	X	+	+	+	X	X		X	X	X	+	+	+	+
AS	X	X	O	X	+	X	X	X		X	X	+	+	+	+
MAP	X	X	O	X	+	X	X	X	X		+	+	+	X	+
FMP	X	X	O	X	+	X	X	X	X	+		+	+	X	+
CP	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+
SP	+	+	O	X	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+
SM	+	X	O	X	+	+	X	+	+	X	X	+	+		+
CS	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	

SA: Sulfato amónico. U: Urea. NC: Nitrato cálcico. NM: nitrato de magnesio. NP: Nitrato potásico. NA: Nitrato amónico. AF: ácido fosfórico. AN: ácido nítrico. AS: ácido sulfúrico. MAP: Fosfato monoamónico. FMP: fosfato monopotásico. CP: cloruro potásico. SP: sulfato potásico. SM: sulfato de magnesio. CS: cloruro sódico

O: Mezcla prohibida

X: Mezcla posible en el momento de su aplicación

+: Mezcla sin limitaciones

Tabla 16. Concentraciones máximas aconsejables para la preparación de las disoluciones madre y concentraciones normalmente empleadas en los tanques de solución madre.

FERTILIZANTE	Concentración máxima aconsejada para solución madre	Concentración normalmente empleada para solución madre
Nitrato amónico	35%	20%
Urea	35%	10%
Ácido fosfórico	Sin límite	10%
Ácido nítrico	Sin límite	10%
Ácido sulfúrico	Sin límite	10%
Fosfato monoamónico	15% en invierno 20% en verano	10%
Nitrato potásico	12% en invierno 15% en verano	10-15%
Sulfato amónico	12%	7,5%
Sulfato potásico	10%	7,5%
Nitrato cálcico	30%	20%
Nitrato de magnesio	25%	10%
Fosfato monopotásico	20%	10%
Cloruro potásico	20%	10%
Cloruro sódico	25%	5%
Sulfato de magnesio	10%	7,5%

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. ENSAYOS DE CAMPO

Para completar y comprobar toda la información básica establecida, así como la recopilación de información obtenida según los términos típicos de aplicación en la fertirrigación de los cultivos sin suelo, se llevaron a cabo multitud de experiencias y ensayos de campo.

Una serie de estos trabajos fueron publicados o expuestos en diversos congresos y reuniones científicas. Algunos se muestran a continuación. Como cada trabajo tiene su propio cuerpo autoconclusivo, se ha preferido mantener el cuerpo del mismo con su misma estructura, para respetar de forma íntegra la información que ofrece.

3.1.2.1. HYDRIC AND NUTRIENT ELEMENT NUTRITION OF A TOMATO CROP ON ROCKWOOL: IONIC INTERRELATIONSHIP

AUTORES: ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C.

TÍTULO: *Hydric and Nutrient Element Nutrition of a Tomato Crop on Rockwool: Ionic Interrelationship.*

CLAVE: A FECHA: 1997

REF. REVISTA: *Journal of Plant Nutrition*, 20(12): 1811-1828.

Abstract

The hydric and nutrient element nutrition of tomato plants (cv. Rambo) cultivated in a greenhouse on rockwool was studied by following the daily net uptake by the plant of nutrient elements and water and the changes occurring in the nutrient solution and drainage solution in order to establish the actual demand of the plant for each nutrient element and the relation between the uptake of each ion with the uptake of other ions under the agronomic conditions of this experiment. In this way, we attempted to optimize the fertigation program to increase the final size and quality of the crop. The accumulative uptake of water and nutrient elements by plants over the whole cultivation period, from 20 days after transplanting, fits quadratic curves since the absorption rates increase constantly as the plant develops (positive quadratic term), particularly those which are present in excess in the irrigation water (larger quadratic term). The slopes of the curves corresponding to nutrient element uptake increased in the following order: nitrate, potassium, and calcium (the same order as that in the leaf). The results demonstrate that water uptake is closely related with calcium and potassium ion uptake and that there is a reciprocal relationship in the uptake of the potassium-ammonium and phosphate-nitrate pairs. The absorption of magnesium was related to the uptake of sodium and chloride, and the uptake of sulfate and chloride was not related to the uptake of the other ions. Under the study conditions, the optimum daily values for net consumption per plant from 40 days onwards can be established as 1,5-2,0 L of water, 25-28 mmoles of nitrate, 14-16 mmoles of potassium, 10-12 mmoles of calcium, 3,0-3,5 of phosphate, and around 3,0 mmoles of ammonium.

Introduction

Tomato plants show an increasing rate of water uptake and greater root development as the electrical conductivity (EC) of the nutrient solution falls within certain limits, although no great variations in the nutrient element concentrations in leaves is observed, thus demonstrating the tomato plant's capacity to take up ions at low concentrations (Cerdá and Roorda van Eysinga, 1981). Potential evapotranspiration-dependent EC variation increases the photosynthetic capacity, plant growth, and fruit yield of greenhouse tomato plants (Xu et al, 1995). Plant demand for nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, iron, and boron increases during the onset of reproductive development. In contrast, the net uptake of magnesium, sulfur, manganese, zinc, and copper remains more or less constant throughout the cultivation period (Sarro *et al.*, 1986). In general, the utilization quotients of the different elements in the tomato plant are greater during flowering than during the early stages of fruiting (Sánchez, 1982). The potassium/nitrogen uptake ratio varies from 1,24 when the plant has one cluster in flower to 2,57 when there are nine such clusters (Florian and Abad, 1993). The concentration of potassium in the tomato leaf changes with age, even when the concentration in the nutrient solution is kept constant, since this element is remobilized from leaves to growing organs (Humphries and Devonald, 1977). Calcium uptake, translocation, and metabolism in the tomato plant is affected by the levels of potassium and magnesium in the nutrient solution (Gárate *et al*, 1987).

The uptake of both water and potassium increases in response to irradiance level, both rates of uptake being highly correlated with irradiance level, and maximum uptake rates occur during the brightest part of the day (Gislerød and Adams, 1983). The presence of the ammonium ion in the nutrient solution leads to an increase in phosphorus uptake and a decrease in calcium and magnesium uptake (Macklon and Sin, 1980; Magalhaes and Wilcox, 1983; Peet *et al*, 1985; Caselles *et al*, 1988), although there is no agreement as to its effect on potassium uptake (Wilcox *et al*, 1977; Pill and Lambert, 1977). Other interactions which should be taken into account are those of nitrate/chloride (Luque *et al*, 1980) and sodium/calcium (Carpena *et al*, 1980). Micronutrient uptake may be strongly affected by the relative concentrations of calcium and potassium in the nutrient solution (Agüi *et al*, 1979).

This study aims to establish the demand, under the particular cultural conditions of southeast Spain, for each nutrient element during the cultivation period and the dependence of each nutrient element on the uptake of others. In this way, we hope to determine an adequate fertigation program in order to develop strategies for the more efficient use of water and fertilizers in the geographical area in which the study was conducted.

Materials and methods

Experimental Design

The experiments were conducted in a polyethylene 10x20 m² greenhouse situated in Mazarrón (Murcia, Spain), using information from a preliminary assay carried out in 1991-92 with tomato.

Inside the greenhouse, the temperature and relative humidity regimes were controlled through automatic heating, refrigeration, and ventilation. The relative humidity was maintained at 65-85%; the temperature interval was 20-35°C during the day and above 12°C during the night. In this area in autumn-winter, the lowest daily maximum irradiance level on cloudless days was about 300 W.m⁻². Nets were used to protect the plants from too much sunlight from April, although it is known that shade generally reduces fruit size (Cockshull *et al.*, 1992).

The irrigation and fertilization processes were done simultaneously using drip irrigation. The plants were positioned in 16 rows with ten plants per row; the two lateral rows on each side not being included in the study. Four clearly demarcated experimental plots represented the four replicates of the experiment. Four samples were taken from each plot and the nutrient parameters were analyzed. Each plot consisted of three rows, with 30 plants per plot. The cultivation system had a 2000-L tank for the nutrient solution with programmed stirring and electrovalves, filters, polyethylene tubes (25 mm Ø) for distributing the nutrient solution, 14 mm Ø tubing carrying the self-compensating nozzles (2 L·h⁻¹), and trays for substrate support with a drainage exit.

Cultivation

Tomato plants (cv. Rambo) were planted on 18-9-92, transplanted on 8-10-92, and the final harvest was conducted on 14-6-93, a duration of 249 days. The seeds were sown in 7x7x7 cm³ plugs of rockwool, the plants remained in the seed plot until the two to three true leaf stage; the plug was placed directly on the substrate through which the nutrient solution percolated discontinuously and without recirculation of the solution. Each tray for substrate support contained a bar of rockwool (100x20x10 cm³) wrapped in white plastic into which two plants of tomato were transplanted. These were vertically supported with plastic mesh (15x15 cm) with upper tensors (1,8 m). The fruit of this variety are firm, smooth, fleshy, and of uniform size and consistency.

Irrigation Water

The quality of the irrigation water was poor but typical of the area. The concentration of ions expressed as mmol·L⁻¹ are, chloride (from 5,4 to 8,4), sulfate (11,1 to 12,3), calcium (5,6 to 6,3), magnesium (3,6 to 5,1), and sodium (9,6 to 13,0); and high pH (7,7-7,8) due to the high bicarbonate concentration (3,2 to 4,5) and high EC (2,3-2,9 dS·m⁻¹ at 25°C).

Fertigation

Irrigation supply was regulated automatically by a demand irrigation tray, consisting of two height-adjustable electrodes located in the lower part of the tray, which began and stopped the irrigation according to transpired water uptake by the plants. This system made it possible to fix the most suitable drainage percentage uniformly. This was done according to drainage EC, plant development, quality of irrigation water, and climatic conditions. Equilibrated nutrient solution for the crop was adjusted according to the phenological stage of cultivation and the nutrient

and drainage solutions. Periodical analysis of the first leaf completely developed was carried out. The fertilizers supplied in the starting nutrient solution were an adaptation of the solution given by Cadahía (1988) to the agronomic conditions prevailing in the area: phosphoric acid (75%) 0,130 mL·L⁻¹, nitric acid (59%) 0,130 mL·L⁻¹, potassium nitrate 0,750 g·L⁻¹, calcium nitrate 0,300 g·L⁻¹, ammonium nitrate 0,040 g·L⁻¹, and 0,025 g·L⁻¹ of a micronutrient complex (7,5% iron, 3,30% manganese, 0,60% zinc, 0,27% copper, 0,65% boron, and 0,20% molybdenum).

Sampling

Nutrient and accumulated drainage solutions were sampled whenever a new nutrient solution was prepared, approximately every 15-30 days during the first 183 days, the same nutrient solution being used after this time until the end of the experiment. Two liters of nutrient and accumulated drainage solutions were taken per plot, the solutions from the three rows corresponding to each plot being mixed proportionally. The analyses were done within 48 hours after sampling during which time the crop continued to be fertigated with the previous nutrient solution. Six mineral elemental concentration analyses of the first completely developed leaf were conducted during the cultivation period.

Analytical Methods

The techniques described by Chapman and Pratt (1979) and the Spanish Ministry of Agriculture (M.A.P.A., 1994) were used to determine the following: pH; EC at 25°C; sulfate (turbidimetry); nitrate, and phosphate (VIS-UV spectrophotometry); ammonium (steam distillation followed by titration); chlorides, carbonates and bicarbonates (potentiometry); calcium and magnesium (atomic absorption spectrometry); and potassium and sodium (emission spectrometry). Leaves were analyzed after mineralization of the sample by dry ashing, while a wet sulfuric acid mineralization was made for nitrogen. The following were determined: total nitrogen (Kjeldahl method), phosphorus (VIS-UV spectrophotometry), calcium and magnesium (atomic absorption spectrometry); and potassium and sodium (emission spectrometry). Iron, manganese, zinc, copper, and boron levels were determined in the nutrient and drainage solutions although the results are not included. The values for each sample were obtained by averaging at least three replicate analyses.

Results and discussion

The final production of first quality fruits was 14 kg per plant which is high for the standards prevailing in the area. The quantity of water supplied by irrigation was 182,5 cm³ per plant. The mean number of daily waterings increased progressively during cultivation to 19 per day during the last phase of cultivation. The percentage of drained solution and the mean number of daily waterings as established by the demand irrigation tray are shown in table 17. From 54 days onwards, the drainage represented approximately 40% of the solution supplied. Excess irrigation was necessary to prevent toxicity by some ions (sodium and chloride principally) and

an excessively high substrate EC. When the plants were only a few days old, they only utilized a very small part of the water and mineral elements supplied.

Table 17. Mean number of daily waterings and drainage from transplanting onwards.

Time (days)	Daily watering	Drainage (%)
0-11	2,7	70,9
12-36	4,8	49,6
37-53	13,9	48,8
54-88	15,0	42,5
89-102	15,0	42,5
103-120	15,0	41,1
121-137	15,0	37,5
138-152	16,5	43,5
153-183	18,0	46,0
184-249	19,2	42,5

Chemical analyses of the nutrient solutions collected at the irrigation nozzles and from the accumulated drainage solutions during each period is shown in table 18. The prepared nutrient solutions were adjusted continuously according to the plants' absorption of each ion (ascertained from the supplied and drained solutions).

Table 18. Time course trend in the pH, EC (dS/m at 25°C), and ions (mmoles/L) values of the nutrient and drainage solutions throughout the growth cycle.

Nutrient solution												
T ¹	pH	C.E.	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Na ⁺	Ca ⁺²
0-11	5,91	3,47	0,69	5,68	9,90	12,31	1,67	0,50	7,19	3,59	9,84	7,48
12-36	5,71	3,83	0,64	5,66	10,68	15,27	1,58	1,02	7,61	3,80	10,04	8,58
37-53	5,05	3,94	0,56	5,43	10,88	15,91	1,76	1,52	6,20	4,17	9,55	9,06
54-88	5,98	4,05	1,08	5,66	11,25	14,39	1,60	1,00	6,28	4,44	10,75	9,01
89-102	6,13	4,19	1,30	5,41	12,03	17,51	1,60	1,84	7,37	4,53	13,09	9,25
103-120	6,06	3,92	1,14	4,87	11,82	13,18	1,23	1,16	6,39	4,36	11,13	7,37
121-137	6,10	3,64	0,90	4,89	11,11	13,39	1,58	0,88	8,22	4,12	11,96	6,66
138-152	6,19	3,80	1,34	8,46	10,70	14,23	0,97	0,92	5,83	5,49	12,03	8,54
153-183	6,08	3,94	1,24	8,56	11,11	13,98	1,34	0,98	8,28	5,59	13,38	7,08
184-249	6,48	3,88	1,60	6,52	11,60	11,69	1,10	0,82	5,22	4,06	11,68	9,32
Drainage solution												
0-11	7,30	4,70	2,14	7,65	13,35	11,90	0,93	0,00	6,57	4,84	13,27	10,08
12-36	7,04	4,76	1,96	8,98	17,43	12,37	0,76	0,10	5,73	6,11	16,42	12,16
37-53	6,65	5,59	1,54	9,58	23,73	10,80	0,89	0,10	3,82	8,70	20,96	14,90
54-88	5,96	4,90	1,00	7,83	16,38	13,65	1,67	0,60	5,81	6,40	15,56	11,64
89-102	5,91	5,27	0,74	8,71	18,52	15,79	1,96	0,36	7,48	7,15	16,96	12,75
103-120	6,05	4,86	0,66	7,86	16,04	14,65	1,20	0,06	7,53	6,41	14,79	11,01
121-137	5,95	5,11	1,00	8,04	17,96	15,99	1,47	0,10	9,45	7,07	17,20	11,44
138-152	5,83	4,41	0,64	11,70	14,68	17,74	1,40	0,04	5,83	8,09	16,48	10,40
153-183	5,62	4,59	0,46	12,00	16,98	15,56	1,25	0,00	8,57	8,16	17,89	10,26
184-249	6,28	4,61	1,26	8,19	16,15	13,70	1,16	0,00	5,76	5,05	15,73	11,90

¹ T shows days from transplanting onwards.

The nutrient solution in the root environment can be represented by the mean value between the added solution and the drainage solution [$1/2 \times (\text{nutrient solution} + \text{drainage solution})$] (figure 25). After each irrigation period, the plants absorb water and nutrient elements from the nutrient solution. As time elapses, the concentrations of the mineral nutrient elements in the root environment becomes similar to that of the drainage solution. This mean value was used for the periodic adjustment of the nutrient solution supplied, since it was considered a more accurate reflection of absorption of nutrients by the plants than the concentrations in the drainage solution or leaf tissue. The nutrient element levels in each new nutrient solution prepared were raised or diminished according to the mean values for nutrient and drainage solutions obtained.

In the mean nutrient and drainage solutions (figure 25), the EC remained between 4,1 and 4,8 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ throughout the cycle which is suitable for tomato cultivation. The nitrate levels were not high (12-16 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), while ammonium varied between 0,4 and 1,0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, any increase coinciding with the supply of ammonium nitrate, since ammonium is rapidly assimilated and hardly any is drained away. Potassium remained between 5 and 8,8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. It is known that the potassium/nitrogen ratio of the solution is important for high fruit quality. The phosphate levels remained quite stable (1,2-1,7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) throughout the cultivation cycle. The levels of calcium (9-12 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) and magnesium (4-7 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) varied according to their levels in the irrigation water. The pH, which was adjusted by nitric acid additions, remained constant at about 6,0 (except in the early and later stage of plant culture), this is important if the conditions for nutrient element uptake are to remain uniform throughout plant development. The bicarbonate changes were similar to those of pH, Sulfate (12-18 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), sodium (12-15 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), and chloride (6-10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) were supplied in quantities exceeding plant needs. The chloride concentration remained constant except for a sharp rise in the last section before it fell to previous levels.

From a knowledge of the quantity of supplied and drained (not absorb) solutions and their chemical analysis throughout the cultivation cycle, it is possible to calculate the net quantity of water and nutrient elements that the plants retain during development. Although there may be unquantified losses of water and nutrient elements (water and ammonia evaporation from the substrate, precipitation of some elements in the tubing and substrate, etc.) and part of the nutrient elements may be accumulated within the plant but serve no clear metabolic function. The results give a fairly good idea of the plants' demand for each of the nutrient elements throughout the cultivation cycle for this particular crop and in the agrclimatic conditions of the study area.

Figure 25. Time course trend of water and nutrients in the root environment. The bars indicate the standard deviation.

The daily levels of water and nutrient elements supplied and drained for each plant during cultivation are shown in table 19. Under these climatic and irrigation conditions, the supply of a nutritive ion was considered to be optimal when drainage accounted for about 40% of the amount supplied, this was drainage volume reached in order to avoid toxicity and high EC in the substrate and involves that a determined ion and water were taken up in the same proportion. Below 30% in the drainage solution would suggest difficulties in extracting this nutrient element from the solution, meaning higher concentrations should be supplied according to the plant's demand at any moment, while drainage above 50% would suggest that the plants are absorbing the nutrient element because the uptake is not totally selective in which case the

concentrations supplied exceed the optimum and should be reduced whenever possible. Such observations do not apply to plants only a few days old.

Table 19. Daily supply and drainage of water (L/plant) and nutrients, expressed in mmol per plant, from transplanting onward.

Daily supply per plant of water and nutrients										
T ¹	H ₂ O	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Na ⁺	Ca ⁺²
0-11	0,50	2,84	4,95	6,16	0,84	0,25	3,60	1,80	4,92	3,74
12-36	0,87	4,92	9,29	13,28	1,37	0,89	6,62	3,31	8,73	7,46
37-53	2,54	13,79	27,64	40,41	4,47	3,86	15,75	10,59	24,26	23,01
54-88	2,74	15,51	30,83	39,43	4,38	2,74	17,21	12,17	29,46	24,69
89-102	2,74	14,82	32,96	47,98	4,38	5,04	20,19	12,41	35,87	25,35
103-120	2,74	13,34	32,39	36,11	3,37	3,18	17,51	11,95	30,50	20,19
121-137	2,74	13,40	30,44	36,69	4,33	2,41	22,52	11,29	32,77	18,25
138-152	3,01	25,46	32,21	42,83	2,92	2,77	17,55	16,52	36,21	25,71
153-183	3,29	28,16	36,55	45,99	4,11	3,22	27,24	18,39	44,02	23,29
184-249	3,50	22,82	40,60	40,92	3,85	2,87	18,27	14,21	40,88	32,62
Daily drainage per plant of water and nutrients										
0-11	0,37	2,83	4,94	4,40	0,34	0,00	2,43	1,79	4,91	3,73
12-36	0,53	4,76	9,24	6,56	0,40	0,05	3,04	3,24	8,70	6,44
37-53	1,15	11,02	27,30	12,42	1,02	0,12	4,39	10,01	24,10	17,14
54-88	1,16	9,08	19,00	15,83	1,94	0,70	6,74	7,42	18,05	13,50
89-102	1,16	10,10	21,49	18,32	2,27	0,42	8,68	8,29	19,67	14,79
103-120	1,12	8,80	17,96	16,41	1,34	0,07	8,43	7,18	16,56	12,33
121-137	1,04	8,36	18,68	16,63	1,53	0,10	9,83	7,35	17,89	11,90
138-152	1,28	14,98	18,79	18,87	1,79	0,05	7,46	10,36	21,09	13,31
153-183	1,53	18,36	25,98	23,81	1,91	0,00	13,11	12,48	27,37	15,70
184-249	1,49	12,20	24,06	20,41	1,73	0,00	8,58	7,52	23,44	17,73

¹ T shows days from transplanting onwards.

The daily supply and drainage of water and nutrient elements from transplanting onwards are given in table 19. Nitrate maintained a suitable relationship between supply and drainage of 40-45% on average, although for the last two samples it was 52 and 50% and for the third 31%. Hardly any ammonium was drained away because this nutrient is rapidly absorbed by the root system but is not recommended in greater amount in this agronomic condition. Drained levels of potassium remained at 40-45%, except at 37-53 days (28% drained). The phosphorus levels were 40-50% drained except during the first 50 days (25%) and around 140 days (61% drained). The magnesium, sulfate, and to a lesser degree, calcium were also hardly absorbed during the first 50 days, although after this time, 55-70% of the supply was drained off in all three cases, indicating an excessive supply in the irrigation water used. The same happened with the chloride and sodium which were hardly absorbed during the first 50 days, after which time 50-30% and 45-40%, respectively, were absorbed due to the abundance of sodium chloride in the irrigation water used.

The differences between the nutrient element supply and drainage, the time course trend in the net daily uptake of nutrient elements, and water per plant are shown in figure 26. An estimate correct amount of each nutrient element can be calculated according to demand at every moment of the cultivation cycle in order to the absorbed-drained ratio.

Figure 26. Time course trend in the net daily uptake of nutrients and water per plant. The bars indicate the standard deviation.

From the record of the daily consumption by each plant (figure 26), water uptake per plant was 1,5 L at 40 days, rising to 2 L per plant. The curve corresponding to nitrate reached 25-28 mmoles per day per plant at 40 days, after which it stabilized with a slight tendency to fall. Ammonium levels were at around 3 mmoles per day per plant from 40 days. The curves for potassium and calcium showed concentrations of around 10-13 mmoles per day from 40-50

days. Phosphate levels were about 2,5-3,0 mmoles per day per plant from 40 days. The levels of magnesium, sulfate, chloride, and sodium showed uptake values much higher than the recommended because they were drained at a fairly high percentage (above 50%). The fact that such high levels of chloride, sodium, sulfate, and magnesium were absorbed means that the plants were unable to effectively discriminate at such high concentrations in the solution.

The leaf concentrations of different nutrient elements during the cultivation period as ascertained in the first completely developed leaf are shown in figure 27. In general, the concentrations of the different nutrient elements remained more or less stable throughout the growth period although they fell between the first and second samplings as the nutrient elements migrated towards the fruit. Nitrogen was the principal element (about 5%), followed by potassium (1,6-3%), and calcium (1,2-2%). Magnesium, phosphorus, and sodium concentrations were similar (0,2-0,7%).

Figure 27. Time course trend in the leaf concentrations of nutrients. The bars indicate the standard deviation.

The time course trend in accumulated uptake of water and nutrient elements per plant throughout the growth cycle are shown in figure 28. In all cases, from 20 days post transplant, the uptake fits positive quadratic curves. In other words, the nutrient elements are increasingly absorbed as the growth cycle advances, particularly those nutrient elements which show a

greater quadratic term (sodium, calcium, magnesium, sulfate, and chloride), precisely those which are present in the irrigation water in excessive quantities. It seems that the roots gradually lose their capacity to select which ions should be taken up as plant development advances or absorb a greater quantity of nutrient solution. The slopes of the curves corresponding to nutrient element uptake rate increases in the following order: nitrate, potassium, and calcium. The content of mineral nutrient elements in the analyzed leaves is similar.

Figure 28. Time course trend in the accumulative uptake of water and nutrients per plant throughout the growth cycle.

A stepwise multiple regression analysis (table 20) illustrates the net accumulation of water and particular ions. Statistical analysis was carried out by Systat 5.0 after introducing the accumulative water and ions absorption values and considering each ion as dependent variable of the rest.

Table 20. Multiple regression of the net accumulation of water and nutrients using the stepwise method.

Dep. V. → Ind. V. ↓	H ₂ O	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺
H ₂ O	—	—	—	4.4432 ¹ 0.7478 ² ***	—	—	—	—	—	—
NO ₃ ⁻	—	—	—	—	—	0.1153 1.1408 ***	-0.0285 -0.1333 +	-0.0518 -0.1637 n.s.	—	—
K ⁺	0.0726 0.4748 ***	—	—	—	0.2644 0.9989 ***	—	—	—	—	—
Ca ⁺²	0.0624 0.3709 ***	—	—	—	—	—	0.1832 0.3764 **	—	0.3736 0.3161 **	—
NH ₄ ⁺	—	—	3.7735 0.9989 ***	—	—	—	—	—	—	—
H ₂ PO ₄ ⁻	—	8.4527 0.8545 ***	—	—	—	—	—	—	—	—
Mg ⁺²	—	—	—	—	—	—	—	1.7152 1.1575 ***	—	2.7850 0.9992 ***
Cl ⁻	—	—	—	0.3502 0.2525 n.s.	—	—	—	—	—	—
SO ₄ ⁻²	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Na ⁺	0.0196 0.1577 *	0.2506 0.1491 *	—	—	—	-0.0248 -0.1457 n.s.	0.2710 0.7555 ***	—	0.5968 0.6850 ***	—
Cte. ³	0.8494	-31.935	-0.4412	-4.4029	0.6509	5.2587	2.0585	16.313	-9.8374	-10.864
r ²	1	0.998	0.997	0.995	0.997	0.998	0.999	0.996	0.999	0.998
ESE ⁴	2.073	63.528	39.433	50.962	10.438	7.420	9.842	30.281	28.164	41.630
P ⁵	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***

¹Straight line coefficient.

²Standard coefficient.

³Constant term of the straight line.

⁴Estimation standard error.

⁵Probability relating to the regression.

*** P<0,001; **P<0,01; *P<0,05; n.s.=not significant at level P=0,05.

The uptake of water is dependent on the uptake of potassium and calcium, and to a lesser extent, on that of sodium, the three principal cations absorbed by the plant. Nitrate uptake is basically related to that of phosphate, while potassium is related with ammonium and vice versa, in both cases with a very high level of significance and a high standard coefficient.

Calcium uptake is basically related to the amount of water absorbed. The uptake of phosphate depends on that of nitrate with a very high level of significance (standard coefficient above one). Magnesium uptake is related to those of sodium and calcium (in that order) and negatively with nitrate, although with a smaller degree of significance. The uptake of chloride is related to that of magnesium at a very high level of significance (standard coefficient above one), while the uptake of sulfate depends on that of sodium, and to lesser degree, calcium. Sodium is highly correlated with magnesium.

As regards the independent variables of the multiple regression, it can be seen that water absorption is related to calcium uptake. The close relationship between calcium uptake and transpiration and the hydric regime to which plants are submitted is well known, since calcium is hardly retransported via the phloem and its uptake and transport via the xylem is largely dependent on the transpiration of the various aerial organs. The uptake of nitrate is basically related to phosphate uptake. Potassium uptake is related to water and ammonium, while calcium uptake is related to the water, magnesium, and sulfate uptake. Ammonium uptake is related to that of potassium, the uptake of phosphate to nitrate and the uptake of magnesium to that of chloride and sodium. Chloride and sulfate uptake are not related to the conditions of this experiment to the uptake of the other nutrient elements studied, while sodium is related to the greatest number of nutrient elements, magnesium, sulfate, and to a lesser extent, water, nitrate, and phosphate.

Conclusions

Under the climatic and with the irrigation water conditions prevailing, and according to the drainage percentages obtained, the optimum daily values of net consumption per plant from 40 days onwards has been established as 1,5-2,0 L of water, 25-28 mmoles of nitrate, 14-16 mmoles of potassium, 10-12 mmoles of calcium, 3,0-3,5 of phosphate, and around 3,0 mmoles of ammonium. The levels of magnesium, sulfate, chloride, and sodium exceeded the considered optimum. The accumulative uptake of water and nutrient elements by plants over the cultivation period (20 days post transplant onwards) fits positive quadratic curves with a growing accumulation of nutrient elements. The plant absorption demand rate increased constantly as the plants developed, particularly for those nutrient elements present in the irrigation water in excessive quantities and which present greater quadratic terms (sodium, calcium, magnesium, sulfate, and chloride). The slopes of the curves corresponding to nitrate, potassium, and calcium (in this order) are the three highest, and is the same order observed for the concentration in leaves.

Water uptake principally depends on the uptake of potassium and calcium, the uptake of the latter element being, in turn, closely related with transpiration and the hydric regime. The principal macronutrients show close relationships between pairs: Potassium with ammonium and phosphate with nitrate, with a high level of significance in all cases. Magnesium uptake also shows a high level of significance in its relation to the uptake of sodium and chloride which were supplied in excess in the irrigation water. On the other hand, the uptake of sulfate and chloride had little dependence on the uptake of the other ions.

3.1.2.2. NUTRICIÓN HÍDRICA Y MINERAL EN EL CULTIVO DE PEPINO (cv. ALASKA) SOBRE LANA DE ROCA. INTERRELACIÓN IÓNICA

AUTORES: EGEE, C.; MADRID, R.; ALARCÓN, A. L. & SÁNCHEZ, F. J.

TÍTULO: *Nutrición hídrica y mineral en el cultivo de pepino (cv. Alaska) sobre lana de roca. Interrelación iónica.*

CLAVE: A FECHA: 1997

REF. REVISTA: *Información Técnica y Económica Agraria (ITEA)*, Vol. 93V Nº2: 104-115.

Resumen

Se estudia la nutrición hídrica y mineral en cultivo de pepino (var. Alaska) desarrollado en invernadero, sobre lana de roca, mediante seguimiento de la absorción neta diaria de agua y nutrientes por la planta a partir de los cambios que se originan en las disoluciones nutritiva y de drenaje, para establecer la demanda de la planta en cada nutriente y la relación entre la captación de cada ion respecto a los restantes bajo las condiciones agroclimáticas del experimento. La absorción acumulada de agua y nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo, a partir de los 18 días del trasplante, se ajusta bien a curvas cuadráticas, creciendo constantemente la velocidad de absorción con el desarrollo de la planta (término cuadrático positivo). Las pendientes de las curvas responden a un mayor incremento de la absorción según el siguiente orden: Nitratos > potasio > calcio. Los resultados demuestran que el agua absorbida influye con elevado coeficiente estándar sobre la absorción de los sulfatos, fosfatos y sodio. La absorción de nitratos influye sobre la de calcio, magnesio y cloruros, mientras que la de potasio está relacionada con la absorción de amonio y la de calcio influye sobre la absorción de nitratos.

Introducción

El pepino holandés (*Cucumis sativus* L.) parece imponerse en el sureste español como cultivo en el ciclo otoño-invierno. En este período, el cultivo del pepino holandés se desarrolla en condiciones climáticas subóptimas en invernaderos de polietileno sin calefacción (Castilla *et al.*, 1990), debido principalmente a las bajas temperaturas nocturnas (menos de 10°C) existentes en el interior de los invernaderos no calefactados. Se deben mantener las temperaturas extremas en el invernadero entre 10 y 27°C y no sobrepasar el 70 % de humedad relativa (Castilla y Bretones, 1983).

Rendimientos de 7-10 kg/m² se consideran valores medios para cultivos en suelo con ausencia de calefacción (Naredo y López-Gálvez, 1992). Peñalosa y Sarro (1993) obtuvieron frutos de más peso y mejor absorción potásica, suministrando nitrógeno amónico en las primeras 3-6 semanas, aportando después todo el nitrógeno como nitrato; otros investigadores han estudiado la conveniencia de aplicar parte del nitrógeno en forma amónica (Alan, 1989; Du *et al.*, 1989). Un exceso de nitrógeno no aumenta la cosecha, 38 kg/m² de nitrógeno mineral bastan para cubrir las necesidades del cultivo (Castilla *et al.*, 1990; Cantliffe, 1977).

La planta puede absorber suficiente cantidad de nutrientes de soluciones con bajas concentraciones de los mismos, siempre que la solución fluya y se eviten vacíos locales de determinados elementos en el entorno radical. El pepino requiere gran cantidad de agua, aunque pequeños déficits no influyen en la producción, e inducen una mayor precocidad de las cosechas (Castilla *et al.*, 1990). El pepino es un cultivo muy sensible a las sales, sobre todo a los cloruros (Martínez y Cerdá, 1987). Los requerimientos nutricionales pueden calcularse a partir del análisis de la planta (hojas) y las disoluciones nutritivas y drenaje, quedando influenciados por el sustrato y las condiciones ambientales (Adams *et al.*, 1989; Baker y Sonneveld, 1988).

El presente trabajo pretende establecer la demanda real de cada nutriente a lo largo del ciclo de cultivo, así como la relación de dependencia de la absorción de cada nutriente con los demás y contribuir a la optimización de la nutrición hídrica y mineral del cultivo de pepino (cv. Alaska) sobre lana de roca, elevando la producción y la calidad de las cosechas bajo condiciones controladas de temperatura y humedad.

Material y métodos

El ensayo se llevó a cabo en un invernadero del paraje de La Mojonera en Almería, cultivado con pepino holandés de la variedad Alaska. La planta es vigorosa y con pocos brotes laterales.

Los regímenes de temperatura y humedad relativa se controlan mediante calefacción, refrigeración y ventilación automatizadas. La humedad relativa se mantuvo en 60-80% y el intervalo de temperatura fue 15-28°C durante el día y por encima de 13°C durante la noche.

Dentro del invernadero se delimitó una parcela experimental de 200 m² de superficie, estableciendo 16 hileras con ocho plantas en cada una, distribuidas en cuatro bloques con límites perfectamente reconocibles, se consideran tres líneas con 24 plantas por bloque, no considerando en el estudio las dos líneas extremas de ambos lados de la parcela experimental.

Se sembró el 20-08-1992, se trasplantó el 10-09-1992 y la plantación se levantó el 15-01-1993, con 127 días de desarrollo del cultivo. La siembra se realiza en tacos de lana de roca, las plantas permanecen en el semillero hasta tener 2-3 hojas verdaderas; los tacos se colocan directamente sobre el sustrato de lana de roca que es atravesado por la solución nutritiva mediante percolación de forma discontinua y sin recirculación de la misma, siendo aportada por piquetas de goteo (2 L/h), una por planta. El marco de plantación fue de 1,5 plantas/m².

El agua de riego es de buena calidad, con contenidos en cloruros (175,5 mg/L) y sodio (119,6 mg/L) algo elevados, bajos contenidos en sulfatos (68,2 mg/L), calcio (58,1 mg/L), magnesio (32,8 mg/L) y potasio (5,1 mg/L), pH alto (8,20), debido a la presencia del ion bicarbonato (244,0 mg/L), y baja conductividad eléctrica (CE, 0,90 dS/m a 25°C). La frecuencia de riego se establece mediante una bandeja de riego por demanda, consistente en dos electrodos fijados a altura conveniente del suelo de la misma. La altura de los electrodos se regula según el porcentaje y CE del drenaje, desarrollo del cultivo y condiciones climáticas, a fin de obtener el porcentaje de drenaje óptimo. De este modo, se aporta la cantidad de solución nutriente que las plantas demandan en cada momento, de acuerdo con su transpiración. Se colocan dos

tablas de lana de roca y dos plantas por tabla en la bandeja, que actúa de control para el resto de la parcela.

Los ciclos de fertirrigación son de 3-4 riegos diarios hasta el asentamiento de las plantas (20 días), momento en que comienza a funcionar la bandeja que fija la frecuencia y dosis de riego. Se controla el equilibrio nutricional y CE en el sustrato, mediante análisis de las soluciones nutritiva y de drenaje, lo que, junto a la sintomatología de la plantación y los análisis foliares periódicos, permite adecuar y controlar la nutrición mineral de la planta.

Las determinaciones analíticas llevadas a cabo, según los métodos descritos por Chapman y Pratt (1979) y el M.A.P.A. (1994), han sido las siguientes: pH y CE; cloruros (valoración potenciométrica); sulfatos (mediante precipitación de los sulfatos con bario y posterior medida de la turbidez espectrofotométricamente, Abrisqueta, 1962); nitratos, fosfatos y boro (medida espectrofotométrica VIS-UV); amonio (destilación del NH_3 en medio ligeramente básico y valoración posterior); carbonatos y bicarbonatos (medida potenciométrica); calcio, magnesio, hierro, manganeso, cinc y cobre (espectroscopía de absorción atómica) y potasio y sodio (espectroscopía de emisión). Para los análisis foliares se efectúa previamente una digestión vía húmeda con mezcla nítrico-perclórica (Ulrich y Hills, 1967). El nitrógeno total de las hojas se determina por el método Kjeldahl semimicro.

Resultados y discusión

La producción fue de $14,0 \text{ kg/m}^2$ de frutos de primera calidad, es decir, con las características siguientes: Color verde oscuro, con algo de brillo, recto, de 20 a 30 cm, con cuello corto, algo estriado, con pocas o ninguna espina y peso entre 400 y 500 gramos. La producción total fue de $15,3 \text{ kg/m}^2$, con un peso medio por fruto de 470 g entre la producción de primera calidad. Estos valores son excelentes comparados con los niveles normales de cultivos en suelo bajo invernaderos no climatizados, lo que da idea del incremento en producción y calidad que genera el cultivo sin suelo (sobre lana de roca en este caso), unido a la calefacción del invernadero.

La aportación media por riego fue de $350 \text{ cm}^3/\text{m}^2$. El número medio de riegos diarios fue aumentando progresivamente con la evolución del cultivo hasta alcanzar de 9-10 riegos por día en la última fase de la plantación. el porcentaje de drenaje y el número medio de riegos diarios, establecidos por la bandeja de riego, se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Número medio de riegos diarios y porcentaje de drenaje, desde el momento del trasplante.

Días desde el trasplante	0-20	21-35	36-51	52-65	66-81	82-127
Media de riegos diarios	3,5	7	11	10,5	9,5	9,5
% Drenaje	85	65	42,5	37,5	32,5	35

En general, el drenaje se encuentra entre el 35% y el 40% de la solución nutritiva aportada, este exceso de riego se hace necesario para compensar la heterogeneidad que representa la

distribución del riego y las condiciones microclimáticas que determinan diferencias en la absorción de nutrientes por las plantas, y para lavar el exceso de iones fitotóxicos (Na^+ y Cl^- principalmente) que se acumulan progresivamente en el sustrato.

Los análisis frecuentes de la solución de drenaje se hacen imprescindibles, sobre todo cuando se tiene escasez de agua o esta es de mala calidad. Con un exceso de riego con agua de buena calidad se podría mantener el equilibrio deseable en el sustrato evitando la acumulación de los elementos menos absorbidos, con la garantía de una buena nutrición hídrica y mineral, bastaría con hacer análisis periódicos de control. Pero hoy día, en el levante español, el agua es escasa, cara y de baja calidad, siendo necesario un frecuente ajuste del suministro de agua y nutrientes, con el fin de minimizar sus pérdidas.

La solución nutritiva real (figura 29) se puede representar por la media entre lo aportado y lo drenado $((\text{SN}+\text{SD})/2)$. Durante el riego y al finalizar este, la planta absorbe agua y nutrientes de la solución nutritiva; con el tiempo, la concentración de la solución nutritiva se aproxima a la de drenaje y antes del siguiente riego, la planta absorbe una solución de composición parecida a la solución drenaje final. Esta media se ha utilizado para el ajuste periódico de la solución nutritiva aportada, ya que se comprueba que constituye un modelo más eficaz que el seguimiento de los valores absolutos de los drenajes o de los niveles foliares.

Figura 29. Evolución de los valores medios reales de C.E. y nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo.

Los nitratos siguen una trayectoria similar a la de la CE, con un nivel algo bajo en torno a los 50 días desde el trasplante. El potasio sigue la curva de la CE bastante bien hasta los 70-75 días, para luego tener una trayectoria prácticamente inversa. El calcio, y el magnesio en menor medida, siguen la curva de la CE. El fósforo, por las características de su absorción sigue una

curva bastante peculiar, con un máximo a los 70-80 días. Los cloruros y el sodio presentan curvas prácticamente idénticas, en forma y niveles de concentración, debido a la presencia de cloruro sódico en el agua de riego, la no adición en el programa de riego fertilizante y la escasa absorción de estos elementos por parte de la planta. Los sulfatos, al ser escasos en el agua de riego, mantienen un nivel bajo y constante en la solución nutritiva real. Los bicarbonatos siguen, debido a los reequilibrios del CO₂ disuelto, la curva descrita por el pH, y que prácticamente es opuesta a la de la CE, mientras que el amonio mantiene niveles más o menos constantes en torno a 0,5 mmoles/L.

Conociendo los resultados analíticos de las soluciones nutritiva y de drenaje durante el ciclo completo del cultivo, la aportación media por riego, el número medio de riegos diarios y el porcentaje de volumen drenado, se puede calcular la cantidad de agua y nutrientes aportados y drenados por la plantación a lo largo del ciclo de cultivo. En la tabla 22 se presentan los niveles de agua y nutrientes aportados y drenados diariamente, para cada planta a lo largo del ciclo de cultivo (127 días). Los bicarbonatos no son considerados, ya que su concentración varía según el pH de la solución, debido a sucesivos reequilibrios del CO₂ disuelto. El estudio estadístico se realiza solamente para el drenaje, ya que la solución nutritiva aportada es la misma para las cuatro repeticiones.

Tabla 22. Aportaciones y drenajes medios diarios de agua (L/planta y día), macronutrientes (mmoles/planta y día) y micronutrientes (μmoles/planta y día)

Agua y nutrientes aportados por planta y día															
Días	H ₂ O	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Fe	Mn	Zn	Cu	B
18	1,18	6,63	0,96	15,02	1,05	2,14	6,84	4,60	1,91	6,89	34,7	12,6	1,8	3,7	16,4
34	2,01	13,27	1,45	25,73	1,45	2,59	10,83	7,10	2,87	10,69	40,2	29,1	7,6	4,8	45,8
56	2,47	11,66	2,10	38,36	2,27	2,91	16,60	10,00	3,04	10,52	46,9	44,0	6,7	4,2	45,7
68	2,31	10,28	1,80	27,00	2,13	3,88	13,70	8,11	2,96	9,31	57,3	39,5	6,5	3,2	44,4
73	2,23	10,10	1,76	24,49	2,05	4,19	16,28	5,66	2,85	10,30	75,2	34,6	4,9	3,1	40,1
82	2,22	9,55	1,64	33,30	2,58	3,26	14,81	9,24	3,11	9,48	42,6	22,9	4,4	3,8	28,6
102	2,22	9,35	1,33	33,79	1,07	3,86	14,32	8,10	3,20	9,32	67,0	24,6	4,7	2,4	46,0

Agua y nutrientes drenados por planta y día															
Días	H ₂ O	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	Fe	Mn	Zn	Cu	B
18	0,90*	6,57ns	0,94ns	11,55*	0,00***	0,94*	3,45*	3,65*	1,78*	6,87ns	33,5ns	3,0*	0,8ns	2,2ns	10,8**
34	1,13ns	8,52*	0,58*	3,33ns	0,11*	1,02*	1,23ns	1,80ns	1,23ns	10,53ns	31,0*	2,5ns	1,1ns	0,0***	10,4*
56	0,95**	8,03*	0,53***	16,51ns	0,19ns	0,91*	5,70ns	4,59ns	1,81**	7,28*	28,5ns	13,7ns	2,4ns	1,6ns	21,9ns
68	0,79*	5,63*	0,56**	7,03**	0,00***	0,96*	3,78**	2,99**	1,49*	5,50**	19,0ns	2,4ns	1,7*	0,7ns	38,6ns
73	0,73**	5,61**	0,47*	8,83**	0,07ns	0,90**	3,74***	2,66*	1,36*	5,20*	43,7ns	6,1ns	1,1ns	1,3*	20,5ns
82	0,75**	7,33ns	0,32ns	9,21**	0,12*	0,42ns	3,26*	2,78*	1,48**	6,86*	31,3*	4,6*	0,7ns	1,0ns	0,9ns
102	0,78**	5,51**	0,45*	11,34*	0,00***	0,83*	5,02*	3,29ns	1,58*	5,37**	38,2ns	7,3ns	1,2*	0,9ns	5,3ns

*** P<0,001,** P<0,01,* P<0,05; ns no significativo al nivel de probabilidad P=0,05.

Para la estimación de estos datos es preciso fijar un valor que determine si un nutriente se aporta en exceso o defecto. La absorción radicular es, hasta cierto punto capaz de distinguir, en mayor o menor medida, el tipo de ion que la planta necesita absorber; la absorción de un determinado nutriente está en relación directa a la cantidad disponible, si en el equilibrio nutritivo está por debajo de su valor idóneo, pueden inducirse deficiencias, y si está en exceso

se pueden producir toxicidades. Tanto en un caso como en otro, la descompensación en el aporte de un determinado nutriente puede facilitar o dificultar la absorción de otros, con los problemas nutritivos que de ello se derivan.

Parece adecuado establecer como correcta la aportación de un ion nutritivo, cuando drena en tomo al 40% de lo suministrado (mismo porcentaje de drenaje que se mantiene a lo largo del ciclo de cultivo); una cantidad drenada por debajo del 30% supondría dificultades a la hora de extraer el nutriente de la solución y habría que aportarlo en mayor cantidad, con arreglo a la demanda actual de la planta; un porcentaje drenado superior al 50-60% indica que la planta está tomando el nutriente por ser la absorción radical no totalmente selectiva, y debería reducirse su nivel, siempre que sea posible. Este razonamiento carece de validez cuando el cultivo tiene pocos días, ya que las plantas apenas si pueden retener una mínima parte de lo que se les aporta, por esto es aconsejable al inicio de la plantación utilizar sólo los aportes fertilizantes necesarios para alcanzar un equilibrio aceptable con las sales que contiene el agua de riego, para aumentar después gradualmente el suministro de fertilizantes a medida que las plantas se van desarrollando.

Los niveles de cloruros y sodio, están en todo momento por encima de la demanda de la planta; los cloruros drenados representan el 55-70% de lo aportado y el sodio el 50-70%. Los sulfatos, el fósforo y el potasio, durante la mayor parte del ciclo de cultivo, permanecen por debajo de la capacidad de absorción de las plantas. Tal vez sería recomendable un aporte de sulfato potásico y algo más de ácido fosfórico. Los sulfatos drenados representan el 20-35%, el fósforo el 20-30 y el potasio el 20-35% de las respectivas cantidades suministradas por la solución nutritiva. El calcio y el magnesio permanecen en niveles óptimos de nutrición, drenándose en tomo al 35-40% y al 50% de lo aportado, respectivamente. El aporte nitrogenado está por debajo de la capacidad de absorción, sobre todo, tras 30-35 días desde el trasplante, el resto del ciclo se mantiene alrededor del 25-40%. Manganeso, cinc y cobre están en todo momento por debajo de la demanda. El boro aparece en exceso a los 68 días, mientras que en el tramo final del cultivo está muy por debajo de la demanda de la planta.

En la figura 30 se ha representado la evolución de la absorción de agua y nutrientes por la planta, diferencia entre lo aportado y lo drenado, pudiendo proponerse las cantidades adecuadas de cada nutriente para la correcta nutrición de la planta, según su demanda en cada momento del ciclo de cultivo. Si bien es cierto que parte del agua y los nutrientes no son utilizados por la planta (evaporación, retenciones en el sustrato, precipitaciones en las conducciones y en el sustrato, consumo por parte de los microorganismos, etc.) o incluso dentro de la misma planta pueden acumularse sin cumplir ninguna función metabólica específica. En cualquier caso, los resultados dan una idea bastante adecuada de la demanda por parte de la planta para cada elemento nutritivo, en cada momento de desarrollo de la plantación.

Según los consumos diarios de la planta, la alimentación hídrica sigue una curva exponencial creciente hasta alcanzar un máximo a los 60 días, para después estabilizarse en torno a 1,5 L/planta. Los nitratos siguen la trayectoria descrita para el consumo de agua, dado que la demanda de absorción era algo superior a su aporte, con un ligero descenso a los 80 días, cantidades en torno a 25 mmoles diarios por planta a partir de los 40 días después del trasplante, parecen adecuados. Consecuencias análogas podrían extraerse para potasio y calcio,

cifrando su consumo correcto entre 12-15 y 5-7 mmoles diarios por planta, respectivamente, tras los 30-40 días. El aporte de fósforo fue inferior a lo demandado, de ahí que lo adecuado resultaría entre 3-4 mmoles diarios a los 30-40 días, para estabilizarse posteriormente en 3. El magnesio mantiene unos niveles adecuados, entre 1,4-1,6 mmoles/planta y día. El amonio es rápidamente absorbido e incorporado al metabolismo vegetal, sin embargo, su mayor aporte está contraindicado por su efecto fitotóxico y el desequilibrio que generaría en el seno de la solución nutritiva al interaccionar con otros iones y modificar el pH; sigue una trayectoria peculiar que coincide con los niveles de nitrato amónico suministrados en cada momento, alrededor de 2 mmoles diarios por planta a partir de los 40 días desde el trasplante, parecen adecuados. Cloruros y sodio son aportados por el agua de riego y deberían seguir la trayectoria de la alimentación hídrica de no producirse un consumo excesivo. Los sulfatos, en cambio, sí siguen la trayectoria del consumo de agua, pero a una escala inferior a la deseable, un consumo de sulfatos en torno a 2-3 mmoles por planta y día a partir de los 50 días hubiera resultado aceptable.

Figura 30. Evolución de la absorción por la planta de agua y nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo.

En la figura 31 se representan las absorciones acumuladas de agua y nutrientes por la planta a lo largo del ciclo de cultivo. Estos consumos se ajustan muy bien a curvas cuadráticas positivas a partir de los 18 días desde el trasplante. El ajuste es mejor para aquellos iones que presentan un término cuadrático mayor (fosfatos, magnesio, potasio, nitratos, calcio). La mayor o menor velocidad de absorción de nutrientes por las plantas viene dada por la pendiente de la curva, que decrece según el orden: nitratos, potasio, calcio, que son los iones mayoritarios en la composición mineral de plantas de pepino en ese mismo orden.

Figura 31. Evolución de la absorción acumulada de agua y nutrientes por la planta a lo largo del ciclo de cultivo.

El análisis de regresión múltiple por el método de pasos (tabla 23), muestra cómo influye la absorción de un ion determinado sobre la de los demás y cuáles influyen determinantemente en la absorción de cada uno.

Tabla 23. Regresión múltiple de las absorciones acumuladas de agua y nutrientes, según el método por pasos.

*** P<0,001; ** P<0,01; * P<0,05; n.s. no significativo al nivel P = 0,05.										
Dep. V. →	H ₂ O	NO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ⁺²	NH ₄ ⁺	H ₂ PO ₄ ⁻	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Na ⁺
Ind. V. ↓										
H ₂ O	X	-	-	-	-	1,9188 ¹ 0,9973 ² ***	-	-	0,8532 0,9968 ***	4,8021 2,2201
NO ₃ ⁻	-	X	-	0,2400 0,9997 ***	-	-	0,0574 0,8059 ***	0,1739 0,9940 ***	-	-
K ⁺	-	-	X	-	0,1775 0,9973 ***	-	-	-	-	-
Ca ⁺²	-	4,1642 0,9997 ***	-	X	-	-	-	-	-	-
NH ₄ ⁺	-0,1134 -0,1609 **	-	2,4139 0,4296 **	-	X	-	-	-	-1,1043	-0,7244 **
H ₂ PO ₄ ⁻	0,3013 0,5797 ***	-	-	-	-	X	0,1949 **	0,1137	-	-
Mg ⁺²	-	-	4,0626 0,5720 ***	-	-	-	X	-	-	-
Cl ⁻	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-0,4099 -0,5223 *
SO ₄ ⁻²	0,6812 0,5831 ***	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ⁺	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Cte. ³	0,3963	-8,9522	-6,8415	2,3036	5,9083	6,7507	0,6081	8,3597	-1,1242	2,2477
r ²	1,000	0,999	0,999	0,999	0,995	0,995	0,999	0,988	0,994	0,994
ESE ⁴	0,9413	21,4322	10,4322	5,1451	5,5412	7,5538	1,7205	16,0954	3,6625	10,9414

1. Coeficiente de la ecuación. 2. Coeficiente estándar. 3. Término constante de la recta.
4. Error estándar de la estimación.

La absorción de agua depende de la absorción de sulfatos, fosfatos y amonio en este orden; el amonio presenta un coeficiente estándar negativo lo que significa un antagonismo con la alimentación hídrica. La absorción de nitratos depende de la de calcio y a su vez la de calcio está relacionada con la de nitratos con un coeficiente estándar muy alto (cercano a la unidad). La alimentación en potasio es dependiente de la absorción de magnesio y amonio en menor medida. La absorción de amonio está influida solamente por la de potasio con un coeficiente estándar muy alto. La absorción de fosfatos se ve influenciada por la alimentación hídrica

exclusivamente. El magnesio se relaciona con nitratos y fosfatos. La absorción de cloruros está muy influida por la de nitratos y la de sulfatos por la alimentación hídrica. La absorción de sodio está muy influida por la alimentación hídrica con un coeficiente estándar muy superior a la unidad (2,2201); también se relaciona con la absorción de cloruros y amonio, que presentan un coeficiente estándar negativo, por lo que podemos indicar que se comportan como elementos antagónicos.

Si atendemos a las variables independientes observamos que la absorción de agua influye sobre la absorción de fosfatos, sulfatos y sodio con coeficientes estándar muy altos en los tres casos. La absorción de nitratos influye sobre la de calcio, magnesio y cloruros y la de potasio sobre la de amonio con un coeficiente estándar cercano a uno.

La absorción de calcio sólo influye sobre la de nitratos. La absorción de ion amonio influye negativamente en la alimentación hídrica y la absorción de sodio y positivamente en la absorción del ion potasio. La absorción de ion fosfato influye sobre la absorción de agua y, con coeficiente estándar bajo, sobre magnesio. La absorción de magnesio presenta influencia sobre la absorción de potasio. Los cloruros influyen en la absorción de sodio pero con coeficiente estándar negativo, lo que nos podría llevar a pensar que se comportan antagónicamente dentro de la disolución nutritiva. Los sulfatos actúan sobre la absorción de agua y el sodio no influye para nada en la absorción de ninguno de los otros iones.

Conclusiones

Bajo las condiciones de temperatura y humedad relativa del ensayo descritas, y el agua de riego utilizada (0,90 dS/m) para un cultivo de pepino holandés sobre sustrato inerte (lana de roca) en el período de cultivo establecido, los valores óptimos propuestos a partir de los 40 días de desarrollo de las plantas son: 1,5 litros de agua y 23-27 mmoles de nitratos por planta y día, 12-15 mmoles de potasio por planta y día, 5-7 mmoles de calcio por planta y día, 3-4 mmoles de fosfatos por planta y día, 2,0-2,2 mmoles de amonio por planta y día, 1,4-1,6 mmoles de magnesio por planta y día y 2-3 mmoles de sulfatos por planta y día.

En el ensayo se encuentran las siguientes dependencias y correlaciones con altos niveles de significación (coeficientes estándar altos), en la absorción hídrica y mineral: influyentes positivamente serían el agua sobre sulfatos, fosfatos y sodio, el calcio sobre nitratos, el potasio sobre amonio, los nitratos sobre calcio, magnesio y cloruros, los fosfatos y los sulfatos sobre el agua y el magnesio sobre potasio; con coeficiente negativo serían el amonio y los cloruros sobre sodio.

3.1.2.3. CONSUMOS DE AGUA Y NUTRIENTES DE DOS CULTIVOS DE MELÓN GALIA SOBRE LANA DE ROCA CON DIFERENTE CALIDAD DE AGUA DE RIEGO

AUTORES: ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & VARÓ, P.

TÍTULO: *Consumos de agua y nutrientes de dos cultivos de melón Galia sobre lana de roca con diferente calidad de agua de riego.*

CLAVE: A, CL FECHA: 1997

REF. REVISTA/LIBRO: *Actas de Horticultura 19: 293-300. ISBN: 84-87440-24-X. Edita: Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH)*

Resumen

Se estudian los consumos netos de agua y nutrientes (nitratos, amonio, fosfatos, potasio, calcio, magnesio, sulfatos, cloruros y sodio) de dos cultivos de melón tipo Galia cv. Revigal, en invernadero comercial sobre lana de roca e idénticas prácticas culturales en dos diferentes zonas de cultivo del Levante español, La Mojonera (Almería) y Mazarrón (Murcia); con temperaturas nocturnas más suaves durante los primeros 60 días de cultivo y menor salinidad del agua de riego en la primera zona.

El ajuste a curvas cuadráticas de estos consumos, ofrecen unos coeficientes de regresión muy próximos a la unidad, resultando en todos los casos positivo el término cuadrático, lo que indica un crecimiento progresivo de los ratios de consumo de agua y nutrientes conforme avanza el ciclo de cultivo. La pendiente es positiva en todos los casos en el ensayo de La Mojonera y negativa (excepto para el amonio) en el ensayo de Mazarrón con agua de peor calidad.

En el ensayo de Mazarrón los iones aportados en apreciable cantidad por el agua de riego (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{-2}) presentan consumos mucho más elevados, pese a que los porcentajes drenados de estos iones en el ensayo de La Mojonera, siempre son superiores al drenaje de agua, lo que denota que su aporte es suficiente al estar en condiciones de elevada transpiración y alto consumo hídrico. Los consumos de estos iones ofrecidos en el ensayo de La Mojonera son pues, suficientes para satisfacer las necesidades fisiológicas de la plantación, esto es especialmente interesante en el caso de los macronutrientes secundarios, ascendiendo los consumos de Ca^{+2} , Mg^{+2} y SO_4^{-2} a 544,8; 191,5 y 114,2 mmoles/planta respectivamente.

Los nutrientes aportados fundamentalmente mediante fertilizantes muestran unos consumos más parejos que pueden servir como orientación de las necesidades nutritivas de este cultivo, NO_3^- (2000 mmoles/planta), H_2PO_4^- (240 mmoles/planta), K^+ (1150 mmoles/planta) y NH_4^+ (90 mmoles/planta).

Introducción

Se han realizado gran número de estudios sobre la tolerancia de cultivares de melón a la salinidad, encontrándose que varían de sensibles a moderadamente tolerantes (Nerson y Paris, 1984; Mendlinger y Pasternak, 1992). Otros autores han estudiado la mejora que supone la fertirrigación en la eficiencia del agua de riego y los fertilizantes en el cultivo de melón (Bhella,

1985; Bogle y Hartz, 1986; Rincón *et al.*, 1996). Los melones tipo Galia han sido descritos por varios autores como moderadamente tolerantes a la salinidad (Shmueli y Goldberg, 1971; Nukaya *et al.*, 1980; Meiri *et al.*, 1982) y propuestos como cultivos potenciales en áreas con importantes problemas de salinización, como el sureste español. El melón Galia cv. Revigal es moderadamente tolerante a la salinidad y puede crecer, en principio, bajo salinidades superiores a 500 mSm^{-1} (Franco *et al.*, 1993).

Rincón *et al.*, proponen las siguientes extracciones totales de macroelementos para un cultivo de melón con un rendimiento de 50-55 Tm/ha, expresando las cantidades en kg/ha: N 205, P_2O_5 80, K_2O 500, Ca 165 y Mg 85. En condiciones de aguas de riego salino conviene tener muy en cuenta las interacciones entre los distintos iones absorbidos por la planta, así el ion amonio parece inducir mayor acumulación de cloruros en las plantas (Kafkafi, 1984), mientras que el aumento de cloruros en la solución nutritiva conduce a una disminución de la concentración de nitratos en los tejidos vegetales (Feigin *et al.*, 1984). Posiblemente aportes de potasio más reducidos (115 kg/ha) de los recomendados (140 kg/ha) podrían traducirse en mayores rendimientos del cultivo de melón Galia (Pacheco *et al.*, 1996).

En el presente trabajo se estudian los consumos netos de agua y nutrientes en cultivo de melón Galia sobre lana de roca, con el objeto de conocer las demandas de los mismos a lo largo de la totalidad del ciclo de cultivo y poder así ajustar de una manera más efectiva el programa de fertirrigación. Además, el estudio de dos áreas con diferente calidad de agua de riego nos permite observar la influencia de esta calidad en las curvas de absorción neta de cada uno de los nutrientes.

Material y métodos

Se ensayan dos cultivos de melón Galia cv. Revigal en invernadero tipo parral alto con cubierta de polietileno térmico, marco de plantación de dos plantas por m^2 y sistema en V de entutorado y poda. Se utiliza como sustrato tablas de lana de roca de $100 \times 20 \times 10 \text{ cm}$, sobre las que se colocan las plantas previamente germinadas en tacos del mismo material de $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}$. El primero de los cultivos tiene lugar en La Mojonera (Almería), se sembró el 05 febrero 1993, se trasplantó el 01 marzo 1993 y finalizó la recolección el 25 junio 1993, la duración del cultivo en invernadero fue de 117 días. El segundo de los cultivos tuvo lugar en Mazarrón (Murcia), zona de climatología menos suave que la anterior en los inicios de la plantación, se sembró el 15 enero 1993, se trasplantó el 15 febrero de 1993 y finalizó la recolección el 10 julio 1993, la duración del cultivo fue de 146 días. En este ensayo se alcanzaron mínimas nocturnas $3-5^\circ\text{C}$ inferiores al ensayo de La Mojonera durante los primeros 40 días de plantación, a partir de entonces las diferencias son escasas, resultando inexistentes a partir de los 60 días desde el trasplante.

El agua de riego del ensayo de La Mojonera fue de mejor calidad, sus principales parámetros analíticos a lo largo del ciclo de cultivo variaron entre los rangos: pH (8,0- 8,4), C. E. (0,81-1,01 dS/m), Cl^- (3,63-3,85 mM), HCO_3^- (3,40-4,60 mM), SO_4^{2-} (0,66-0,88 mM), Ca^{+2} (0,90-1,21 mM), Mg^{+2} (1,42-1,52 mM), Na^+ (3,81-5,02 mM) y K^+ (0,10-0,15 mM). En el ensayo de Mazarrón, durante los primeros 75 días se utilizó agua de pozo de la mejor calidad disponible para favorecer el asentamiento de las plantas y minimizar los daños por elementos fitotóxicos

(sodio, cloruros y boro, principalmente) durante las primeras etapas de su desarrollo. En estos primeros 75 días el agua de riego respondió al análisis: pH (7,7-8,1), C. E. (1,95-2,05 dS/m), Cl^- (5,52-5,62 mM), HCO_3^- (4,90-5,12 mM), SO_4^{2-} (6,78-6,83 mM), Ca^{+2} (4,93-5,07 mM), Mg^{+2} (3,86-3,89 mM), Na^+ (6,07-6,15 mM) y K^+ (0,36-0,44 mM). A partir de los 75 días desde el trasplante y, hasta la finalización del cultivo se empleó un agua proveniente de otro pozo de mayor contenido salino para provocar diferencias y facilitar el estudio comparativo con el primer ensayo en cuanto a la dinámica de la nutrición hídrica y mineral de los cultivos, su análisis fue: pH (7,8-8,2), C. E. (3,32-3,48 dS/m), Cl^- (7,73-9,73 mM), HCO_3^- (5,60-6,20 mM), SO_4^{2-} (11,86-13,29 mM), Ca^{+2} (5,62-6,18 mM), Mg^{+2} (6,56-7,93 mM), Na^+ (13,17-15,07 mM) y K^+ (0,12-0,18 mM).

Ambas instalaciones se equiparon de módulos automáticos de fertirrigación. Durante las primeras dos semanas se programan en modo horario 3-4 riegos de 5-7 minutos hasta el asentamiento de las plantas, a partir de entonces entra en funcionamiento una bandeja de riego por demanda que controla la nutrición hídrica de toda la parcela. El dispositivo consiste en una bandeja sobre la que se sitúan dos tablas de lana de roca con sus plantas correspondientes, con una depresión en el fondo donde se recoge el drenaje y a la que acceden las raíces y con dos electrodos de altura regulable situados en la parte más baja de la bandeja, los cuales disparan y detienen el riego según la transpiración y la demanda de absorción hídrica radical que en cada instante sufra la plantación; ello permite mantener un drenaje adecuado y que este permanezca temporalmente uniforme.

Se establecen controles diarios del número de riegos, volumen aportado, volumen drenado, C. E. y pH de solución nutritiva y drenaje; cada 15-20 días se analizan la solución nutritiva y de drenaje, en función de los resultados se reformula la próxima solución nutritiva. También se efectúan análisis foliares de forma periódica para asegurarnos de una óptima nutrición mineral de los cultivos. Se siguieron los métodos oficiales de análisis del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (1994).

Resultados

En el ensayo de La Mojonera, la producción alcanzada fue de 8,5 kg/m² de frutos de primera calidad y 2,5 kg/m² de melones de segunda calidad, 11 kg/m² de producción total. En el ensayo llevado a cabo en Mazarrón se obtuvieron 6,0 kg/m² de frutos de primera calidad y 4,0 kg/m² de segunda, 10 kg/m² de producción total.

En las tablas 24 y 25 se muestran el número medio de riegos diarios, el volumen de cada riego y el porcentaje de drenaje respecto a la solución nutritiva entrante, para los ensayos de La Mojonera y Mazarrón, respectivamente. Con estos datos y los análisis químicos de las soluciones nutritivas y de drenaje, se calculan a continuación los consumos netos de agua y nutrientes (aportado - drenado).

Tabla 24. Número medio de riegos diarios, volumen de cada riego y % drenado a lo largo del ciclo de cultivo, en el ensayo llevado a cabo en La Mojonera (Almería) con agua de buena calidad.

Días desde trasplante	Media de riegos diarios	L/planta por riego	% Drenado
1-14	3,5	0,125	55
15-30	6,0	0,125	30
31-45	8,0	0,125	20
46-60	11,0	0,150	20
61-117	13,0	0,175	20

Tabla 25. Número medio de riegos diarios, volumen de cada riego y % drenado a lo largo del ciclo de cultivo, en el ensayo llevado a cabo en Mazarrón (Murcia) con agua de peor calidad.

Días desde trasplante	Media de riegos diarios	L/planta por riego	% Drenado
1-14	3,0	0,100	60
15-29	4,5	0,100	50
30-45	6,0	0,125	40
46-60	6,5	0,125	30
61-75	9,0	0,125	30
76-90	13,0	0,150	30
91-106	13,0	0,175	35
107-146	16,0	0,175	35

La figura 32 muestra la evolución del consumo hídrico acumulado durante la totalidad del ciclo de cultivo para el ensayo de La Mojonera, ascendiendo este a 146,7 L/planta y ofreciendo esta evolución un ajuste perfecto a una curva cuadrática ($r^2 = 1,000$). Los consumos acumulados de nitratos, potasio y calcio alcanzan al final del cultivo, 2109,8; 1195,5 y 544,8 mmoles/planta, respectivamente (figura 33). El término cuadrático y la pendiente de la curva guardan el mismo orden que el consumo acumulado (Nitratos > Potasio > Calcio). La figura 34 muestra los consumos acumulados de fosfatos, magnesio y amonio, que ascienden al final del ciclo a 219,2, 191,5 y 94,3 mmoles/planta respectivamente. Al tratarse de unos consumos más reducidos, presentan una mayor linealidad (término cuadrático más bajo). La figura 35 refleja los consumos de sodio, cloruros y sulfatos, 593,7; 454,6 y 114,2 mmoles/planta respectivamente.

Las figuras 36, 37, 38 y 39, muestran los mismos datos presentados en el párrafo anterior para el ensayo de Mazarrón utilizando agua de riego de peor calidad. El consumo hídrico es similar (149,5 L/planta) pese a que el ciclo de cultivo es 29 días más largo. Los consumos de potasio y fosfatos son también parecidos (1057,5 y 273,8 mmoles/planta respectivamente), mientras que el de nitratos es más reducido (1758,5 mmoles/planta) a pesar de que se aportaron en mayor cantidad. Los consumos de calcio, magnesio, sodio, sulfatos y cloruros (846,7; 630,2; 1276,4; 1159,9 y 799,9 mmoles/planta, respectivamente) son sensiblemente superiores debido a su presencia excesiva en el agua de riego empleada. Por último, el amonio muestra un consumo

más reducido, pero, como sucede en el ensayo de La Mojonera, es prácticamente la misma cantidad que se aportó.

Fig. 32. Evolución del consumo acumulado de agua (L/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de La Mojonera.

Fig. 33. Evolución de los consumos acumulados de nitratos, potasio y calcio (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de La Mojonera.

Fig. 34. Evolución de los consumos acumulados de fosfatos, amonio y magnesio (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de La Mojonera.

Fig. 35. Evolución de los consumos acumulados de cloruros, sodio y sulfatos (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de La Mojonera.

Fig. 36. Evolución del consumo acumulado de agua (L/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de Mazarrón.

Fig. 37. Evolución de los consumos acumulados de nitratos, potasio y calcio (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de Mazarrón.

Fig. 38. Evolución de los consumos acumulados de fosfatos, amonio y magnesio (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de Mazarrón.

Fig. 39. Evolución de los consumos acumulados de cloruros, sodio y sulfatos (mmoles/planta) durante la totalidad del ciclo de cultivo en el ensayo de Mazarrón.

Discusión

Es preciso mantener en el ensayo de Mazarrón, con agua de mayor contenido salino, unos porcentajes de drenaje superiores (30-35%, una vez establecido el cultivo), para evitar la excesiva concentración salina total (elevada C. E.) y relativa de iones fitotóxicos (sodio y cloruros, principalmente) en el entorno radical, que se traduciría en importantes pérdidas de rendimiento en el cultivo. Aun así, la producción en el ensayo de La Mojonera es más alta y de mejor calidad.

El ajuste a curvas cuadráticas de los consumos acumulados de agua y nutrientes a lo largo del ciclo de cultivo, ofrecen unos coeficientes de regresión muy próximos a la unidad, resultando en todos los casos positivo el término cuadrático, lo que indica un crecimiento progresivo de los ratios de consumo hídrico y de nutrientes conforme avanza el ciclo de cultivo. La pendiente es positiva en todos los casos en el ensayo de La Mojonera y negativa (excepto para el amonio) en el ensayo de Mazarrón (con agua de calidad superior).

En el ensayo de Mazarrón los iones aportados en apreciable cantidad por el agua de riego (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- y SO_4^{-2}) presentan unos consumos mucho más elevados. A pesar de que los porcentajes drenados de estos mismos iones en el ensayo de La Mojonera, siempre son superiores al drenaje de agua, lo que denota que su aporte es suficiente al estar en condiciones de elevada transpiración y alto consumo hídrico. De este modo, los consumos de estos iones ofrecidos en el ensayo de La Mojonera son más que suficientes para satisfacer las necesidades fisiológicas de la plantación. Esto es especialmente interesante en el caso de los macronutrientes secundarios, ascendiendo los consumos de Ca^{+2} , Mg^{+2} y SO_4^{-2} a 544,8; 191,5 y 114,2 mmoles/planta respectivamente.

Los nutrientes aportados fundamentalmente mediante fertilizantes muestran unos consumos más parejos que pueden servir como orientación de las necesidades nutritivas de este cultivo, NO_3^- (2000 mmoles/planta), H_2PO_4^- (240 mmoles/planta), K^+ (1150 mmoles/planta) y NH_4^+ (90 mmoles/planta), si bien, hay que tener en cuenta que el nitrógeno en forma amónica es rápidamente asimilado por la planta y apenas se drena, pero su aporte en exceso puede resultar perjudicial al ser fitotóxico y causar desequilibrios en la solución nutriente por su fuerte interacción con otros iones.

3.1.2.4. CONSUMOS HÍDRICOS EN CULTIVOS HORTÍCOLAS SIN SUELO BAJO INVERNADERO

AUTORES: ALARCÓN, A. L. & EGEEA, C.

TÍTULO: *Consumos hídricos en cultivos hortícolas sin suelo bajo invernadero.*

CLAVE: A FECHA: 2000

REF. REVISTA: *Horticultura*, 145, Vol. XIX: 16-24. ISSN: 1132-2950.

En el Sureste español, el agua constituye el principal factor limitante de la agricultura intensiva. Los continuos avances tecnológicos en materia de fertirrigación, hidroponía, control climático de invernaderos, riego por demanda, etc., han situado a esta zona a la vanguardia mundial en cuanto a la tecnología y gestión del agua de riego; además el cultivo sin suelo permite un máximo aprovechamiento de los recursos hídricos (Alarcón y Madrid, 1997; De Graaf, 1988). La cantidad de agua necesitada dependerá de la zona, cultivo y estado fenológico del mismo, condiciones climáticas, época del año, control climático del invernadero, tipo de sustrato y su contenedor, nivel salino del agua de riego, sobre todo en zonas áridas, etc. (Jensen y Malter, 1995). El grado de transpiración del cultivo es el factor más determinante a la hora de establecer el consumo de agua por parte del cultivo (Sthanghellini y Van Meurs, 1989). El presente trabajo pretende contribuir al conocimiento de los gastos hídricos previstos para una determinada plantación bajo sistema de hidroponía, dependiendo de sus variables agroclimáticas, parámetro que debería tenerse en cuenta a la hora de estimar la viabilidad económica y medioambiental del cultivo a realizar.

Para este cometido se estiman los consumos netos (volumen de agua evapotranspirado) en diferentes especies hortícolas bajo invernadero en cultivo sin suelo en el sureste español, considerando factores como calidad del agua de riego, duración del ciclo de cultivo, fecha de trasplante, sustrato empleado, densidad de plantación, producción, sistema cerrado o abierto, tipo de invernadero, etc. Estos consumos se ajustan a curvas polinómicas que permiten el cálculo orientativo de los requerimientos hídricos en cualquier momento del ciclo en cultivos bajo similares condiciones.

En sucesivos trabajos se pretende llevar a cabo contribuciones análogas, respecto a los consumos de nitrógeno, fósforo y potasio, elementos que suponen la base de cualquier plan de fertilización. La estimación de la cantidad extraída por parte de la planta a lo largo del ciclo de cultivo, puede contribuir a un mejor ajuste de los programas de fertirrigación de los cultivos, con el objetivo de obtener la mayor productividad y calidad de cosechas al menor coste económico y ambiental.

Material y métodos

Diferentes plantaciones comerciales bajo hidroponía en invernadero, situadas en distintas zonas del sureste español, se sometieron al seguimiento del régimen de riegos y drenajes, con el fin de calibrar, por diferencia de aportes y drenes, los volúmenes evapotranspirados por el cultivo, que suponen el consumo hídrico neto de la plantación. En cada uno de los cultivos se estableció una parcela de ensayo de aproximadamente 0,5 ha. Todos los ensayos disponían de piquetas de goteo autocompensantes y antidrenantes para asegurar la máxima uniformidad en el riego. Asimismo, todos los ensayos controlaban automáticamente la frecuencia de los riegos

mediante el empleo de una bandeja de riego por demanda, dispositivo que consiste en una bandeja de fibra de vidrio, sobre la que se disponen unidades de sustrato con las correspondientes plantas que, por succión directa de sus raíces, gobiernan la activación del riego al provocar un descenso del nivel de solución acumulada en su parte más baja y dejar abierto un circuito eléctrico habilitado para tal fin y consistente en una pareja de electrodos de altura regulable. Con este dispositivo se consigue mantener de manera uniforme y constante el porcentaje de drenaje considerado adecuado en función de la calidad del agua de riego y de las necesidades, del cultivo, activándose el número de riegos demandados en cada instante en función de la evapotranspiración sufrida, con lo que se ajusta al máximo el aprovechamiento de los recursos de agua sin provocar en la plantación estrés hídrico alguno, que en este sistema de cultivo repercute sensiblemente en el rendimiento, al tener las raíces un sustrato de volumen limitado.

En cada parcela de ensayo se dispuso un mínimo de cuatro goteros de control, donde diariamente se recogía y medía el volumen de solución nutritiva aportada.

De la misma forma se dispusieron un mínimo de cuatro puntos de recogida de drenajes por parcela, cada uno de los cuales permitía la recogida de los lixiviados provenientes de dos unidades de sustrato. El cálculo del volumen evapotranspirado, al ser despreciables las pérdidas de solución en los puntos de muestreo, se efectuó por diferencia entre lo aportado y lo drenado y referido a una planta.

Resultados y discusión de los ensayos

En la tabla 26 se especifican los datos correspondientes a cada ensayo que deben tenerse en cuenta para establecer medidas comparativas con otros similares a desarrollar y que pueden afectar directamente al consumo hídrico del cultivo, es decir, producción, ciclo y zona de cultivo, conductividad eléctrica del agua de riego, tipo de invernadero, etc.

La baja producción del pepino cv. Sofía, es debida a una afección del virus del amarilleo que causó importantes pérdidas en la producción final. Los ensayos de tomate con producciones bajas, se debe a que se trata de cultivos mantenidos poco tiempo en producción, 2-3 meses. El agua de riego empleada en el ensayo de melón Galia cv. Revigal (II) presentó una CE de 2,00 dS/m los primeros 75 días del ciclo, a partir de entonces se utilizó otra agua de riego más salina de CE 3,40 dS/m, lo que condujo a una productividad menor que en el ensayo de melón cv. Revigal (I). En el cultivo de pimiento cv. Cuzco, un severo ataque del virus TSWV mermó sensiblemente la producción y provocó el levantamiento prematuro de la plantación.

Tabla 26. Ensayos con variedades hortícolas en diferentes zonas climáticas, épocas, aguas de riego y sustratos.

Ensayo	Sustrato	Lugar	Invernadero	Marco (p/m ²)	P total (kg/m ²)	P 1ª (kg/m ²)	Trasplante	Ciclo (Días)	CE agua (dS/m)
Pepino Alaska	Lana de roca	Mojonera	Parral	1,5	16	13,5	10 Sep	127	0,90
Pepino Sofía	Perlita	Mojonera	Parral	1,5	9,5	8	03 Oct	120	0,95
Tomate Daniela	Perlita	Mojonera	Parral	2	12	10	15 Sep	167	1,05
Tomate Rambo (I)	Lana de roca	Mazarrón	Parral	2	16	14	08 Oct	249	2,60
Cantaloup Manta	Lana de roca	Torre Pacheco	Multitúnel sin control climático	2	10	7,5	15 Mar	117	1,20
Cantaloup Talma	Lana de roca	Torre Pacheco	Multitúnel sin control climático	2	9	7	15 Mar	117	1,20
Galia Revigal (I)	Perlita	Mojonera	Parral	2	11	8,5	01 Mar	117	0,90
Galia Revigal (II)	Lana de roca	Mazarrón	Parral	2	10	6	15 Feb	146	2,00-3,40
Galia Revigal (III)	Lana de roca	Torre Pacheco	Multitúnel con calefacción de apoyo	2	11	8	13 Mar	102	1,30
Tomate Durina (I) Recirculante	Arena	Mazarrón	Multitúnel con control climático	2	23	21,2	05 Feb	210	1,30
Tomate Durina (II) Recirculante	Lana de roca	Mazarrón	Multitúnel con control climático	2	21	19,5	10 Feb	210	1,30
Tomate Rambo (II) Recirculante	Perlita	Murcia	Multitúnel con calefacción de apoyo	2,3	19,3	15,2	03 Nov	231	0,50
Galia Radical Recirculante	Arlita	Murcia	Multitúnel con calefacción de apoyo	2	8,3	7,8	08 Abr	90	0,50
Pimiento Cuzco Recirculante	Fibra de coco	Murcia	Multitúnel con calefacción	2,1	6,5	4	24 Mar	104	0,9-1,2
Pimiento Orlando	Fibra de coco	Torre Pacheco	Parral	2,5	14,3	12,5	29 Ene	203	0,9-1,5
Tomate Brillante (I) Recirculante	Perlita	Murcia	Multitúnel con calefacción	2	13,2	12,1	15 Nov	119	0,9-1,5
Tomate Brillante (II) Recirculante	Lana de roca	Murcia	Multitúnel con calefacción	2	13,4	12	15 Nov	119	0,9-1,5
Tomate 322 Recirculante	Arena	Mazarrón	Multitúnel con control climático	2	18,4	16,8	14 Oct	253	1,2-1,6

La tabla 27 muestra valores de radiación mensual media, para las dos zonas donde se han llevado a cabo los ensayos, Murcia y Almería. estos datos son imprescindibles si se quiere realizar algún tipo de comparación con otras zonas de cultivo.

Tabla 27. Valores aproximados de radiación mensual media (W/m^2) en las zonas de cultivo bajo plástico de Murcia y Almería.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Murcia	100	140	180	250	260	290	280	250	180	160	100	90
Almería	110	160	210	290	290	320	310	280	230	180	130	110

En la tabla 28 y en la figura 40 se muestra la ecuación y algunas gráficas de la evolución seguida por los volúmenes consumidos acumulados, para cada uno de los ensayos anteriormente especificados. Esta evolución se ha ajustado a curvas polinómicas de tercer grado, que permiten la estimación de los consumos de agua netos de la planta en cualquier día de su ciclo de cultivo.

Tabla 28. Curvas del consumo hídrico acumulado (L/planta) para cada uno de los ensayos, en función del tiempo en días transcurridos desde el trasplante del cultivo (d).

Ensayo	Curva para el cálculo del consumo hídrico acumulado en función de los días de ciclo transcurridos	Coefficiente de regresión (r^2)
Pepino Alaska	$L/Planta = -1E-04 \cdot d^3 + 0,0264 \cdot d^2 - 0,4047 \cdot d$	0,9993
Pepino Sofía	$L/Planta = -7E-05 \cdot d^3 + 0,0195 \cdot d^2 - 0,3380 \cdot d$	0,9970
Tomate Daniela	$L/Planta = -5E-05 \cdot d^3 + 0,0147 \cdot d^2 - 0,1821 \cdot d$	0,9998
Tomate Rambo (I)	$L/Planta = -1E-05 \cdot d^3 + 0,0080 \cdot d^2 + 0,4711 \cdot d$	0,9989
Tomate Durina (I) Recirculante	$L/Planta = -2E-05 \cdot d^3 + 0,0087 \cdot d^2 - 0,0321 \cdot d$	0,9989
Tomate Durina (II) Recirculante	$L/Planta = -2E-05 \cdot d^3 + 0,0084 \cdot d^2 - 0,0287 \cdot d$	0,9987
Tomate Rambo (II) Recirculante	$L/Planta = -4E-06 \cdot d^3 + 0,0031 \cdot d^2 - 0,1781 \cdot d$	0,9971
Tomate Brillante (I) Recirculante	$L/Planta = -4E-05 \cdot d^3 + 0,0068 \cdot d^2 + 0,2994 \cdot d$	0,9977
Tomate Brillante (II) Recirculante	$L/Planta = -3E-05 \cdot d^3 + 0,0046 \cdot d^2 + 0,4048 \cdot d$	0,9954
Tomate 322 Recirculante	$L/Planta = 8E-07 \cdot d^3 + 0,0022 \cdot d^2 + 0,1170 \cdot d$	0,9980
Cantaloup Manta	$L/Planta = -3E-05 \cdot d^3 + 0,0140 \cdot d^2 + 0,0390 \cdot d$	0,9974
Cantaloup Talma	$L/Planta = -6E-06 \cdot d^3 + 0,0129 \cdot d^2 - 0,2055 \cdot d$	0,9983
Galia Revigal (I)	$L/Planta = -2E-05 \cdot d^3 + 0,0126 \cdot d^2 - 0,0062 \cdot d$	0,9998
Galia Revigal (II)	$L/Planta = 6E-06 \cdot d^3 + 0,0064 \cdot d^2 - 0,0475 \cdot d$	0,9992
Galia Revigal (III)	$L/Planta = -5E-04 \cdot d^3 + 0,0831 \cdot d^2 - 1,7515 \cdot d$	0,9952
Galia Radical Recirculante	$L/Planta = 1E-04 \cdot d^3 + 0,0025 \cdot d^2 + 0,1159 \cdot d$	0,9988
Pimiento Cuzco Recirculante	$L/Planta = -3E-05 \cdot d^3 + 0,0148 \cdot d^2 - 0,2447 \cdot d$	0,9964
Pimiento Orlando	$L/Planta = -3E-05 \cdot d^3 + 0,0147 \cdot d^2 - 0,3437 \cdot d$	0,9994

Consumo hídrico acumulado en varias especies hortícolas

Gráfica 1:
Tomate cv. Durina I

Gráfica 2:
Tomate cv. Durina II

Gráfica 3:
Tomate cv. 332

Gráfica 4:
Pimiento cv. Orlando

Gráfica 5:
Pepino cv. Alaska

Gráfica 6:
Tomate cv. Daniela

Gráfica 7:
Tomate cv. Rambo I

Gráfica 8:
Melón Cantaloup cv. Manta

Gráfica 9:
Melón Cantaloup cv. Talma

Figura 40. Curvas del consumo hídrico acumulado (L/planta) para algunos de los ensayos, en función del tiempo en días transcurridos desde el trasplante del cultivo.

En los ensayos llevados a cabo bajo sistemas recirculantes, no se ha tenido en cuenta la recuperación efectuada de los lixiviados, siendo los valores de las gráficas (al igual que el resto de ensayos) el consumo hídrico mantenido por cada una de las plantas objeto de ensayo.

Todas las curvas, se han hecho pasar por el origen (sin término independiente) y presentan unos parámetros similares, estos son (con ciertas excepciones), término cúbico muy bajo y negativo, término cuadrático positivo y término x negativo y de valor absoluto más elevado que los otros dos.

Esto conlleva a que presenten la siguiente trayectoria general, consumo hídrico prácticamente nulo hasta el asentamiento de las plantas tras el trasplante (durante los primeros 15-20 días) y

posterior crecimiento que implica un consumo hídrico proporcional al desarrollo del cultivo, con una atenuación final de esta tendencia en los últimos días del ciclo, para alguno de los ensayos efectuados.

Todas las ecuaciones presentan coeficientes de regresión muy próximos a la unidad y pueden utilizarse de modo orientativo para predecir los requerimientos hídricos por parte de cultivos en invernadero bajo hidroponía con similares condiciones agroclimáticas, en cualquier momento de su ciclo de cultivo.

3.2. DISEÑO DE LA APLICACIÓN INFORMÁTICA

3.2.1. DESCRIPCIÓN Y MODO DE FUNCIONAMIENTO

Se trata de una aplicación informática que permite el asesoramiento en la gestión de la fertirrigación en cultivos sin suelo. Para ello el programa se fundamenta y estructura según se explica a continuación.

3.2.1.1. DATOS DEL CULTIVO

El programa está diseñado para la gestión de tantas plantaciones como se estimen oportunas. En la primera pantalla se pueden visualizar todas las plantaciones gestionadas (ver todos) o bien, ver sólo a aquellas que nos interesen agrupadas por fecha de plantación, finca, sector, cultivo o estado. Cada una de las citadas plantaciones queda caracterizada por una serie de datos iniciales, introducidos a través del botón “nueva” y que pueden ser consultados y modificados en cualquier momento en el botón “propiedades”. Además, cada plantación guarda un histórico (imprimible) de todos los análisis efectuados (agua de riego, del tanque de recogida de drenajes, de la disolución drenada) y las disoluciones nutritivas aplicadas, y en el momento que no interese puede ser eliminada de la lista de plantaciones. Los datos que caracterizan a cada plantación se reseñan a continuación:

- Finca
- Sector
- Cultivo: Inicialmente se distingue la especie y dos tipos de variedades, si bien es cierto que el programa está preparado para posteriores ampliaciones:
 - *Variedades de ciclo corto*
 - *Variedades de ciclo largo*
- Fecha de trasplante: Que permitirá datar el inicio del cultivo y evaluar mediante contador los días transcurridos desde el mismo, es decir, el avance del ciclo de cultivo.
- Modalidad de cultivo sin suelo: El programa permite el ajuste de la fertirrigación tanto en sistemas abiertos como en sistemas cerrados con reaprovechamiento de los lixiviados generados:
 - *A solución perdida*
 - *Con recirculación de drenajes*
- Climatología prevista: Se tiene en cuenta el clima donde se desarrolla la plantación, así como, posteriormente la época climática en la que se encuentra el cultivo dentro del tipo de clima establecido. Estos datos son tenidos en cuenta para el ajuste tanto de parámetros de índole nutritivo como de la dosis de riego a aplicar.

- *Clima ecuatorial*
 - *Clima tropical (época seca, media o lluviosa)*
 - *Clima mediterráneo (época cálida, medio o fría)*
 - *Clima continental (época cálida, medio o fría)*
 - *Clima oceánico (época cálida, medio o fría)*
 - *Clima desértico (época cálida, medio o fría)*
- **Instalación:** El programa permite elegir entre las diferentes instalaciones de almacenaje y mezcla de los diferentes fertilizantes (disoluciones madre o concentradas) que podemos encontrar, a partir de las cuales se efectuará la disolución nutritiva final que llegue a cada una de las plantas. Para ello, se define el tipo de instalación, el volumen de los tanques empleados y, en su caso, el porcentaje de concentración de la disolución madre.
 - *Disolución nutritiva directa* (se entiende por disolución nutritiva directa aquella instalación que no utiliza depósitos de disoluciones madre concentradas, es decir, que disponga de un embalse o depósito de capacidad suficiente para preparar in situ la disolución nutritiva a aplicar al cultivo. En un único contenedor se mezclan los diferentes abonos en las cantidades y proporciones definitivas, no existe una dilución posterior). Es necesario definir:
 - Volumen del depósito o embalse.
 - *A + B + ácido* (dos tanques donde se separarán los fertilizantes incompatibles más un tercero utilizado para el ajuste del pH de la disolución nutritiva final). Resulta necesario establecer los parámetros siguientes:
 - Porcentaje de concentración en la disolución madre (se tomará 100 veces por defecto, es decir, si no se introduce valor alguno).
 - Volúmenes de los depósitos de disolución madre.
 - *3 tanques + ácido* (tres tanques donde se separarán fertilizantes incompatibles más un cuarto utilizado para el ajuste del pH de la solución nutritiva final). Como en la situación anterior, hay que definir los parámetros:
 - Porcentaje de concentración en la disolución madre (se tomará 100 veces por defecto, es decir, si no se introduce valor alguno).
 - Volúmenes de los depósitos de disolución madre.
 - *4 tanques + ácido* (cuatro tanques donde se separarán fertilizantes incompatibles, frecuentemente habrá tanques con un único fertilizante, más un quinto utilizado para el ajuste del pH de la solución nutritiva final). Solamente se establece el parámetro:
 - Volúmenes de los depósitos de disolución madre.
 - *8 tanques + ácido* (ocho tanques donde se separarán fertilizantes incompatibles, en la mayoría de los casos un solo fertilizante por tanque, más un noveno

utilizado para el ajuste del pH de la solución nutritiva final). Igualmente se definirá:

- Volúmenes de los depósitos de disolución madre.
- Ácido empleado: En la inmensa mayoría de los casos emplearemos aguas alcalinas, neutras o ligeramente ácidas, por lo que será necesario el empleo de un ácido para el ajuste final del valor de pH. En el improbable caso de contar con un agua de riego considerablemente ácida, sería necesaria la adición de un producto básico para el ajuste final del pH (hidróxido potásico), el programa no está preparado para esta gestión, aunque sí avisa de tal necesidad llegado el hipotético caso. El programa permite la elección entre los ácidos de uso más difundido entre las instalaciones mundiales de cultivo sin suelo:
 - *Ácido nítrico 56-60%.*
 - *Ácido sulfúrico 98%.*
- Sustrato: La programación de la fertirrigación efectuada por el programa tiene en cuenta el sustrato empleado, a tal efecto, permite la elección entre los de uso más difundido a escala mundial (así como si se efectúa un cultivo hidropónico puro, sin sustrato material) o la caracterización de las propiedades físico-químicas básicas si el sustrato empleado no se encuentra presente en la lista disponible siguiente:
 - *Lana de roca.*
 - *Perlita B-12.*
 - *Arena.*
 - *Fibra de coco.*
 - *Turba rubia.*
 - *Medio líquido.*
 - *Otros: Es necesario caracterizarlos mediante el establecimiento de:*
 - Naturaleza: Orgánica o inorgánica.
 - Capacidad de cambio catiónico: CCC < ó > de 20 meq/100 g.
 - % Capacidad de retención de agua útil.

3.2.1.2. DISOLUCIÓN NUTRITIVA INICIAL O DE PARTIDA

Tras presionar el botón “muestra” comienza la ejecución del software con el cálculo de la disolución nutritiva inicial o de partida que se lleva a cabo a partir de los datos anteriores que caracterizan la plantación (cultivo, clima, sistema empleado, sustrato, ácido utilizado) y, además, tiene en cuenta la época dentro del clima preestablecido y, cuantificando y guardando las relaciones oportunas, los diferentes parámetros analíticos del agua de riego (y del agua de riego más el depósito de recirculados en el caso de emplear el sistema de recirculación de drenajes, contemplando asimismo la tasa de recirculación prevista, es decir, lo suficiente para

conocer los parámetros físico-químicos del agua de suministro) que a continuación se enumeran:

- pH.
- Conductividad eléctrica (CE).
- Nitratos.
- Amonio.
- Fosfatos.
- Potasio.
- Calcio.
- Magnesio.
- Sulfatos.
- Cloruros.
- Sodio.
- Bicarbonatos.
- Carbonatos.
- Hierro.
- Manganeso.
- Cinc.
- Cobre.
- Boro.

El programa, mediante fórmulas predefinidas que relacionan los datos del cultivo (especie, climatología, sustrato, sistema) y los parámetros analíticos anteriores, calcula la disolución nutritiva ideal para la plantación caracterizada, y la muestra en la pantalla del ordenador. Los parámetros de la disolución nutritiva ideal pueden ser modificados por el usuario, estableciendo aquellas variaciones que estime oportunas, si así lo considera.

Una vez establecidos los parámetros definitivos de la disolución nutritiva de partida, el programa calcula y establece la programación de la fertirrigación, mostrando:

- Fertilizantes a emplear y cantidades de los mismos.
- Distribución de estos fertilizantes en los diferentes tanques de disolución madre según el tipo de instalación utilizada.
- Porcentajes de inyección a establecer en cada uno de los tanques de disolución madre.
- Cantidades de ácido a aportar.
- pH y CE ideales previstos.
- Incremento de CE previsto respecto al agua de suministro empleada.
- Porcentaje de drenaje a establecer.
- Cálculo de dosis de riego si así se requiere.
- Composición de la disolución nutritiva definitiva (los cálculos van dirigidos a la obtención de la disolución nutritiva propuesta, pero al aportar la mayor parte de los fertilizantes dos o más nutrientes, siempre existe una pequeña variación, que nunca afectará a parámetros fundamentales).

Pantallas en ordenador en disolución nutritiva inicial

Con todo lo establecido hasta el momento, la secuencia de pantallas que son presentadas al usuario para el establecimiento de la disolución nutritiva de partida es la resumida a continuación:

PANTALLA A

*Datos del cultivo y del sistema empleado,
anteriormente detallados*

PANTALLA B.1.

- *Parámetros del agua de riego a utilizar y del agua del depósito de recirculados.*
- *Tasa de recirculación prevista.*
- *Época climática.*

PANTALLA B.2.

*Disolución nutritiva calculada
(modificable si el usuario lo desea)*

PANTALLA B.3.

Datos para programación de la fertirrigación:

- *Disolución nutritiva definitiva.*
- *CE y pH ideales.*
- *CE incremental.*
- *Consumo de ácido previsto.*
- *Peso de fertilizantes y localización en depósitos.*
- *% Inyección de depósitos de disoluciones madre.*
- *% Drenaje idóneo a conseguir.*
- *Dosis de riego.*

3.2.1.3. CÁLCULO DE LAS DISOLUCIONES NUTRITIVAS SUCESIVAS A LO LARGO DEL CICLO DE CULTIVO

Además de lo referido para el cálculo de la disolución nutritiva inicial o de partida (datos del cultivo y análisis del agua de suministro), para el establecimiento de las disoluciones nutritivas sucesivas, el programa evalúa el porcentaje y análisis de la disolución de drenaje, la disolución nutritiva aportada hasta la fecha (que podrá modificarse si el usuario ha aportado cantidades

diferentes a las aconsejadas por el programa), lo que permite estimar la demanda actual de la planta para cada uno de los nutrientes. También evalúa los días transcurridos desde el trasplante, lo que permite la estimación del estado fenológico del cultivo. En base a esto el programa ejecuta los cálculos oportunos para el ajuste adecuado de la disolución nutritiva a aportar.

De forma idéntica a lo expresado para el cálculo de la disolución nutritiva de partida, el programa, mediante fórmulas predefinidas que relacionan los datos del cultivo (especie, climatología, sustrato, sistema, estado fenológico) y los parámetros analíticos anteriores (análisis del agua de suministro, que podrá modificarse si cambia su composición, y de la disolución de drenaje) calcula la disolución nutritiva ideal para la plantación caracterizada, y la muestra en la pantalla del ordenador. Los parámetros de la disolución nutritiva ideal pueden ser modificados por el usuario, estableciendo aquellas variaciones que estime oportunas, si así lo considera.

Una vez establecidos los parámetros definitivos de la disolución nutritiva, el programa establece la programación de la fertirrigación, mostrando:

- Fertilizantes a emplear y cantidades de los mismos.
- Distribución de estos fertilizantes en los diferentes tanques de disolución madre según el tipo de instalación utilizada.
- Porcentajes de inyección a establecer en cada uno de los tanques de disolución madre.
- Cantidades de ácido a aportar.
- pH y CE ideales previstos.
- Incremento de CE previsto respecto al agua de suministro empleada.
- Porcentaje de drenaje a establecer.
- Cálculo de dosis de riego si así se requiere.
- Composición de la disolución nutritiva definitiva.

Pantallas en ordenador en disoluciones nutritivas sucesivas

Con todo lo establecido hasta el momento, la secuencia de pantallas que son presentadas al usuario para el establecimiento de las disoluciones nutritivas sucesivas a lo largo del ciclo de cultivo es la resumida a continuación:

PANTALLA C.1.

- *Agua de riego utilizada (análisis anterior modificable).*
- *Agua del depósito de recirculados (análisis anterior modificable).*
- *Solución nutritiva anterior (datos modificables).*
- *Introducción de parámetros analíticos del drenaje y porcentaje drenado.*
- *Introducción de tasa de recirculación prevista.*
- *Datos climatología prevista (modificable).*

PANTALLA C.2.

*Disolución nutritiva
calculada (modificable si
el usuario lo desea)*

PANTALLA C.3.

Datos para programación de la fertirrigación:

- *Disolución nutritiva definitiva.*
- *CE y pH ideales.*
- *CE incremental.*
- *Consumo de ácido previsto.*
- *Peso de fertilizantes y localización en depósitos.*
- *% Inyección de depósitos de disoluciones madre.*
- *% Drenaje idóneo a conseguir.*
- *Dosis de riego.*
- *Días transcurridos desde el trasplante.*

3.2.1.4. FUNCIONAMIENTO INTERNO DEL SOFTWARE

Resumiendo lo referido hasta el momento, se describen a continuación los fundamentos que utiliza el software para llevar a cabo la programación de la fertirrigación de plantaciones de cultivos sin suelo:

- Cálculo de parámetros ideales de disolución nutritiva según comparación con datos de drenaje, comparación con datos disolución nutritiva aportada hasta la fecha, calidad y composición del agua de riego y depósito de recirculados, parámetros de referencia según estado fenológico del cultivo, climatología prevista, sustrato y sistema empleado, etc.
- Cálculo de la disolución nutritiva a preparar en base a conseguir estos parámetros ideales.
- Cálculo del peso de fertilizantes y/o porcentajes de inyección a aplicar para la consecución de dicha disolución nutritiva.
- Cálculo de otros parámetros adyacentes para la programación de la fertirrigación: Dosis de riego, CE ideal, pH ideal, incremento de CE respecto al agua de suministro, porcentaje de drenaje, consumo previsto de ácido.
- Conviene resaltar que el programa está diseñado para el empleo de la totalidad de fertilizantes generalmente utilizados en los diferentes sistemas de cultivo sin suelo, es decir, los abonos sólidos especiales de alta solubilidad (y con las riquezas comúnmente comercializados), nitrato cálcico, nitrato de magnesio, nitrato amónico, sulfato amónico, sulfato potásico, nitrato potásico, fosfato monopotásico, sulfato de magnesio, cloruro potásico y cloruro sódico, así como los abonos líquidos ácidos de uso más difundido

para el ajuste del pH (a la vez que aportan determinados nutrientes), es decir, ácido fosfórico 75%, ácido nítrico 56-60% y ácido sulfúrico 98%. El programa no está diseñado para el empleo de cualquier otro fertilizante de uso más restringido. En cuanto al aporte de los micronutrientes Hierro, Manganeseo, Cinc, Cobre y Boro, el programa contempla que se adicionen en forma de cualquier complejo comercial de micronutrientes para hidroponía, y cuya composición aproximada, en principio debería estar en torno a 8% Fe (EDTA-Fe); 4% Mn (EDTA-Mn); 0,8% Zn (EDTA-Zn); 0,4% Cu (EDTA-Cu); 0,8% B (tetraborato o ácido bórico) y 0,1% Mo (molibdato).

Designación de parámetros iniciales

Estos parámetros serán introducidos por el usuario en la pantalla designada como B.1. para el cálculo de la disolución nutritiva inicial, y podrán ser modificados por el usuario en posteriores ajustes de la disolución en la pantalla designada como C.1. Los valores correspondientes al depósito de recirculados solo son necesarios y, por tanto, solo aparecerán en pantalla en los sistemas recirculantes.

Parámetros del agua de suministro (agua de riego y del depósito de recirculados en su caso)		
pH	Magnesio (Mg^{+2}) (mM)	Hierro (Fe) (mg/L)
CE (dS/m a 25°C)	Sulfatos (SO_4^{-2}) (mM)	Manganeseo (Mn) (mg/L)
Nitratos (NO_3^-) (mM)	Cloruros (Cl^-) (mM)	Cinc (Zn) (mg/L)
Amonio (NH_4^+) (mM)	Sodio (Na^+) (mM)	Cobre (Cu) (mg/L)
Fosfatos ($H_2PO_4^-$) (mM)	Bicarbonatos (HCO_3^-) (mM)	Boro (B) (mg/L)
Potasio (K^+) (mM)	Carbonatos (CO_3^{-2}) (mM)	% Tasa de recirculación
Calcio (Ca^{+2}) (mM)		

Se entiende por tasa de recirculación la cantidad de drenajes o lixiviados que se reaprovechan respecto al suministro total, es decir, litros procedentes del depósito de recirculados por cada 100 litros de disolución nutritiva preparada.

Se entiende por agua de suministro a la mezcla de agua empleada antes de cualquier adición de fertilizantes, es decir, el agua de riego exclusivamente en los sistemas a solución perdida y el agua de riego más la proporción correspondiente según la tasa de recirculación en los sistemas con recirculación de drenajes.

En función de los parámetros del agua de suministro, el software tiene memorizados una serie de niveles excesivos según los datos de cultivo, con lo que genera señales de aviso si son sobrepasados los citados niveles, del estilo siguiente:

AVISO:

Las necesidades de idóneas de Nitratos / Amonio / Fosfatos / Potasio son sobrepasadas por el nivel presente en el agua de suministro, lo que puede repercutir en el rendimiento del cultivo

AVISO:

La utilización de esta agua de suministro puede mermar sensiblemente los rendimientos del cultivo, debido al exceso de Magnesio / Sulfatos / Cloruros / Sodio / Hierro / Manganeso / Cinc / Cobre / Boro / Contenido salino total

AVISO:

Se recomienda utilizar un complejo de micronutrientes exento de Hierro / Manganeso / Cinc / Cobre / Boro

Designación de los parámetros del análisis de drenaje

Estos parámetros, junto con los correspondientes al agua de suministro y a la disolución nutritiva aportada hasta la fecha, son la base para el cálculo de los niveles óptimos o ideales para optimizar la nueva disolución. Existen unos parámetros de referencia que variarán quincenalmente de acuerdo con la estimación del estado fenológico en el que deba encontrarse la plantación y los datos del cultivo. Por otra parte, los valores correspondientes al drenaje serán introducidos por el usuario cada vez que estime oportuno el reajuste de la disolución nutritiva que se esté aportando (se recomienda que se realice este ajuste a intervalos de 15 días).

Parámetros de la disolución de drenaje		
pH	Magnesio (Mg^{+2}) (mM)	Manganeso (Mn) (mg/L)
CE (dS/m a 25°C)	Sulfatos (SO_4^{-2}) (mM)	Cinc (Zn) (mg/L)
Nitratos (NO_3^{-}) (mM)	Cloruros (Cl^{-}) (mM)	Cobre (Cu) (mg/L)
Amonio (NH_4^{+}) (mM)	Sodio (Na^{+}) (mM)	Boro (B) (mg/L)
Fosfatos ($H_2PO_4^{-}$) (mM)	Bicarbonatos (HCO_3^{-}) (mM)	Micronutrientes (M) (mg/L)
Potasio (K^{+}) (mM)	Carbonatos (CO_3^{-2}) (mM)	% Drenaje
Calcio (Ca^{+2}) (mM)	Hierro (Fe) (mg/L)	

Cálculo de los parámetros ideales

Estos parámetros óptimos o ideales serán a los que el software intente llegar calculando las mezclas oportunas de fertilizantes, queda claro que como la mayor parte de los abonos aportan más de un nutriente, a veces no puede alcanzarse la totalidad de los parámetros óptimos pretendidos, aunque todo este tipo de decisiones ya están contempladas en el desarrollo del programa.

De esta forma se tienen en cuenta los parámetros de referencia según el cultivo, la climatología prevista, el tipo de sustrato, el sistema de cultivo, la composición del agua de suministro, etc., para el establecimiento de valores idóneos de cada uno de los nutrientes, aportación específica

de amonio, relación N/K, corrección de nitratos respecto a cloruros, corrección de potasio respecto a sodio, cálculo de pH ideal, etc.

En pantalla se presentarán los parámetros anteriormente calculados, estos valores podrán ser modificados si el usuario lo desea, en este caso el nuevo valor pasará a constituir valor ideal correspondiente para el cálculo posterior que nos proporcionará los datos relativos al proceso de fertirrigación, siempre y cuando esté dentro de unos rangos establecidos como no desproporcionados que se establecen para prevenir errores en la introducción de datos y que el ordenador avisa (cantidades excesivamente grandes de algún nutriente, niveles de aportación inferiores a los ya contenidos en el agua de suministro, pH excesivamente alto o bajo, pH superior al del agua de suministro).

Una vez establecidos los parámetros ideales definitivos el software pasará directamente al cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes.

Disoluciones nutritivas a lo largo del ciclo de cultivo

El cálculo a seguir para la obtención de los parámetros ideales a lo largo de todo el ciclo de cultivo, vendrá determinado por los valores de referencia según cultivo que varían según el estado fenológico y la época de trasplante, por la cantidad del nutriente que se viene aportando hasta la fecha de preparación de la nueva disolución nutritiva, por la climatología prevista, por el agua de suministro, por el sustrato y sistema empleados y por el valor de los diferentes parámetros en la solución de drenaje que nos informa sobre la demanda o consumo actual por parte de la planta de cada uno de los nutrientes considerados.

En pantalla se presentarán los parámetros anteriormente calculados, que podrán ser modificados si el usuario lo desea, en este caso el nuevo valor (si está dentro de los rangos establecidos como no desproporcionados) pasará a constituir el valor ideal correspondiente para el cálculo posterior que nos proporcionará los datos relativos al proceso de fertirrigación.

Una vez establecidos los parámetros ideales definitivos se pasa directamente al cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes.

Cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes

El programa tiene en cuenta en esta fase la salinidad del agua de riego, calibrada como cantidades presentes de sodio y cloruros y la proporción relativa de calcio, las cantidades de sulfatos para elegir el aporte de uno u otro fertilizante, las relaciones K/Ca y Ca/Mg optimizadas, la riqueza del agua de suministro en calcio y magnesio, el poder amortiguador de pH en función de los carbonatos y bicarbonatos presentes, la posibilidad de elegir el ácido para ajustar el pH, así como las proporciones de todos los nutrientes que pudieran estar presentes en el agua de suministro para el cálculo de la proporción de fertilizantes a adicionar.

Las etapas que sigue, mediante la utilización de los adecuados algoritmos matemáticos, para el cálculo de las pretendidas cantidades de fertilizantes, se enumeran a continuación:

- Ajuste del pH y aporte de fósforo, teniendo en cuenta una serie de casos:
 - Caso general, poder amortiguador del agua de suministro superior a las necesidades de aporte de fósforo e inferior a las necesidades de aporte de nitratos.
 - Caso de agua de suministro de muy buena calidad, con escaso poder amortiguador, en la que no se pueden completar las necesidades de fósforo exclusivamente con aporte de ácido fosfórico.
 - Caso de agua de suministro sin apenas poder tampón, como por ejemplo el agua destilada o desalinizada, no se adicionarán ácidos para el ajuste del pH, este estará ya ajustado a no ser que se trate de un agua muy ácida procedente de algún tipo de vertido.
 - Agua de suministro anormalmente muy carbonatada o bicarbonatada, existen problemas para ajustar el pH hasta el valor idóneo, no se puede completar todo el ajuste del pH con nítrico, se aportarían alrededor de 7 mM de nitratos, en un caso general, lo que resultaría antieconómico y dificultaría el buen ajuste posterior de potasio, nitratos y amonio.
- Ajuste de los aportes de potasio, nitratos, amonio, calcio y magnesio, se tiene en cuenta principalmente:
 - Contenidos de calcio y magnesio en el agua de suministro.
 - Relaciones Ca/Mg, K/Ca y K/Mg.
 - Interrelación del ion sodio, de cara a correcciones en los aportes de calcio y potasio.
 - Contenido de sulfatos en el agua de suministro, en referencia a la elección de fertilizantes.
 - Problemática en el aporte de amonio, etc.
- Ajuste en los aportes de sulfatos
- Ajuste del aporte de cloruro sódico en su caso.

Datos para la programación de la fertirrigación

A continuación, se detallan los diferentes datos o parámetros que el usuario del programa tiene que fijar de cara a la programación de la fertirrigación correspondiente y que aparecerán en las pantallas finales:

- Disolución nutritiva definitiva: Calculada a partir de los aportes de los diferentes fertilizantes y del agua de suministro.
- Cálculo de pH ideal: Calculado a partir de fórmulas que tienen en cuenta los carbonatos y bicarbonatos neutralizados y presentes, el CO₂ disuelto, el anterior pH, etc.
- Cálculo de la CE ideal (dS/m a 25°C): Calculada a partir de las cantidades de cada uno de los fertilizantes que provocan un aumento específico de la CE, las curvas de

neutralización de los diferentes ácidos adicionados, la fuerza iónica de la disolución nutritiva, la CE del agua de suministro, etc.

- CE incremental: La CE también se da como incremento respecto a la que tiene el agua de suministro.
- Consumo de ácido previsto: Calculado en base al pH final de la disolución nutritiva, el ácido elegido, las curvas de neutralización correspondientes, etc. Este dato de consumo de ácido se da tanto en unidades de volumen como de peso de producto.
- Peso de fertilizantes y localización en los depósitos: Cantidades de fertilizantes calculadas en el proceso de preparación de la disolución nutritiva, así como su localización en los diferentes tanques según la instalación disponible y de acuerdo con sus incompatibilidades de mezcla, grado de solubilidad de los mismos, capacidad de los depósitos de disoluciones madre, en su caso concentración de la disolución madre deseada, contemplar cambios fertilizantes si alguno de los tanques queda vacío por no ser necesario el aporte del fertilizante que inicialmente iba a contener, etc. También será referida la cantidad de ácido necesaria para prevenir la precipitación en el tanque donde se localice el complejo de micronutrientes.
- Porcentajes de inyección de los depósitos de disoluciones madre a programar en el equipo de fertirrigación: Nos van a marcar la elaboración de la disolución nutritiva a partir de las soluciones madre concentradas, según el tipo de instalación empleada.
- Cálculo del porcentaje de drenaje idóneo: El programa estima el porcentaje de disolución drenada respecto a la disolución nutritiva aportada en función del tipo de sustrato (en medio líquido recirculante, tipo NFT, este concepto no se tiene en cuenta), parámetros de referencia según cultivos, sistema de cultivo utilizado, calidad del agua de suministro en cuanto a contenido salino total y presencia de iones fitotóxicos, el drenaje mantenido hasta ese momento, el estado fenológico del cultivo, etc.
- Cálculo de la dosis de riego: No es indispensable para la ejecución del programa, simplemente es un dato ofrecido al usuario si este lo requiere. Para su obtención, previamente se habrán establecido, una serie de parámetros para este cálculo, como son volumen de sustrato por planta (L), caudal de los emisores (L/h) y número de emisores por planta. Decir que, si bien la dosis de riego es un dato ofrecido por el programa que se mantiene más o menos fijo en función de los parámetros introducidos, el sustrato empleado, el cultivo y su estado fenológico y la climatología, la frecuencia de riego debe ser regulada por algún método de riego por demanda instalado para tal efecto (bandeja de lixiviación, solarímetro, cubetas de evaporación, etc.) de cara a obtener el drenaje que el programa establecerá como idóneo. Se desaconseja el establecimiento de la frecuencia de riego en modo horario (excepto en los primeros días tras el trasplante) por no ofrecer garantías para mantener la plantación en condiciones óptimas de desarrollo, ya que las necesidades evapotranspirativas del cultivo no son constantes en el tiempo y es imposible de prever con la suficiente precisión. De esta forma se calcula la dosis de riego en minutos para la programación de la fertirrigación, si el sustrato es medio líquido, lógicamente se inhabilita el cálculo de la dosis de riego.

3.2.2. ALGORITMOS QUE COMPONEN LA APLICACIÓN INFORMÁTICA Y SU TOMA DE DECISIONES

3.2.2.1. DESIGNACIÓN PARÁMETROS INICIALES

Agua de riego y depósito de recirculados

Los parámetros correspondientes a los valores analíticos del agua de riego y del depósito de recirculados en su caso, serán introducidos por el usuario en la pantalla designada en la sección anterior como B.1., para el cálculo de la disolución nutritiva inicial, y podrán ser modificados por el usuario en posteriores ajustes de la disolución en la pantalla designada como C.1. Los valores correspondientes al depósito de recirculados solo son necesarios y, por tanto, solo aparecerán en pantalla en los sistemas recirculantes.

Parámetros	Agua de riego	Depósito de recirculados
pH	pHw	pHr
CE (dS/m a 25°C)	Cew	CEr
Nitratos (NO_3^-) (mM)	Nw	Nr
Amonio (NH_4^+) (mM)	NHw	NHr
Fosfatos (H_2PO_4^-) (mM)	Pw	Pr
Potasio (K^+) (mM)	Kw	Kr
Calcio (Ca^{+2}) (mM)	Caw	Car
Magnesio (Mg^{+2}) (mM)	Mgw	Mgr
Sulfatos (SO_4^{-2}) (mM)	Sw	Sr
Cloruros (Cl^-) (mM)	Clw	Clr
Sodio (Na^+) (mM)	Naw	Nar
Bicarbonatos (HCO_3^-) (mM)	Hw	Hr
Carbonatos (CO_3^{-2}) (mM)	Cw	Cr
Hierro (Fe) (mg/L)	Few	Fer
Manganeso (Mn) (mg/L)	Mnw	Mnr
Cinc (Zn) (mg/L)	Znw	Znr
Cobre (Cu) (mg/L)	Cuw	Cur
Boro (B) (mg/L)	Bw	Br
% Tasa de recirculación	-	Tr

Agua de suministro

Se entiende por agua de suministro a la mezcla de agua empleada antes de cualquier adición de fertilizantes, es decir, el agua de riego exclusivamente en los sistemas a solución perdida y el agua de riego más la proporción correspondiente según la tasa de recirculación en los sistemas con recirculación de drenajes. A continuación, se muestran las designaciones del agua de suministro y los niveles considerados como excesivos:

Parámetro	Niveles excesivos (I _{ex})	Designación Suministro (I _s)
Nitratos (NO ₃ ⁻)	> Ni	Ns
Amonio (NH ₄ ⁺)	> NHi	NHs
Fosfatos (H ₂ PO ₄ ⁻)	> Pi	Ps
Potasio (K ⁺)	> Ki	Ks
Calcio (Ca ⁺²)	-	Cas
Magnesio (Mg ⁺²)	> 12 y > Cas	Mgs
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	> 20	Ss
Cloruros (Cl ⁻)	> 15	Cls
Sodio (Na ⁺)	> 12	Nas
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	-	Hs
Carbonatos (CO ₃ ⁻²)	-	Cs
pH	-	pHs
CE	> 4	CEs
Hierro (Fe)	> 5	Fes
Manganeso (Mn)	> 5	Mns
Cinc (Zn)	> 5	Zns
Cobre (Cu)	> 5	Cus
Boro (B)	> 2,0	Bs

Cualquiera de los parámetros anteriores (I_s) valdrán el valor correspondiente a los del agua de riego en sistemas a solución perdida (I_s = I_w) y para los sistemas recirculantes su valor contempla la tasa de recirculación correspondiente: $I_s = [I_w \cdot (100 - Tr) + I_r \cdot Tr] / 100$.

Avisos condicionales

- Si alguno de los parámetros supera el nivel excesivo:

- Para Nitratos, Amonio, Fosfatos y Potasio, es decir si I_s > I_i, entonces I_i = I_s y aparecerá:

AVISO:

Las necesidades de idóneas de Nitratos / Amonio / Fosfatos / Potasio son sobrepasadas por el nivel presente en el agua de suministro, lo que puede repercutir en el rendimiento del cultivo

- Para el resto, Magnesio, Sulfatos, Cloruros, Sodio, Hierro, Manganeso, Cinc, Cobre, Boro y CE, si I_s supera al valor considerado excesivo, entonces aparecerá:

AVISO:

La utilización de esta agua de suministro puede mermar sensiblemente los rendimientos del cultivo, debido al exceso de Magnesio / Sulfatos / Cloruros / Sodio / Hierro / Manganeso / Cinc / Cobre / Boro / Contenido salino total

- Si $Few > 2$; $Mnw > 1$; $Znw > 0,5$; $Cuw > 0,2$; $Bw > 0,5$, aparecerá lo siguiente:

AVISO:

*Se recomienda utilizar un complejo de micronutrientes
exento de Hierro / Manganeso / Cinc / Cobre / Boro*

3.2.2.2. DESIGNACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE REFERENCIA Y DEL ANÁLISIS DE DRENAJE

Estos parámetros, junto con los correspondientes al agua de suministro y a la disolución nutritiva aportada hasta la fecha, son la base para el cálculo de los niveles óptimos o ideales (li) para optimizar la nueva disolución. Los parámetros de referencia variarán quincenalmente de acuerdo con la estimación del estado fenológico en el que deba encontrarse la plantación, los valores correspondientes al drenaje serán introducidos por el usuario cada vez que estime oportuno el reajuste de la disolución nutritiva que se esté aportando (se recomienda que se realice este ajuste a intervalos de 15 días). El cuadro siguiente muestra las designaciones correspondientes:

Parámetro	Designación valor de referencia	Designación valor drenaje
Nitratos (NO_3^-)	Nref	Nd
Amonio (NH_4^+)	NHref	NHd
Fosfatos (H_2PO_4^-)	Pref	Pd
Potasio (K^+)	Kref	Kd
Calcio (Ca^{+2})	Caref	Cad
Magnesio (Mg^{+2})	Mgref	Mgd
Sulfatos (SO_4^{-2})	Sref	Sd
Cloruros (Cl^-)	Clref	Cld
Sodio (Na^+)	Naref	Nad
Bicarbonatos (HCO_3^-)	Href	Hd
Carbonatos (CO_3^{-2})	Cref	Cd
pH	pHref	pHd
CE	CEref	CEd
Hierro (Fe)	Feref	Fed
Manganeso (Mn)	Mnref	Mnd
Cinc (Zn)	Znref	Znd
Cobre (Cu)	Curef	Cud
Boro (B)	Bref	Bd
Micronutrientes (M)	Mref	Md
% Drenaje	-	%Dd

3.2.2.3. CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS IDEALES

Estos parámetros óptimos o ideales (li) serán a los que el software intente llegar calculando las mezclas oportunas de fertilizantes, queda claro que como la mayor parte de los abonos aportan más de un nutriente, a veces no puede alcanzarse la totalidad de los parámetros óptimos pretendidos, aunque todo este tipo de decisiones ya están contempladas en el desarrollo del programa.

Disolución nutritiva inicial o de partida

Para el cálculo de la disolución nutritiva inicial o de partida se toman como parámetros de referencia los correspondientes a la quincena 0, estableciéndose de la manera siguiente el cálculo de los parámetros óptimos o ideales necesarios para ajuste de la disolución nutritiva, en posterior desarrollo del software:

Parámetro	Obtención de los parámetros ideales
Nitratos (NO_3^-) (mmoles/L)	$N_i = N_{\text{ref}} \cdot f / g$
Amonio (NH_4^+) (mmoles/L)	<ul style="list-style-type: none"> Sustratos tipo A: <ul style="list-style-type: none"> Clima mediterráneo: $N_{Hi} = 0,5 \cdot f$ en época cálida y media y $N_{Hi} = 0$ en época fría. Climas ecuatorial, tropical y desértico: $N_{Hi} = 0$ Clima continental y oceánico: $N_{Hi} = f$ Sustratos tipo B: <ul style="list-style-type: none"> $N_{Hi} = 2 \cdot f$
Fosfatos (H_2PO_4^-) (mmoles/L)	$P_i = P_{\text{ref}} \cdot f$ Si época fría $\Rightarrow P_i = 1,15 \cdot p_{\text{ref}} \cdot f$
Potasio (K^+) (mmoles/L)	$K_i = K_{\text{ref}} \cdot f \cdot g$ Si $N_{as} > 12 \Rightarrow K_i = 0,85 \cdot K_{\text{ref}} \cdot f \cdot g$
Calcio (Ca^{+2}) (mmoles/L)	$C_{ai} = C_{\text{ref}} \cdot f$ si $C_{as} \leq C_{\text{ref}} \cdot f$ $C_{ai} = C_{as}$ si $C_{as} > C_{\text{ref}} \cdot f$
Magnesio (Mg^{+2}) (mmoles/L)	$M_{gi} = M_{\text{gref}} \cdot f$ si $M_{gs} \leq M_{\text{gref}} \cdot f$ $M_{gi} = M_{gs}$ si $M_{gs} > M_{\text{gref}} \cdot f$
Sulfatos (SO_4^{-2}) (mmoles/L)	$S_i = S_{\text{ref}} \cdot f$ si $S_s \leq S_{\text{ref}} \cdot f$ $S_i = S_s$ si $S_s > S_{\text{ref}} \cdot f$
Sodio (Na^+) (mmoles/L)	$N_{ai} = N_{\text{aref}} \cdot f$ si $N_{as} \leq N_{\text{aref}} \cdot f$ $N_{ai} = N_{as}$ si $N_{as} > N_{\text{aref}} \cdot f$
Cloruros (Cl^-) (mmoles/L)	$Cl_i = N_{ai} - N_{as} + Cl_s$
Micronutrientes (M) (g/L)	$M_i = 0,025 \cdot f$

Parámetro	Obtención de los parámetros ideales
Bicarbonatos (HCO_3^-) (mmoles/L)	$H_i = 0,5 \text{ si } 0,5 < H_s \leq 5$ $H_i = 1 \text{ si } H_s > 5$ $H_i = H_s \text{ si } H_s \leq 0,5$
pH	<p>Si $0,5 < H_s \leq 5$ $pH_i = 6,3 + \log [24,988 / (\text{CO}_2 + 43,995 \cdot (2C_s + H_s - 0,5))]$</p> <p>Si $H_s > 5$ $pH_i = 6,3 + \log [49,975 / (\text{CO}_2 + 43,995 \cdot (2C_s + H_s - 1))]$</p> <p>Si $H_s \leq 0,5 \Rightarrow pH_i = pH_s$</p> <p>Si $pH_i < 4,5 \Rightarrow pH_i = 4,5$</p> <p>Siendo: $\text{CO}_2 = [(2C_s + H_s) \cdot 49,975] / 10^{\uparrow[pH_s - 6,3]}$</p>

Siendo f y g factores que dependen de la climatología prevista según se especifica en la tabla siguiente:

Climatología prevista		Factores de corrección climática	
Clima	Época	f	g
Ecuatorial	-	1	0,9
Tropical	Seca	0,7	0,85
	Media	0,9	0,9
	Lluviosa	1	0,9
Mediterráneo	Cálida	0,75	0,85
	Media	1	1
	Fría	1,25	1,15
Continental	Cálida	0,8	0,9
	Media	1,1	1
	Fría	1,4	1,2
Oceánico	Cálida	1	0,95
	Media	1,25	1
	Fría	1,3	1,05
Desértico	Cálida	0,7	0,85
	Media	0,9	1
	Fría	1,3	1,15

Y siendo:

- Sustratos tipo A:

- Lana de roca.
- Perlita B-12.
- Arena.
- Medio líquido.
- Otros: Inorgánicos y Orgánicos con CCC < 20 meq/100 g.

• Sustratos tipo B:

- Fibra de coco.
- Turba rubia.
- Otros: Orgánicos con CCC ≥ 20 meq/100 g.

Presentación de los valores de la disolución nutritiva calculada (pantalla B.2.)

En pantalla se presentarán los parámetros anteriormente calculados (valores ideales li), estos valores podrán ser modificados si el usuario lo desea, en este caso el nuevo valor (si está dentro de los rangos establecidos como no desproporcionados) pasará a constituir el valor ideal (li) correspondiente para el cálculo posterior que nos proporcionará los datos relativos al proceso de fertirrigación. El cuadro siguiente muestra las designaciones de estos valores y los rangos establecidos como no desproporcionados:

Parámetro	Valor modificable	Rangos no desproporcionados
Nitratos (NO_3^-)	Ni mmoles/L	Ns a (Ns + 50)
Amonio (NH_4^+)	NHi mmoles/L	NHs a (NHs + 10)
Fosfatos (H_2PO_4^-)	Pi mmoles/L	Ps a (Ps + 10)
Potasio (K^+)	Ki mmoles/L	Ks a (Ks + 50)
Calcio (Ca^{+2})	Cai mmoles/L	Cas a (Cas + 40)
Magnesio (Mg^{+2})	Mgi mmoles/L	Mgs a (Mgs + 25)
Sulfatos (SO_4^{-2})	Si mmoles/L	Ss a (Ss + 25)
Sodio (Na^+)	Nai mmoles/L	Nas a (Nas + 35)
Cloruros (Cl^-)	Cli mmoles/L	Clis a (Clis + 35)
Micronutrientes (M)	Mi g/L	0 a 0,2
Bicarbonatos (HCO_3^-)	Hi mmoles/L	0 a Hs
pH (pH)	pHi	4,5 a pHs

Si se modifica algún valor de nitratos, amonio, fosfatos, potasio, calcio, magnesio, sulfatos, sodio, cloruros o micronutrientes, y este se encuentra fuera del rango designado, deberá salir un aviso que diga:

- Si el valor rebasa el límite inferior: “No se puede aportar una cantidad de [parámetro] inferior a la contenida en el agua de riego”.
- Si el valor rebasa el límite superior: “El valor de [parámetro] debe ser un número comprendido entre [rango especificado]”.

Caso especial del valor de pH y bicarbonatos

- **Si no se modifica** el valor propuesto de pH (pHi) o bicarbonatos (Hi):
 - Si $Hs \leq 5 \Rightarrow BN = 2Cs + Hs - 0,5$
 - Si $Hs > 5 \Rightarrow BN = 2Cs + Hs - 1$
- **Si se modifica** el valor propuesto de pH (pHi):
 - Si **pH modificado > pHs** $\Rightarrow$ **No se permite** la modificación. Aparece el siguiente mensaje: “No se puede alcanzar el pH propuesto sin la adición de una base”.
 - Si $Hs \leq 0,5 \Rightarrow BN = 0$ **y no se permite la modificación** del valor de pH propuesto (pHi). Aparecerá el siguiente mensaje: “No se debe bajar el pH debido al escaso poder amortiguador de esta agua de riego”.
 - **Resto de situaciones** $\Rightarrow$ **pH modificado = pHi**, con límites $4,5 \leq pHi \leq pHs$ y entonces:

$$BN = [49,975 \cdot (2Cs + Hs) - CO_2 \cdot W] / [49,975 + 43,995 \cdot W]$$

$$\text{Siendo } W = 10^{\uparrow [pHi - 6,3]}$$

- **Si se modifica** el valor propuesto de bicarbonatos (Hi):
 - Aparece mensaje: “Se verá modificado el valor ideal de pH, ¿está seguro de continuar?”
 - Si la respuesta es **Sí**:

$$BN = 2Cs + Hs - Hi$$

$$pHi = 6,3 + \log [49,975 / (CO_2 + 43,995 \cdot (2Cs + Hs - Hi))]$$

- **Si se modifica** el valor propuesto de ambos (pHi y Hi):
 - Aparece mensaje: “Los valores de pH y bicarbonatos están interrelacionados, no pueden modificarse ambos simultáneamente y por separado”

Una vez establecidos los parámetros ideales definitivos se pasa directamente al cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes.

Disoluciones nutritivas a lo largo del ciclo de cultivo

Una vez establecidos los parámetros ideales para la disolución nutritiva de partida, vamos a establecer el proceso de cálculo a seguir para la obtención de estos parámetros ideales a lo largo de todo el ciclo de cultivo. El cálculo de los mismos vendrá determinado por el valor de referencia (I_{ref}) que varía según el estado fenológico del cultivo y la época de trasplante, por la cantidad del nutriente que se viene aportando hasta la fecha de preparación de la nueva disolución nutritiva (I_{sn}) (tras deshacer los factores multiplicativos anteriores para evitar la reiteración de correcciones climáticas y/o exceso de sodio y cloruros), por la climatología prevista, por el agua de suministro y por el valor de los diferentes parámetros en la solución de drenaje (I_d) que nos informa sobre la demanda o consumo actual por parte de la planta de cada uno de los nutrientes considerados.

El valor ideal del parámetro se define (excepto para el amonio que mantiene valores fijos y el sodio cuyos valores dependen exclusivamente del agua de suministro y el valor de referencia), como incremento respecto al valor que tenía en la disolución nutritiva anterior, considerando el valor de la climatología prevista: $I_i = (I_{sn} + \Delta I) \cdot f$, con las excepciones de nitratos y potasio que consideran también el factor g . Para el caso de Nitrato $Ni = (N_{sn} + \Delta N) \cdot f / g$. En el caso del potasio $Ki = (K_{sn} + \Delta K) \cdot f \cdot g$. Además, existen condicionantes adicionales para Ni , Pi , Ki y Mgi :

- Si $Clas > Clex \Rightarrow Ni = 1,10 \cdot Ni \text{ calculado}$
- Si época fría $\Rightarrow Pi = 1,15 \cdot Pi \text{ calculado}$ y $Mgi = 1,15 \cdot Mgi \text{ calculado}$
- Si $Nas > 12 \Rightarrow Ki = 0,85 \cdot Ki \text{ calculado}$

Parámetro	Obtención de los parámetros ideales
Nitratos (NO_3^-)	$\Delta N = [N_{sn} - 2N_d \cdot CE_{sn}/CE_d + N_{ref}] \cdot 1,5 / N_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm 2,5$ $Ni \text{ máximo} = 27 \quad Ni \text{ mínimo} = 3$
Amonio (NH_4^+)	<ul style="list-style-type: none"> • Sustratos tipo A: <ul style="list-style-type: none"> - Clima mediterráneo: $NHi = 0,5 \cdot f$ en época cálida y media y $NHi = 0$ en época fría - Climas ecuatorial, tropical y desértico: $NHi = 0$ - Clima continental y oceánico: $NHi = f$ • Sustratos tipo B: <ul style="list-style-type: none"> - $NHi = 2 \cdot f$ • Si $pH_d < 5,8 \Rightarrow NHi = 0$ bajo cualquier circunstancia
Fosfatos ($H_2PO_4^-$)	$\Delta P = [P_{sn} - 3P_d \cdot CE_{sn}/CE_d + P_{ref}] / 4P_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm 0,5$ $Pi \text{ máximo} = 3,2 \quad Pi \text{ mínimo} = 0,4$

Parámetro	Obtención de los parámetros ideales
Potasio (K^+)	$\Delta K = [K_{sn} - 2K_d \cdot C_{esn}/C_{ed} + K_{ref}] \cdot 1,5 / K_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm 2$ $K_i \text{ máximo} = 18 \quad K_i \text{ mínimo} = 2$
Calcio (Ca^{+2})	$\Delta Ca = [Ca_{sn} - 2Ca_d \cdot C_{esn}/C_{ed} + Ca_{ref}] \cdot 1,5 / Ca_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm 0,25 \cdot Ca_{sn}$ $Ca_i \text{ máximo} = K_i \cdot 1,5 \quad Ca_i \text{ mínimo} = 3$
Magnesio (Mg^{+2})	$\Delta Mg = [Mg_{sn} - 2Mg_d \cdot C_{esn}/C_{ed} + Mg_{ref}] \cdot 0,5 / Mg_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm Mg_{sn} / 5$ $Mg_i \text{ máximo} = Ca_i / 1,5 \quad Mg_i \text{ mínimo} = 1,5$
Sulfatos (SO_4^{-2})	$\Delta N = [S_{sn} - 2S_d \cdot C_{esn}/C_{ed} + S_{ref}] \cdot 0,5 / S_{ref}$ $\Delta \text{ Máximo } \pm 1$ $Si \text{ máximo} = 10 \quad Si \text{ mínimo} = 1,5$
Sodio (Na^+)	$Si \text{ Nas} + 2 < N_{aref} \text{ y } CEs < 2 \Rightarrow Nai = N_{aref} \cdot f$ $\text{Resto de situaciones } Nai = Nas \quad (\Delta Na = 0)$
Cloruros (Cl^-)	$Cli = Nai - Nas + Cls$
Micronutrientes (M)	$\Delta Mi = 0,005$ $Si \text{ Fed} \leq 0,5 \text{ o } Mnd \leq 0,3 \text{ o } Znd \leq 0,1 \text{ o } Bd \leq 0,1 \text{ o } Cud = 0$ $\Delta Mi = -0,005$ $Si \text{ Fed} > 2 \text{ y } Mnd > 1 \text{ y } Znd > 0,5 \text{ y } Bd > 0,5 \text{ y } Cud > 0,1$ $\Delta Mi = 0 \text{ para el resto de situaciones}$ $Mi \text{ máximo} = 0,050 \quad Mi \text{ mínimo} = 0,005$
Bicarbonatos (HCO_3^-)	$Hi = 0,5 \text{ si } 0,5 < Hs \leq 5$ $Hi = 1 \text{ si } Hs > 5$ $Hi = Hs \text{ si } Hs \leq 0,5$
pH (pH)	$Si \text{ } 0,5 < Hs \leq 5$ $pHi = 6,3 + \log [24,988 / (CO_2 + 43,995 \cdot (2Cs + Hs - 0,5))]$ $Si \text{ } Hs > 5$ $pHi = 6,3 + \log [49,975 / (CO_2 + 43,995 \cdot (2Cs + Hs - 1))]$ $Si \text{ } Hs \leq 0,5 \Rightarrow pHi = pHs$ $Si \text{ } pHi < 4,5 \Rightarrow pHi = 4,5$ <p>Siendo:</p> $CO_2 = [(2Cs + Hs) \cdot 49,975] / 10^{\uparrow[pHs - 6,3]}$

Siendo:

- Sustratos tipo A:
 - Lana de roca.
 - Perlita B-12.
 - Arena.
 - Medio líquido.
 - Otros: Inorgánicos y Orgánicos con CCC < 20 meq/100 g.
- Sustratos tipo B:
 - Fibra de coco.
 - Turba rubia.
 - Otros: Orgánicos con CCC ≥ 20 meq/100 g.

Y siendo f y g factores que dependen de la climatología prevista según se especifica en la tabla siguiente:

Climatología prevista		Factores de corrección climática	
Clima	Época	f	g
Ecuatorial	-	1	0,9
Tropical	Seca	0,7	0,85
	Media	0,9	0,9
	Lluviosa	1	0,9
Mediterráneo	Cálida	0,75	0,85
	Media	1	1
	Fría	1,25	1,15
Continental	Cálida	0,8	0,9
	Media	1,1	1
	Fría	1,4	1,2
Oceánico	Cálida	1	0,95
	Media	1,25	1
	Fría	1,3	1,05
Desértico	Cálida	0,7	0,85
	Media	0,9	1
	Fría	1,3	1,15

Respecto a los parámetros no dependientes exclusivamente de los aportes de fertilizantes y agua de riego:

- Carbonatos y bicarbonatos: El valor ideal quedará ajustado al proceder a la acidificación de la disolución nutritiva. Los carbonatos presentarán siempre un valor ideal de 0 mM y los bicarbonatos en torno a 0,5-1 mM, a menos que se trate de aguas excesivamente carbonatadas o bicarbonatadas.

- pH: El valor ideal quedará ajustado al proceder a la acidificación de la disolución nutritiva, situándose en torno a 5,5.
- CE: El valor idóneo quedará determinado por la debida al agua de suministro más el incremento que supone la adición de los diferentes fertilizantes en las adecuadas proporciones para lograr los valores ideales de los distintos parámetros nutritivos considerados.

Presentación de los valores de la disolución nutritiva calculada (pantalla C.2.)

En pantalla se presentarán los parámetros anteriormente calculados (valores ideales li), estos valores podrán ser modificados si el usuario lo desea, en este caso el nuevo valor (si está dentro de los rangos establecidos como no desproporcionados) pasará a constituir el valor ideal (li) correspondiente para el cálculo posterior que nos proporcionará los datos relativos al proceso de fertirrigación.

Parámetro	Valor modificable	Rangos no desproporcionados
Nitratos (NO_3^-)	Ni mmoles/L	Ns a (Ns + 50)
Amonio (NH_4^+)	NHi mmoles/L	NHs a (NHs + 10)
Fosfatos (H_2PO_4^-)	Pi mmoles/L	Ps a (Ps + 10)
Potasio (K^+)	Ki mmoles/L	Ks a (Ks + 50)
Calcio (Ca^{+2})	Cai mmoles/L	Cas a (Cas + 40)
Magnesio (Mg^{+2})	Mgi mmoles/L	Mgs a (Mgs + 25)
Sulfatos (SO_4^{-2})	Si mmoles/L	Ss a (Ss + 25)
Sodio (Na^+)	Nai mmoles/L	Nas a (Nas + 35)
Cloruros (Cl^-)	Cli mmoles/L	Clis a (Clis + 35)
Micronutrientes (M)	Mi g/L	0 a 0,2
Bicarbonatos (HCO_3^-)	Hi mmoles/L	0 a Hs
PH (pH)	pHi	4,5 a pHs

Si se modifica algún valor y este se encuentra fuera del rango designado, deberá salir un aviso que diga: El valor debe ser un número comprendido entre [rango especificado].

Caso especial del valor de pH y bicarbonatos

- Si no se modifica el valor propuesto de pH (pHi) o bicarbonatos (Hi):
 - Si $\text{Hs} \leq 5 \Rightarrow \text{BN} = 2\text{Cs} + \text{Hs} - 0,5$
 - Si $\text{Hs} > 5 \Rightarrow \text{BN} = 2\text{Cs} + \text{Hs} - 1$

- **Si se modifica** el valor propuesto de pH (pHi):

- Si **pH modificado > pHs** $\Rightarrow$ **No se permite** la modificación. Aparece el siguiente mensaje: “No se puede alcanzar el pH propuesto sin la adición de una base”.
- Si **Hs $\leq$ 0,5** $\Rightarrow$ **BN = 0 y no se permite la modificación** del valor de pH propuesto (pHi). Aparecerá el siguiente mensaje: “No se debe bajar el pH debido al escaso poder amortiguador de esta agua de riego”.
- **Resto de situaciones** $\Rightarrow$ **pH modificado = pHi**, con límites **4,5 $\leq$ pHi $\leq$ pHs** y entonces:

$$BN = [49,975 \cdot (2Cs+Hs) - CO_2 \cdot W] / [49,975 + 43,995 \cdot W]$$

$$\text{Siendo } W = 10^{\uparrow [pHi - 6,3]}$$

- **Si se modifica** el valor propuesto de bicarbonatos (Hi):

- Aparece mensaje: “Se verá modificado el valor ideal de pH, ¿está seguro de continuar?”
- Si la respuesta es **Sí**:

$$BN = 2Cs+Hs-Hi$$

$$pHi = 6,3 + \log [49,975 / (CO_2 + 43,995 \cdot (2Cs+Hs-Hi))]$$

- **Si se modifica** el valor propuesto de ambos (pHi y Hi):

- Aparece mensaje: “Los valores de pH y bicarbonatos están interrelacionados, no pueden modificarse ambos simultáneamente y por separado”

Una vez establecidos los parámetros ideales definitivos se pasa directamente al cálculo de aportes de nutrientes y cantidades de fertilizantes.

3.2.2.4. CÁLCULO DE APORTES DE NUTRIENTES Y CANTIDADES DE FERTILIZANTES

A continuación, se exponen las decisiones ordenadas a ejecutar por el programa. Cuando una determinada celda/cuadro especificado en una operación no exista debido a que no se ejecuta esa vía del programa, esta adoptará el valor 0, es decir, todas las celdas valen 0 por defecto.

El orden en cada subetapa va marcado mediante la unión por flechas de dirección de las celdas/cuadro. Los números sobre flechas que parten de un único cuadro (ejemplo: 1 →) indican el orden a seguir a partir del mismo. Los números a principio de líneas indican el orden a seguir a partir de un determinado caso. Los números entre paréntesis (ejemplo: (1)) sobre un cuadro designan el valor del mismo, que puede ser utilizado en posteriores fases del organigrama del software.

El programa tiene en cuenta en esta fase la salinidad del agua de riego calibrada como cantidades presentes de sodio y cloruros y la proporción relativa de calcio, las cantidades de sulfatos para elegir el aporte de uno u otro fertilizante, la relaciones K/Ca y Ca/Mg optimizadas, la riqueza del agua de suministro en calcio y magnesio, el poder amortiguador de pH en función de los carbonatos y bicarbonatos presentes, la posibilidad de elegir el ácido para ajustar el pH, así como las proporciones de todos los nutrientes que pudieran estar presentes en el agua de suministro para el cálculo de la proporción de fertilizantes a adicionar.

A. AJUSTE DEL pH Y APOORTE DE FÓSFORO

Primer Caso: $(Ni - Ns) \geq (2Cs + Hs) > (2Cs + Hs - BN + Pi - Ps)$ (caso general)

Segundo Caso: $0,4 < (2Cs + Hs) \leq (2Cs + Hs - BN + Pi - Ps)$ (caso de agua de suministro de muy buena calidad, no se pueden completar las necesidades de fósforo exclusivamente con aporte de ácido fosfórico).

Tercer Caso: $Hs \leq 0,4$ (caso de agua de suministro sin apenas bicarbonatos, como por ejemplo el agua destilada o desalinizada, no se adicionarán ácidos para el ajuste del pH, este estará ya ajustado a no ser que se trate de un agua muy ácida procedente de algún tipo de vertido).

Cuarto Caso: $(2Cs + Hs) > (Ni - Ns)$ (agua de suministro anormalmente muy carbonatada o bicarbonatada, existen problemas para ajustar el pH hasta el valor idóneo, no se puede completar todo el ajuste del pH con nítrico, se aportarían alrededor de 7 mM de nitratos, en un caso general, lo que resultaría antieconómico y dificultaría el buen ajuste posterior de potasio, nitratos y amonio).

B. AJUSTE DE LOS APORTES DE POTASIO, NITRATOS, AMONIO, CALCIO Y MAGNESIO

Primer Caso: $Cas \geq Cai \geq Mgs \geq Mgi$ (caso general en nuestras condiciones agroclimáticas)

I. Sin previo ajuste de requerimientos mínimos de calcio y/o magnesio

Segundo Caso: $Cas \geq Cai$ y $Mgs < Mgi$ (agua pobre en magnesio)

I. Ajuste de los requerimientos mínimos de magnesio

Tercer Caso: $Cas < Cai$ y $Mgs < Cai$ (agua blanda o poco dura, caso poco corriente en nuestras condiciones, a no ser que se trate de agua desalinizada)

I. Ajuste de los requerimientos mínimos de calcio y/o magnesio

- Si $Mgs < Mgi$

Cuarto Caso: $Cas < Cai$ y $Mgs > Cai$ (agua pobre en calcio y rica en magnesio)

I. Ajuste de los requerimientos mínimos de calcio

Pasos comunes a los cuatro casos

Se establece:

- $Mgt = Mgs$ si $Mgs \geq Mgi$ y $Mgt = Mgi$ si $Mgs < Mgi$
- $Cat = Cas$ si $Cas \geq Cai$ y $Cat = Cai$ si $Cas < Cai$

II. Ajuste del aporte de potasio

III. Ajuste del aporte de nitratos y amonio

Sea $NHn = [NHi-NHs-(45)-(49)-(53)]$ si > 0 y $NHn = 0$ si $[NHi-NHs-(45)-(49)-(53)] \leq 0$

- Si

- Si

C. AJUSTE DE LOS APORTES DE SULFATOS

D. AJUSTE DE LOS APORTES DE CLORURO SÓDICO

Sea $NaCla = (Nai - Nas)$ si $(Nai - Nas) \geq (Cli - Cls)$

y $NaCla = (Cli - Cls)$ si $(Nai - Nas) < (Cli - Cls)$

3.2.2.5. DATOS PARA LA PROGRAMACIÓN DE LA FERTIRRIGACIÓN (PANTALLAS B.3. Y C.3.)

A continuación, se detallan el cálculo de los diferentes datos o parámetros que el usuario del programa tiene que fijar de cara a la programación de la fertirrigación correspondiente. Los cálculos para la obtención de estos datos que se presentan en las pantallas como B.3. y C.3., están basados en la utilización de diferentes valores calculados o introducidos anteriormente en el desarrollo del software y que han sido convenientemente designados.

Disolución nutritiva definitiva

Los parámetros de la disolución nutritiva definitiva que aparecerá en pantalla y los correspondientes cálculos en base a sumatorios de las celdillas designadas en el desarrollo del software se detallan a continuación:

Nutrientes	Valor	Designación
Nitratos (NO_3^-) (mmoles/L)	$\text{Ns}+(4)+(24)+(30)+(35)+(41)+(46)+(50)+(54)+(63)+(66)+(72)+(75)+(78)+(80)+(84)+(87)+(91)+(95)+(97)+(104)+(107)+(110)+(112)+(116)+(119)+(123)$	Ndef
Amonio (NH_4^+) (mmoles/L)	$\text{NHs}+(45)+(49)+(53)+(71)+(81)+(83)+(88)+(90)+(94)+(103)+(113)+(115)+(120)+(122)$	NHdef
Fosfatos (H_2PO_4^-) (mmoles/L)	$\text{Ps}+(2)+(6)+(10)+(12)+(15)+(18)+(22)+(28)$	Pdef
Potasio (K^+) (mmoles/L)	$\text{Ks}+(13)+(16)+(56)+(60)+(62)+(65)+(68)+(98)+(101)$	Kdef
Calcio (Ca^{+2}) (mmoles/L)	$\text{Cas}+(44)+(48)+(52)+(85)+(92)+(117)+(124)$	Cadef
Magnesio (Mg^{+2}) (mmoles/L)	$\text{Mgs}+(33)+(36)+(39)+(42)+(74)+(77)+(106)+(109)+(127)$	Mgdef
Sulfatos (SO_4^{-2}) (mmoles/L)	$\text{Ss}+(8)+(20)+(26)+(32)+(38)+(57)+(59)+(69)+(100)+(126)$	Sdef
Cloruros (Cl^-) (mmoles/L)	$\text{Cls}+(130)$	Cldef
Sodio (Na^+) (mmoles/L)	$\text{Nas}+(129)$	Nadef
Bicarbonatos (HCO_3^-) (mmoles/L)	$2\text{Cs} + \text{Hs} - (2) - (4) - (6) - 2 \cdot (8) - (10) - (18) - 2 \cdot (20) - (22) - (24) - 2 \cdot (26) - (28) - (30)$	Hdef
Micronutrientes (g/L)	Mi	Midef

Cálculo del pH ideal

El pH ideal a programar en el equipo de fertirrigación será el valor de pH_i , excepto en el caso de aguas de suministro excesivamente carbonatadas o bicarbonatadas, cuarto caso del apartado A (ajuste del pH y aporte de fósforo), cuando se decida ajustar el pH con ácido nítrico sin llegar a completar la neutralización de bicarbonatos, o más brevemente, cuando (28) ó (30) sean mayores de 0.

El pH ideal a programar vendrá dado por:

$$\text{pH ideal} = + 6,3 + \log [49,975 \cdot (2\text{Cs} + \text{Hs} - \text{BN}) / (\text{CO}_2 + 43,995 \cdot \text{BN})]$$

Siendo:

$$\text{CO}_2 = [(2\text{Cs} + \text{Hs}) \cdot 49,975] / 10^{\uparrow[\text{pHs} - 6,3]}$$

$$\text{BN (HCO}_3^- \text{ neutralizados)} = (2) + (4) + (6) + 2 \cdot (8) + (10) + (18) + 2 \cdot (20) + (22) + (24) + 2 \cdot (26) + (28) + (30)$$

$$\text{Si Hs} = 0 \Rightarrow \text{pH ideal} = 4,5$$

$$\text{Si pH ideal} < 4.5 \Rightarrow \text{pH ideal} = 4,5$$

Cálculo de la CE ideal (medida en dS/m a 25°C)

Se establece a continuación el ajuste de la CE generada por los fertilizantes a emplear (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C), a curvas bajo concentraciones usuales de uso. Además, se indica la cantidad utilizada de cada fertilizante como sumatorio de las celdillas designadas en el organigrama desarrollado del software, dato que es necesario para el cálculo de CE ideal y que también será utilizado después en el cálculo del peso de fertilizantes a aportar y localización en los tanques, así como en el cálculo de los porcentajes de inyección de los diferentes depósitos de disoluciones madre.

a. Fertilizantes sólidos

- Nitrato amónico (x = de 0 a 0,2 g/L):

$$\Delta\text{CE} = -2073,7x^3 + 119,08x^2 + 1794,2x$$

$$\text{Cantidad aportada (g/L): } x (\text{NA}) = (70) + (79) + (86) + (93) + (102) + (111) + (118)$$

- Nitrato potásico (x = de 0 a 1 g/L):

$$\Delta\text{CE} = 97,601x^3 - 190,05x^2 + 1456,5x$$

$$\text{Cantidad aportada (g/L): } x (\text{NP}) = (61) + (64) + (96)$$

- Nitrato cálcico (x = de 0 a 1 g/L):

$$\Delta\text{CE} = 156,45x^3 - 300,39x^2 + 1320,9x$$

$$\text{Cantidad aportada (g/L): } x (\text{NC}) = (43) + (47) + (51) + (82) + (89) + (114) + (121)$$

- Nitrato de magnesio (x = de 0 a 0,5 g/L):

$$\Delta\text{CE} = 354,14x^3 - 381,38x^2 + 998,16x$$

Cantidad aportada (g/L): $x \text{ (NM)} = (34) + (40) + (73) + (76) + (105) + (108)$

- Sulfato potásico ($x = \text{de } 0 \text{ a } 0,5 \text{ g/L}$):

$$\Delta CE = 33,192x^3 - 324,18x^2 + 1913,8x$$

Cantidad aportada (g/L): $x \text{ (SP)} = (55) + (58) + (67) + (99)$

- Sulfato de magnesio ($x = \text{de } 0 \text{ a } 0,5 \text{ g/L}$):

$$\Delta CE = 610,21x^3 - 813,8x^2 + 1074,4x$$

Cantidad aportada (g/L): $x \text{ (SM)} = (31) + (37) + (125)$

- Fosfato monopotásico ($x = \text{de } 0 \text{ a } 0,5 \text{ g/L}$):

$$\Delta CE = -192,50x^3 + 5,1724x^2 + 795,54x$$

Cantidad aportada (g/L): $x \text{ (FM)} = (11) + (14)$

- Cloruro sódico ($x = \text{de } 0 \text{ a } 0,5 \text{ g/L}$):

$$\Delta CE = 1804,2x^3 - 1425,1x^2 + 2267,5x$$

Cantidad aportada (g/L): $x \text{ (CS)} = (128)$

b. Fertilizantes líquidos (ácidos)

- Adición de ácido nítrico 56-60% con presencia de bicarbonatos:

$$\Delta CE = -29,717x^3 - 18,461x^2 + 266,72x$$

Cantidad aportada (ml/L): $x \text{ (AN)} = (3) + (23) + (29)$

- Adición de ácido fosfórico 75% con presencia de bicarbonatos:

$$\Delta CE = 68,307x^3 - 200,19x^2 + 18,472x$$

Cantidad aportada (ml/L): $x \text{ (AF)} = (1) + (5) + (9) + (17) + (21) + (27)$

- Adición de ácido sulfúrico 98% con presencia de bicarbonatos:

$$\Delta CE = 7049,3x^3 - 7149,7x^2 + 1304,2x$$

Cantidad aportada (ml/L): $x \text{ (AS)} = (7) + (19) + (25)$

La CE ideal vendrá dada por la fórmula siguiente:

- Sistemas a solución perdida:

$$CE\text{ ideal} = CE_w + \Sigma \Delta CE_{\text{ácidos}}/1000 + \Sigma \Delta CE_{\text{sólidos}} \cdot f/1000$$

- Sistemas recirculantes:

$$CE_{\text{ideal}} = [CE_w \cdot (100 - Tr) + CE_r \cdot Tr \cdot f]/100 + \Sigma \Delta CE_{\text{ácidos}}/1000 + \Sigma \Delta CE_{\text{sólidos}} \cdot f/1000$$

Siendo:

$$f = \frac{0,35}{[(N_{\text{def}} + NH_{\text{def}} + P_{\text{def}} + K_{\text{def}} + 4C_{\text{def}} + 4Mg_{\text{def}} + 4S_{\text{def}} + Cl_{\text{def}} + Na_{\text{def}} + H_{\text{def}})/2000]} \uparrow 0,25$$

Nota: 0,35 regula la intensidad del factor y 0,25 la amplitud de cambio, establecido como fuerza iónica (μ), $\mu = 0,03$ ($f = 0,85$) y $\mu = 0,10$ ($f = 0,62$).

- Ambos tipos de sistemas

$$CE\text{ incremental} = \Sigma \Delta CE_{\text{ácidos}}/1000 + \Sigma \Delta CE_{\text{sólidos}} \cdot f/1000$$

Consumo de ácido previsto

- Si se decide ajustar pH con ácido nítrico 59%:

- Consumo de ácido nítrico 56-60% = [(3)+(23)+(29)] L por m³ de agua de suministro.

En peso:

- Consumo de ácido nítrico 56-60% = 1,34 · [(3)+(23)+(29)] kg/m³ de agua de suministro.

Si además, se está utilizando un agua de suministro excesivamente carbonatada o bicarbonatada (cuarto caso del ajuste del pH y aporte de fósforo) y se decide ajustar hasta pH ideal, hay que aportar cierta cantidad de ácido sulfúrico:

- Consumo de ácido sulfúrico 98% = (25) L por m³ de agua de suministro.

En peso:

- Consumo de ácido sulfúrico 98% = 1,84 · (25) kg/m³ de agua de suministro.

- Si se decide ajustar pH con ácido sulfúrico 98%:

- Consumo de ácido sulfúrico 98% = [(7)+(19)+(25)] L por m³ de agua de suministro.

En peso:

- Consumo de ácido sulfúrico 98% = 1,84 · [(7)+(19)+(25)] kg/m³ de agua de suministro.

Peso de fertilizantes y localización en depósitos

Disolución nutritiva directa

Se entiende por disolución nutritiva directa aquella instalación que no utiliza depósitos de disoluciones madre concentradas, es decir, que disponga de un embalse o depósito de capacidad suficiente para preparar in situ la disolución nutritiva a aplicar al cultivo.

En este caso, el peso de los diferentes fertilizantes a adicionar será el siguiente, previamente se habrá establecido en la pantalla inicial (pantalla A), el volumen del embalse o depósito utilizado.

Volumen de llenado del embalse o depósito utilizado (L) = V

Fertilizantes	Cantidad a aportar
Nitrato cálcico	kg de NC = [(43)+(47)+(51)+(82)+(89)+(114)+(121)] · V/1000
Nitrato de magnesio	kg de NM = [(34)+(40)+(73)+(76)+(105)+(108)] · V/1000
Nitrato amónico	kg de NA = [(70)+(79)+(86)+(93)+(102)+(111)+(118)] · V/1000
Nitrato potásico	kg de NP = [(61)+(64)+(96)] · V/1000
Sulfato potásico	kg de SP = [(55)+(58)+(67)+(99)] · V/1000
Fosfato monopotásico	kg de FM = [(11)+(14)] · V/1000
Sulfato de magnesio	kg de SM = [(31)+(37)+(125)] · V/1000
Cloruro sódico	kg de CS = (128) · V/1000
Ácido fosfórico 75%	L de AF = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] · V/1000 kg de AF = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] · V/625
Microelementos	Gramos de Microelementos = Mi · V

Notas:

- Los consumos de ácido previsto (apartado anterior) también deben ser aportados al embalse o depósito utilizado.
- Sólo aparecerán en pantalla aquellos fertilizantes que se aporten en cierta cantidad, cuando la adición de alguno de ellos sea nula, se suprimirá la fila correspondiente en pantalla.

A + B + ácido

Se entiende por A + B + ácido aquella instalación donde se utilicen dos tanques o depósitos de disoluciones madres concentradas en los que se separan fertilizantes incompatibles entre sí, además de otro depósito donde se disponga el ácido elegido para el ajuste del pH.

En este caso, el peso de los diferentes fertilizantes a adicionar será el siguiente, previamente se habrá establecido en la pantalla inicial (pantalla A), el volumen de los depósitos de disoluciones madre y el nivel de concentración de dichas disoluciones, que será 100 veces por defecto.

Volumen de llenado de depósitos de disoluciones madre concentradas (L) = V
Nivel de concentración de las disoluciones madre (100 veces por defecto) = C veces

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	$\text{kg NC} = [(43)+(47)+(51)+(82)+(89)+(114)+(121)] \cdot V \cdot C/1000$	A
Nitrato de magnesio	$\text{kg NM} = [(34)+(40)+(73)+(76)+(105)+(108)] \cdot V \cdot C/1000$	
Nitrato potásico	$\text{kg NP} = [(61)+(64)+(96)] \cdot V \cdot C/2000$	
Cloruro sódico	$\text{kg CS} = (128) \cdot V \cdot C/1000$	
Micronutrientes	Gramos de Microelementos = $Mi \cdot V \cdot C$	
Nitrato potásico	$\text{kg NP} = [(61)+(64)+(96)] \cdot V \cdot C/2000$	B
Nitrato amónico	$\text{kg NA} = [(70)+(79)+(86)+(93)+(102)+(111)+(118)] \cdot V \cdot C/1000$	
Sulfato potásico	$\text{kg SP} = [(55)+(58)+(67)+(99)] \cdot V \cdot C/1000$	
Fosfato monopotásico	$\text{kg FM} = [(11)+(14)] \cdot V \cdot C/1000$	
Sulfato de magnesio	$\text{kg SM} = [(31)+(37)+(125)] \cdot V \cdot C/1000$	
Ácido fosfórico 75%	$\text{Litros AF} = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V \cdot C/1000$ $\text{kg AF} = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V \cdot C/625$	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros AS} = (25) \cdot V \cdot C/1000$ $\text{kg AS} = (25) \cdot V \cdot C/543$	

Notas:

- El tanque que contiene los micronutrientes (A) debería acidificarse adicionando las cantidades de ácido siguientes:
 - Si se emplea ácido nítrico 56-60% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0787 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,1054 \cdot V \text{ gramos}$
 - Si se emplea ácido sulfúrico 98% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0266 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,049 \cdot V \text{ gramos}$

- Los aportes de ácido previsto (apartado anterior) se aportarán en un tercer depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal.
- La cantidad a aportar de nitrato potásico se repartirá por igual en los dos tanques, siempre que constituya una cantidad significativa. Cuando kg NP sea inferior a $0,03 \cdot V$, toda la cantidad será adicionada al segundo depósito.
- Sólo aparecerán en pantalla aquellos fertilizantes que se aporten en cierta cantidad, cuando la adición de alguno de ellos sea nula, se suprimirá la fila correspondiente en pantalla.

Tres tanques + ácido

Se entiende por tres tanques + ácido aquella instalación donde se utilicen tres tanques o depósitos de disoluciones madres concentradas donde se separen los fertilizantes incompatibles entre sí, además de otro depósito donde se disponga el ácido elegido para el ajuste del pH.

En este caso, el peso de los diferentes fertilizantes a adicionar será el siguiente, previamente se habrá establecido en la pantalla inicial (pantalla A), el volumen de los depósitos de disoluciones madre y el nivel de concentración de dichas disoluciones (100 veces por defecto).

Volumen de llenado de depósitos de disoluciones madre concentradas (L) = V
Nivel de concentración de las disoluciones madre (100 veces por defecto) = C veces

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	$\text{kg NC} = [(43)+(47)+(51)+(82)+(89)+(114)+(121)] \cdot V \cdot C/1000$	1
Nitrato de magnesio	$\text{kg NM} = [(34)+(40)+(73)+(76)+(105)+(108)] \cdot V \cdot C/1000$	
Cloruro sódico	$\text{kg CS} = (128) \cdot V \cdot C/1000$	
Micronutrientes	Gramos de Microelementos = $Mi \cdot V \cdot C$	
Nitrato potásico	$\text{kg NP} = [(61)+(64)+(96)] \cdot V \cdot C/1000$	2
Nitrato amónico	$\text{kg NA} = [(70)+(79)+(86)+(93)+(102)+(111)+(118)] \cdot V \cdot C/1000$	
Sulfato potásico	$\text{kg SP} = [(55)+(58)+(67)+(99)] \cdot V \cdot C/1000$	
Fosfato monopotásico	$\text{kg FM} = [(11)+(14)] \cdot V \cdot C/1000$	3
Sulfato de magnesio	$\text{kg SM} = [(31)+(37)+(125)] \cdot V \cdot C/1000$	
Ácido fosfórico 75%	$\text{Litros AF} = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V \cdot C/1000$ $\text{kg AF} = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V \cdot C/625$	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros AS} = (25) \cdot V \cdot C/1000$ $\text{kg AS} = (25) \cdot V \cdot C/543$	

Notas:

- El tanque que contiene los micronutrientes (1) debería acidificarse adicionando las cantidades de ácido siguientes:

- Si se emplea ácido nítrico 56-60% para el ajuste del pH, añadir:

$$\checkmark \cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0787 \cdot V \text{ cm}^3$$

$$\checkmark \cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,1054 \cdot V \text{ gramos}$$

- Si se emplea ácido sulfúrico 98% para el ajuste del pH, añadir:

$$\checkmark \cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0266 \cdot V \text{ cm}^3$$

$$\checkmark \cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,049 \cdot V \text{ gramos}$$

- Los aportes de ácido previsto (apartado anterior) se aportarán en un tercer depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal.
- Sólo aparecerán en pantalla aquellos fertilizantes que se aporten en cierta cantidad, cuando la adición de alguno de ellos sea nula, se suprimirá la fila correspondiente en pantalla.

Cuatro tanques + ácido

Se entiende por 4 tanques + ácido aquella instalación donde se utilicen 4 tanques o depósitos de disoluciones madres concentradas donde se separen fertilizantes incompatibles entre sí, además de otro depósito donde se disponga el ácido elegido para el ajuste del pH. Previamente se habrá establecido en la pantalla inicial (pantalla A), el volumen de los depósitos de disoluciones madre.

Para facilitar los cálculos se designan las cantidades a aportar de fertilizantes calculadas por el software de la siguiente manera:

Volumen de llenado de depósitos de disoluciones madre concentradas (L) = V

Fertilizante	Designación
Nitrato cálcico	$[NC] = [(43)+(47)+(51)+(82)+(89)+(114)+(121)] \cdot V/1000$
Nitrato de magnesio	$[NM] = [(34)+(40)+(73)+(76)+(105)+(108)] \cdot V/1000$
Nitrato potásico	$[NP] = [(61)+(64)+(96)] \cdot V/1000$
Nitrato amónico	$[NA] = [(70)+(79)+(86)+(93)+(102)+(111)+(118)] \cdot V/1000$
Sulfato potásico	$[SP] = [(55)+(58)+(67)+(99)] \cdot V/1000$
Sulfato de magnesio	$[SM] = [(31)+(37)+(125)] \cdot V/1000$
Fosfato monopotásico	$[FM] = [(11)+(14)] \cdot V/1000$
Cloruro sódico	$[CS] = (128) \cdot V/1000$
Micronutrientes	$[Mi] = Mi \cdot V$
Ácido fosfórico 75%	$[AF I] = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V/1000$ $[AF kg] = [(1)+(5)+(9)+(17)+(21)+(27)] \cdot V/625$
Ácido sulfúrico 98%	$[AS I] = (25) \cdot V/1000$ $[AS kg] = (25) \cdot V/543$

ORDENACIÓN DE LOS FERTILIZANTES POR DEPÓSITOS Y CANTIDADES DE APORTE

DEPÓSITO 1: Nitrato cálcico, nitrato de magnesio y micronutrientes:

Condicionantes:

- Si $0 < [NC] \geq [NM]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	kg de Nitrato cálcico = $0,1 \cdot V$	1
Nitrato de magnesio	kg de Nitrato de magnesio = $\frac{0,1 \cdot V \cdot [NM]}{[NC]}$	
Micronutrientes	Gramos de Micronutrientes = $\frac{0,1 \cdot V \cdot [Mi]}{[NC]}$	

- Si $[NM] > [NC]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	kg de Nitrato de cálcico = $\frac{0,1 \cdot V \cdot [NC]}{[NM]}$	1
Nitrato de magnesio	kg de Nitrato de magnesio = $0,1 \cdot V$	
Micronutrientes	Gramos de Micronutrientes = $\frac{0,1 \cdot V \cdot [Mi]}{[NM]}$	

- Si $[NM] = [NC] = 0 < [Mi]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	0	1
Nitrato de magnesio	0	
Micronutrientes	Gramos de Micronutrientes = $5 \cdot V$	

- Si $[NM] = [NC] = [Mi] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 1 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	0	1
Nitrato de magnesio	0	
Micronutrientes	0	

DEPÓSITO 2: Ácido fosfórico y fosfato monopotásico:

Condicionantes:

- Si $0 < [AF I] \geq [FM]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	$\text{Litros de Ácido fosfórico 75\%} = 0,0219 \cdot V$ $\text{kg de Ácido fosfórico 75\%} = 0,035 \cdot V$	2
Fosfato monopotásico	$\text{kg de Fosfato monopotásico} = \frac{0,0219 \cdot V \cdot [FM]}{[AF I]}$	

- Si $[FM] > [AF I]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	$\text{Litros de Ácido fosfórico 75\%} = \frac{0,025 \cdot V \cdot [AF I]}{[FM]}$ $\text{Kg de Ácido fosfórico 75\%} = \frac{0,025 \cdot V \cdot [AF \text{ kg}]}{[FM]}$	2
Fosfato monopotásico	$\text{Kg de Fosfato monopotásico} = 0,025 \cdot V$	

- Si $[AF I] = [FM] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 2 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	0	2
Fosfato monopotásico	0	

DEPÓSITO 3: Nitrato potásico y Nitrato amónico:

Condicionantes:

- Si $0 < [NP] \geq [NA]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato potásico	$\text{kg de Nitrato potásico} = 0,1 \cdot V$	3
Nitrato amónico	$\text{kg de Nitrato amónico} = \frac{0,1 \cdot V \cdot [NA]}{[NP]}$	

- Si $[NA] > [NP]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato potásico	$\text{kg de Nitrato potásico} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [NP]}{[NA]}$	3
Nitrato amónico	$\text{kg de Nitrato amónico} = 0,05 \cdot V$	

- Si $[NP] = [NA] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 3 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato potásico	0	3
Nitrato amónico	0	

DEPÓSITO 4: Sulfato potásico, sulfato de magnesio, cloruro sódico y ácido sulfúrico (en su caso):

Condiciones:

- Si $0 < [SP] \leq [SM]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	$\text{kg de Sulfato potásico} = 0,05 \cdot V$	4
Sulfato de magnesio	$\text{kg de Sulfato de magnesio} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [SM]}{[SP]}$	
Cloruro sódico	$\text{kg de Cloruro sódico} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [CS]}{[SP]}$	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [AS I]}{[SP]}$ $\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [AS kg]}{[SP]}$	

- Si $[SM] > [SP]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	$\text{kg de Sulfato potásico} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [SP]}{[SM]}$	4
Sulfato de magnesio	$\text{kg de Sulfato de magnesio} = 0,05 \cdot V$	
Cloruro sódico	$\text{kg de Cloruro sódico} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [CS]}{[SM]}$	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [AS I]}{[SM]}$ $\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [AS \text{ kg}]}{[SM]}$	

- Si $[SP] = [SM] = 0 < [CS]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	0	4
Sulfato de magnesio	0	
Cloruro sódico	$\text{kg de Cloruro sódico} = 0,1 \cdot V$	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,1 \cdot V \cdot [AS I]}{[CS]}$ $\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,1 \cdot V \cdot [AS \text{ kg}]}{[CS]}$	

- Si $[SP] = [SM] = [CS] = 0 < [AS I]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	0	4
Sulfato de magnesio	0	
Cloruro sódico	0	
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = 0,019 \cdot V$ $\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = 0,035 \cdot V$	

- Si $[SP] = [SM] = [CS] = [AS I] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 4 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	0	4
Sulfato de magnesio	0	
Cloruro sódico	0	
Ácido sulfúrico 98%	0	

CAMBIOS DE FERTILIZANTES DE DEPÓSITOS SEGÚN CIRCUNSTANCIAS

Condicionantes por orden de prioridad:

- Si DEPÓSITO 2, 3 ó 4 vacío (DEPÓSITO N1) y $[NC] + [NM] > 0 < [Mi]$. Entonces pasar Microelementos a DEPÓSITO N1.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Micronutrientes	Gramos de Micronutrientes = $5 \cdot V$	N1

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 4 vacío (DEPÓSITO N2) y $[NP] > 0 < [NA]$. Entonces pasar Nitrato amónico a DEPÓSITO N 2.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato amónico	kg de Nitrato amónico = $0,05 \cdot V$	N2

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 3 vacío (DEPÓSITO N3) y $[SP] > 0 < [SM]$. Entonces pasar Sulfato de magnesio a DEPÓSITO N3.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato de magnesio	kg de Sulfato de magnesio = $0,05 \cdot V$	N3

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 3 vacío (DEPÓSITO N4) y $[CS] > 0 = [SP]$ ó $[CS] > 0 = [SM]$. Entonces pasar Cloruro sódico a DEPÓSITO N4.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Cloruro sódico	kg de Cloruro sódico = $0,1 \cdot V$	N4

Notas:

- El tanque que contiene los micronutrientes (1 ó N1, en su caso) debería acidificarse adicionando las cantidades de ácido siguientes:
 - Si se emplea ácido nítrico 56-60% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0787 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,1054 \cdot V \text{ gramos}$
 - Si se emplea ácido sulfúrico 98% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0266 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,049 \cdot V \text{ gramos}$
- Los aportes de ácido previsto (apartado anterior) se aportarán en un quinto depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal.
- Sólo aparecerán en pantalla aquellos fertilizantes que se aporten en cierta cantidad, cuando la adición de alguno de ellos sea nula, se suprimirá la fila correspondiente en pantalla.

Hasta ocho tanques + ácido

Se entiende por 8 tanques + ácido aquella instalación donde se utilicen 8 tanques o depósitos de disoluciones madres concentradas donde se separen fertilizantes a utilizar, además de otro depósito donde se disponga el ácido elegido para el ajuste del pH.

Previamente se habrá establecido en la pantalla inicial (pantalla A), el volumen de los depósitos de disoluciones madre.

ORDENACIÓN DE LOS FERTILIZANTES POR DEPÓSITOS Y CANTIDADES DE APORTE

Depósitos con un solo fertilizante:

Volumen de llenado de depósitos de disoluciones madre concentradas (L) = V

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Nitrato cálcico	kg de Nitrato cálcico = $0,1 \cdot V$	1
Nitrato potásico	kg de Nitrato potásico = $0,1 \cdot V$	3
Micronutrientes	Gramos de Micronutrientes = $5 \cdot V$	4
Nitrato amónico	kg de Nitrato amónico = $0,05 \cdot V$	6
Nitrato de magnesio	kg de Nitrato de magnesio = $0,1 \cdot V$	7

DEPÓSITO 2: Ácido fosfórico y fosfato monopotásico:

Condiciones:

- Si $0 < [AF I] \geq [FM]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	Litros de Ácido fosfórico 75% = $0,0219 \cdot V$ kg de Ácido fosfórico 75% = $0,035 \cdot V$	2
Fosfato monopotásico	$0,0219 \cdot V \cdot [FM]$ kg de Fosfato monopotásico = $\frac{[AF I]}{[AF I]}$	

- Si $[FM] > [AF I]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	$0,025 \cdot V \cdot [AF I]$ Litros de Ácido fosfórico 75% = $\frac{[FM]}{[FM]}$ $0,025 \cdot V \cdot [AF \text{ kg}]$ kg de Ácido fosfórico 75% = $\frac{[FM]}{[FM]}$	2
Fosfato monopotásico	kg de Fosfato monopotásico = $0,025 \cdot V$	

- Si $[AF I] = [FM] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 2 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Ácido fosfórico 75%	0	2
Fosfato monopotásico	0	

DEPÓSITO 5: Sulfato potásico y Sulfato de magnesio:

Condiciones:

- Si $0 < [SP] \geq [SM]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	kg de Sulfato potásico = $0,05 \cdot V$	5
Sulfato de magnesio	$0,05 \cdot V \cdot [SM]$ kg de Sulfato de magnesio = $\frac{[SP]}{[SP]}$	

- Si $[SM] > [SP]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	$\text{kg de Sulfato potásico} = \frac{0,05 \cdot V \cdot [SP]}{[SM]}$	5
Sulfato de magnesio	$\text{kg de Sulfato de magnesio} = 0,05 \cdot V$	

- Si $[SP] = [SM] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 5 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato potásico	0	5
Sulfato de magnesio	0	

DEPÓSITO 8: Cloruro sódico y Ácido sulfúrico (en su caso):

Condicionantes:

- Si $[CS] > 0$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Cloruro sódico	$\text{kg de Cloruro sódico} = 0,1 \cdot V$	8
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,1 \cdot V \cdot [AS I]}{[CS]}$	
	$\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = \frac{0,1 \cdot V \cdot [AS \text{ kg}]}{[CS]}$	

- Si $[CS] = 0 < [AS I]$

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Cloruro sódico	0	8
Ácido sulfúrico 98%	$\text{Litros de Ácido sulfúrico 98\%} = 0,019 \cdot V$ $\text{kg de Ácido sulfúrico 98\%} = 0,035 \cdot V$	

- Si $[CS] = [AS I] = 0 \Rightarrow$ DEPÓSITO 8 vacío

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Cloruro sódico	0	8
Ácido sulfúrico 98%	0	

CAMBIO DE FERTILIZANTES DE DEPÓSITOS SEGÚN CIRCUNSTANCIAS

Condicionantes por orden de prioridad:

- a. Si DEPÓSITO 1, 2, 3, 4, 6, 7 ó 8 vacío (DEPÓSITO N1) y $[SP] > 0 < [SM]$. Entonces pasar Sulfato de magnesio a DEPÓSITO N1.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Sulfato de magnesio	kg de Sulfato de magnesio = $0,05 \cdot V$	N1

- b. Si DEPÓSITO 1, 3, 4, 5, 6, 7 ó 8 vacío (DEPÓSITO N2) y $[AF I] > 0 < [FM]$. Entonces pasar Fosfato monopotásico a DEPÓSITO N 2.

Fertilizantes	Cantidad a aportar	Depósito
Fosfato monopotásico	kg de Fosfato monopotásico = $0,025 \cdot V$	N2

Notas:

- El tanque que contiene los micronutrientes (4) debería acidificarse adicionando las cantidades de ácido siguientes:
 - Si se emplea ácido nítrico 56-60% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0787 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,1054 \cdot V \text{ gramos}$
 - Si se emplea ácido sulfúrico 98% para el ajuste del pH, añadir:
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,0266 \cdot V \text{ cm}^3$
 - ✓ $\cdot [2 \cdot Cs + Hs - 0,3] \cdot 0,049 \cdot V \text{ gramos}$
- Los aportes de ácido previsto (apartado anterior) se aportarán en un noveno depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal.
- Sólo aparecerán en pantalla aquellos fertilizantes que se aporten en cierta cantidad, cuando la adición de alguno de ellos sea nula, se suprimirá la fila correspondiente en pantalla.

Porcentaje de inyección de los depósitos de disoluciones madre

Disolución nutritiva directa

No existen porcentajes de inyección a programar en el equipo, ya que se alimenta de un solo depósito o embalse de dimensiones acordes con la superficie cultivada.

A + B + ácido

Las cantidades de los fertilizantes (apartado anterior) distribuidas en cada uno de los dos tanques (A y B), están proporcionadas de acuerdo con los cálculos del software, de este modo:

Depósito	% de inyección en la programación de la fertirrigación
A	50%
B	50%

Tres tanques + ácido

Las cantidades de los fertilizantes (apartado anterior) distribuidas en cada uno de los dos tanques (1, 2 y 3), están proporcionadas de acuerdo con los cálculos del software, de este modo:

Depósito	% de inyección en la programación de la fertirrigación
1	33.4 %
2	33.3 %
3	33.3 %

Cuatro tanques + ácido

Se utilizan los mismos condicionantes que en el apartado anterior.

DEPÓSITO 1

- Si $0 < [NC] \geq [NM] \Rightarrow w = 10 \cdot [NC]$
- Si $[NM] > [NC] \Rightarrow w = 10 \cdot [NM]$
- Si $[NM] = [NC] = 0 < [Mi] \Rightarrow w = 0,2 \cdot [Mi]$
- Si $[NC] = [NM] = [Mi] = 0 \Rightarrow w = 0$

DEPÓSITO 2

- Si $0 < [AF I] \geq [FM] \Rightarrow x = 45,66 \cdot [AF I]$
- Si $[FM] > [AF I] \Rightarrow x = 40 \cdot [FM]$
- Si $[AF I] = [FM] = 0 \Rightarrow x = 0$

DEPÓSITO 3

- Si $0 < [NP] \geq [NA] \Rightarrow y = 10 \cdot [NP]$
- Si $[NA] > [NP] \Rightarrow y = 20 \cdot [NA]$
- Si $[NP] = [NA] = 0 \Rightarrow y = 0$

DEPÓSITO 4

- Si $0 < [SP] \geq [SM] \Rightarrow z = 20 \cdot [SP]$
- Si $[SM] > [SP] \Rightarrow z = 20 \cdot [SM]$
- Si $[SP] = [SM] = 0 < [CS] \Rightarrow z = 10 \cdot [CS]$
- Si $[SP] = [SM] = [CS] = 0 < [AS I] \Rightarrow z = 52,63 \cdot [AS I]$
- Si $[SP] = [SM] = [CS] = [AS I] = 0 \Rightarrow z = 0$

CAMBIOS DE FERTILIZANTES DE DEPÓSITOS SEGÚN CIRCUNSTANCIAS

Se utilizan los mismos condicionantes que en el apartado, por orden de prioridad:

- Si DEPÓSITO 2, 3 ó 4 vacío (DEPÓSITO N1) y $[NC]+[NM] > 0 < [Mi]$. Entonces:

$$x = 0,2 \cdot [Mi] \text{ si depósito 2 vacío}$$

$$y = 0,2 \cdot [Mi] \text{ si depósito 3 vacío}$$

$$z = 0,2 \cdot [Mi] \text{ si depósito 4 vacío}$$

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 4 vacío (DEPÓSITO N2) y $[NP] > 0 < [NA]$. Entonces:

$$w = 20 \cdot [NA] \text{ si depósito 1 vacío}$$

$$x = 20 \cdot [NA] \text{ si depósito 2 vacío}$$

$$z = 20 \cdot [NA] \text{ si depósito 4 vacío}$$

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 3 vacío (DEPÓSITO N3) y $[SP] > 0 < [SM]$. Entonces:

$$w = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 1 vacío}$$

$$x = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 2 vacío}$$

$$y = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 3 vacío}$$

- Si DEPÓSITO 1, 2 ó 3 vacío (DEPÓSITO N4) y $[CS] > 0 = [SP]$ ó $[CS] > 0 = [SM]$. Entonces:

$$w = 10 \cdot [CS] \text{ si depósito 1 vacío}$$

$$x = 10 \cdot [CS] \text{ si depósito 2 vacío}$$

$$y = 10 \cdot [CS] \text{ si depósito 3 vacío}$$

CÁLCULO DE LOS PORCENTAJES DE INYECCIÓN

Depósito	% de inyección en la programación de la fertirrigación
1	% Depósito 1 = $100 \cdot w/(w+x+y+z)$
2	% Depósito 2 = $100 \cdot x/(w+x+y+z)$
3	% Depósito 3 = $100 \cdot y/(w+x+y+z)$
4	% Depósito 4 = $100 \cdot z/(w+x+y+z)$

Nota:

- Los aportes de ácido previsto (vistos en apartados anteriores) que se aportarán en un quinto depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal, no entran en el porcentaje de inyección de los depósitos de disoluciones madre, se regulan independientemente según la lectura de la sonda de pH.

Ocho tanques + ácido

Se utilizan los mismos condicionantes que en el apartado anterior.

DEPÓSITO 1: $s = 10 \cdot [NC]$
DEPÓSITO 3: $u = 10 \cdot [NP]$
DEPÓSITO 4: $v = 0,2 \cdot [Mi]$
DEPÓSITO 6: $x = 20 \cdot [NA]$
DEPÓSITO 7: $y = 10 \cdot [NM]$
DEPÓSITO 2:

- Si $0 < [AF I] \geq [FM] \Rightarrow t = 45,66 \cdot [AF I]$
- Si $[FM] > [AF I] \Rightarrow t = 40 \cdot [FM]$
- Si $[AF I] = [FM] = 0 \Rightarrow t = 0$

DEPÓSITO 5:

- Si $0 < [SP] \geq [SM] \Rightarrow w = 20 \cdot [SP]$
- Si $[SM] > [SP] \Rightarrow w = 20 \cdot [SM]$
- Si $[SP] = [SM] = 0 \Rightarrow w = 0$

DEPÓSITO 8:

- Si $[CS] > 0 \Rightarrow z = 10 \cdot [CS]$
- Si $[CS] = 0 < [AS I] \Rightarrow z = 52,63 \cdot [AS I]$
- Si $[CS] = [AS I] = 0 \Rightarrow z = 0$

CAMBIOS DE FERTILIZANTES DE DEPÓSITOS SEGÚN CIRCUNSTANCIAS

Se utilizan los mismos condicionantes que en el apartado, por orden de prioridad:

- Si DEPÓSITO 1, 2, 3, 4, 6, 7 ó 8 vacío (DEPÓSITO N1) y $[SP] > 0 < [SM]$. Entonces:

$s = 20 \cdot [SM]$ si depósito 1 vacío
 $t = 20 \cdot [SM]$ si depósito 2 vacío
 $u = 20 \cdot [SM]$ si depósito 3 vacío
 $v = 20 \cdot [SM]$ si depósito 4 vacío

$$x = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 6 vacío}$$

$$y = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 7 vacío}$$

$$z = 20 \cdot [SM] \text{ si depósito 8 vacío}$$

- Si DEPÓSITO 1, 3, 4, 5, 6, 7 ó 8 vacío (DEPÓSITO N2) y $[AF\ I] > 0 < [FM]$. Entonces:

$$s = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 1 vacío}$$

$$u = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 3 vacío}$$

$$v = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 4 vacío}$$

$$w = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 5 vacío}$$

$$x = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 6 vacío}$$

$$y = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 7 vacío}$$

$$z = 40 \cdot [FM] \text{ si depósito 8 vacío}$$

CÁLCULO DE LOS PORCENTAJES DE INYECCIÓN

Depósito	% de inyección en la programación de la fertirrigación
1	% Depósito 1 = $100 \cdot s / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
2	% Depósito 2 = $100 \cdot t / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
3	% Depósito 3 = $100 \cdot u / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
4	% Depósito 4 = $100 \cdot v / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
5	% Depósito 5 = $100 \cdot w / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
6	% Depósito 6 = $100 \cdot x / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
7	% Depósito 7 = $100 \cdot y / (s+t+u+v+w+x+y+z)$
8	% Depósito 8 = $100 \cdot z / (s+t+u+v+w+x+y+z)$

Nota:

- Los aportes de ácido previsto (vistos en apartados anteriores) que se aportarán en un noveno depósito concentrados al 10-20% hasta ajuste de la disolución nutritiva al pH ideal, no entran en el porcentaje de inyección de los depósitos de disoluciones madre, se regulan independientemente según la lectura de la sonda de pH.

3.2.2.6. CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE DRENAJE IDÓNEO

Disolución nutritiva inicial o de partida

- Sistemas a solución perdida con sustratos tipo A:

$$\%D = CE_s \cdot 20 / CE_{ref} \quad \%D_{m\acute{a}x} = 60\% \quad \%D_{m\acute{i}n} = 15\%$$

- Sistemas a solución perdida con sustratos tipo B:

$$\%D = CE_s \cdot 15 / CE_{ref} \quad \%D_{m\acute{a}x} = 50\% \quad \%D_{m\acute{i}n} = 15\%$$

- Sistemas con recirculación de drenajes:

$$\%D = CE_s \cdot 30/CE_{ref} \quad \%D_{m\acute{a}x} = 60\% \quad \%D_{m\acute{i}n} = 15\%$$

Además, si:

$$M_{gs} > M_{gex} \text{ ó } S_s > S_{ex} \text{ ó } C_{ls} > C_{lex} \text{ ó } N_{as} > N_{aex} \text{ ó } B_s > B_{ex} \Rightarrow \%D = 60\%$$

Disoluciones nutritivas a lo largo del ciclo de cultivo

Condicionantes:

- $1,90 \cdot CE_{ref} \cdot CE_w/CE_{ex} \leq CE_d \leq 2,10 \cdot CE_{ref} \cdot CE_w/CE_{ex} \Rightarrow \%D = \%D_d$
- $CE_d < 1,90 \cdot CE_{ref} \cdot CE_w/CE_{ex} \Rightarrow \%D = \%D_d - 4 \cdot (CE_{ref} \cdot CE_w)/(CE_{ex} \cdot CE_d)$

$$\%D_{m\acute{i}n} = 10\%$$

- $CE_d > 2,10 \cdot CE_{ref} \cdot CE_w/CE_{ex} \Rightarrow \%D = \%D_d + 4 \cdot (CE_{ex} \cdot CE_d)/(CE_{ref} \cdot CE_w)$

$$\%D_{m\acute{a}x} = 50\%$$

Además, si:

$$M_{gd} > 2M_{gex} \text{ ó } S_d > 2S_{ex} \text{ ó } C_{ld} > 2C_{lex} \text{ ó } N_{ad} > 2N_{aex} \text{ ó } B_d > 2B_{ex} \Rightarrow \%D = 60\%$$

Para todas las situaciones (medio líquido)

- Si Sustrato = Medio Líquido $\Rightarrow$ Se inhabilita la ventana %D (carece de sentido el concepto porcentaje drenado)

3.2.2.7. CÁLCULO DE LA DOSIS DE RIEGO

El cálculo de la dosis de riego no es indispensable para la ejecución del programa, simplemente es un dato ofrecido al usuario si este lo requiere. Para su obtención, previamente se habrán establecido en la pantalla inicial (pantalla A), una serie de datos para este cálculo.

- Volumen de sustrato por planta (L): SP
- Caudal de los emisores (L/h): CEM

- Número de emisores por planta: EP

De esta forma, el cálculo de la dosis de riego en minutos para la programación de la fertirrigación, vendrá dado por la fórmula siguiente, queda claro que la frecuencia de los riegos deberá establecerse por algún método de riego por demanda:

$$\text{DOSIS DE RIEGO (minutos)} = [\text{SP} \cdot \text{AU}/100 \cdot (1 + \%D/100) \cdot \text{NA}] / [\text{EP} \cdot \text{CEM}/60]$$

Siendo AU un factor que depende del sustrato empleado según se especifica en la tabla siguiente:

Sustrato	% Agua útil (AU)
Lana de roca	75
Perlita B-12	35
Arena	20
Fibra de coco	28
Turba rubia	33
Otros	Introducido en pantalla inicial

Y siendo NA un factor que depende de la climatología prevista según se especifica en la tabla siguiente y que define el nivel de agotamiento de agua útil requerido para la ejecución de un riego (4-8%):

Climatología prevista		
Clima	Época	Nivel de agotamiento de agua útil (NA)
Ecuatorial	-	0,065
Tropical	Seca	0,04
	Media	0,05
	Lluviosa	0,065
Mediterráneo	Cálida	0,04
	Media	0,06
	Fría	0,08
Continental	Cálida	0,05
	Media	0,06
	Fría	0,07
Oceánico	Cálida	0,05
	Media	0,065
	Fría	0,08
Desértico	Cálida	0,04
	Media	0,05
	Fría	0,065

Nota:

- Si Sustrato = Medio Líquido $\Rightarrow$ Se inhabilita la ventana Dosis de riego (carece de sentido el concepto dosis de riego).

3.3. ESTUDIO DE LA NUTRICIÓN CÁLCICA EN MELÓN

La aplicación informática así diseñada y programada bajo lenguaje Borland C++, fue entregada a diferentes agricultores con una amplia gama de cultivos y escenarios para su comprobación. El programa tuvo un éxito rotundo y resultó una herramienta muy útil para el manejo de los cultivos sin suelo, otra cuestión fue la decisión de no comercializarlo por motivos de intereses empresariales.

Todo el mundo coincidió en su valía, pero surgieron algunas discrepancias en cuanto al manejo de la nutrición cálcica, y con muy diversos puntos de vista (niveles, materiales de aporte, interacciones, influencia climática, nuevos productos para su suministro como los quelatos EDTA-Ca, su distribución en planta y fruto, etc.). Esto nos llevó a profundizar más en el estudio del manejo práctico del suministro de calcio, su comportamiento fisiológico y su dependencia de multitud de factores que a veces escapan al propio control nutricional del cultivo, tal y como ha quedado expuesto en la revisión bibliográfica de la introducción.

En este sentido se plantearon y llevaron a cabo diversos ensayos para el estudio de la nutrición en cálcica en un cultivo de melón típicamente de exportación, donde las consecuencias de un deterioro de calidad en destino, pueden ser muy importantes.

A continuación, se presentan diferentes artículos que resumen fielmente los trabajos llevados a cabo y las conclusiones extraídas de los mismos.

3.3.1. CALCIUM FORMS IN LEAVES OF MUSKMELONS (cv. REVIGAL) PLANTS TESTED WITH DIFFERENT CALCIUM COMPOUNDS

AUTORES: ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; ROMOJARO, F. & MOLINA, E.

TÍTULO: Calcium forms in leaves of muskmelons (cv. Revigal) plants tested with different calcium compounds.

CLAVE: A FECHA: 1998

REF. REVISTA: Journal of Plant Nutrition, 21(9): 1897-1912.

Abstrac

The time course trend of the various calcium (Ca) forms (soluble, bound, inorganic insoluble and organic insoluble) was studied throughout the growing period in mature and young leaves of *Cucumis melo* L. cv. Revigal plants cultivated on rockwool under unfavorable conditions for Ca uptake. The following anions accompanying Ca were tested: NO_3^- as control, as well as EDTA^{2-} , Cl^- and SO_4^{2-} with two concentration levels equivalent to half and a quarter part of calcium level in control. The differences between mature and young leaves are very marked for all the forms. Generally, the inorganic insoluble Ca form was predominant in mature leaves, while the bound form showed the lowest levels. In young leaves, on the other hand, soluble Ca was usually the major form, whereas organic insoluble Ca was the least plentiful. The treatments with Ca-EDTA ($\text{Ch}-\frac{1}{2}$ and $\text{Ch}-\frac{1}{4}$) resulted in lower leaf Ca concentration than the

other treatments. The ratios referring to the Ca contents of mature leaves/young leaves for the six Ca-deficiency treatments varied from 5,0 to 18,5 (soluble Ca); 3,8 to 11,0 (bound Ca); 9,0 to 41,7 (inorganic insoluble Ca) and 9,0 to 47,7 (organic insoluble Ca). For the control, these ratios were 2,3 (soluble Ca); 1,6 (bound Ca); 22,3 (inorganic insoluble Ca) and 61,5 (organic insoluble Ca). The insoluble forms always showed higher ratios. For all treatments and sampling dates the total Ca level was approximately ten times higher in mature leaves than in young leaves and always in the following order: $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- \cdot \frac{1}{2} \approx \text{SO}_4^{2-} \cdot \frac{1}{2} > \text{Cl}^- \cdot \frac{1}{4} \approx \text{SO}_4^{2-} \cdot \frac{1}{4} > \text{Ch} \cdot \frac{1}{2} > \text{Ch} \cdot \frac{1}{4}$, which was the same order observed in the response as reflected by fruit and vegetative biomass production.

Introduction

Muskmelon (*Cucumis melo* L.) has been described by several authors as moderately salt-tolerant (Shmueli and Goldberg, 1971; Nukaya *et al.*, 1980; Meiri and Plaut, 1981; Medlinger and Pasternak, 1992; Franco *et al.*, 1993) and proposed as a potential crop in areas with important soil salinization problems such as Israel and southeastern Spain (Goldberg *et al.*, 1971; Shannon and Francois, 1978).

Calcium uptake through the roots is influenced by the salt concentration of the soil solution, especially sodium (Na) (Cramer *et al.*, 1989), the concentration of antagonistic cations rapidly taken up by the roots (K^+ , NH_4^+ , H^+ or Al^{3+}) (Baligar *et al.*, 1987) and by factors affecting plant transpiration (Wiersum, 1979a) such as temperature and hydric state of the substrate, root vigor, and humidity (Tromp and Van Vuure, 1993). The Ca^{2+} can protect plant cells from adverse effects induced by NaCl stress and improve the growth of plants under saline conditions (LaHaye and Epstein, 1971; Cramer *et al.*, 1990; Cachorro *et al.*, 1994; Colmer *et al.*, 1996). Once Ca is incorporated into the sap, it is preferentially directed to the parts of the plant that show the greatest transpiration. Therefore, when transpiration is intense and Ca uptake insufficient the organs with the least degree of transpiration show a localized deficiency since Ca is hardly transported by the phloem and is almost exclusively distributed through the plant by means of the xylem (Hill, 1980). This results in local and seasonal deficiencies, which cause the appearance of nutritional disorders. Rather than to low absorption, this is due to the limited capability of plants to regulate the internal distribution of Ca in accordance with the demand of the organs showing low transpiration rates such as fast growing leaves, tubers, fruits, inner leaves, etc. (Baugerth, 1979; Kirkby and Pilbeam, 1984). When transpiration is low, flow in the xylem depends mainly on root pressure. For this reason, Ca transport falls in saline solutions with a high osmotic pressure causing several nutritional disorders (Palzkill *et al.*, 1976; Bradfield and Guttridge, 1984). Thus, to increase the Ca content of fruits, an increase in the transpiration rate may be more effective than increasing the Ca levels of the nutrient solution (Marschner, 1983).

A knowledge of the chemical forms of each element in the plant may be a useful tool for studying the mineral nutrition of plants, because of the information this provides on the use to which absorbed ions are put and their metabolic pathway. Chemically, the above is reflected in a series of metabolic reactions of nutrient integration into increasingly complicated organic structures, as is the case with nitrogen (N) or certain processes may form compounds of a diverse chemical nature but which become increasingly insoluble as in the case of Ca (Carpenna

et al., 1973). A leaf's age or the situation of a foliole in a leaf, as well as physiological changes produced by nutritional disorders or the application of fertilizers (Valenzuela *et al.*, 1992) affect the ionic composition of tissues. Calcium appears in plants in different forms: Soluble Ca^{2+} associated with anions such as malate or nitrate; Ca in the form of pectates bound to carboxylic, phosphorylic or phenolic hydroxyl groups; or Ca precipitated as carbonates, phosphates, and oxalates. These compounds normally appear as deposits in vacuoles and mitochondria, although in seeds Ca mainly appears as phytate (Mengel and Kirkby, 1987). The ionic composition of different plant organs in relation to particular Ca forms is closely related to physiological processes such as uptake, transport, storage, and metabolism. In all these processes, the influence of the cultivation medium and genetic specificity is the determining factor (Mengel and Kirkby, 1987). The photosynthetic capacity of a certain organ may involve the accumulation of Ca in its organic insoluble and soluble forms, which may be used as a reference for metabolic activity (Carpena *et al.*, 1973). When the organ, either because of its nature or its incipient growth shows heterotrophic needs, bound and inorganic insoluble forms predominate in this organ and these seem to involve intermediate compounds of Ca metabolism. On the other hand, soluble and organic insoluble forms, which are of an accumulative nature, appear and increase depending on the synthesizing capability of the organ, that is to say on its autotrophic character (Carpena *et al.*, 1973). Therefore, any nutritional disorder that involves a decrease in the leaf's synthetic capacity will result in lower levels of organic insoluble Ca being accumulated in leaves.

In muskmelon plants grown in soil under greenhouse conditions, Valenzuela *et al.* (1994) observed that the greatest concentration of total Ca in leaves occurred in the treatments which showed a higher level of Ca as oxalate (almost 60% of total Ca), this form perhaps playing an osmoregulatory role under saline conditions and with high nitrate levels. Calcium oxalate, which is poorly soluble, is accumulated in the vacuoles of plants fertilized with nitrate, but does not increase the osmotic pressure (Osmond, 1967; Kirkby and Pilbeam, 1984).

The objectives of the present work are to study the influence of different Ca compounds on Ca uptake and distribution of the different Ca forms (soluble, bound, inorganic insoluble, and organic insoluble) through the plant under adverse conditions, such as high Na and magnesium (Mg) levels, relatively low levels of Ca in the nutrient solution and reduced light intensity and temperature. These conditions are common in southeastern Spain, where low quality, highly saline irrigation waters are used during the autumn-winter months to grow melon fruits outside their normal season, even though their quality may be diminished by nutritional disorders.

Materials and methods

Experimental design

The experiment was carried out in a polycarbonate greenhouse (10x20 m²) in the University of Murcia (Spain), using information from a preliminary experiment carried out in 1994 with the same crop (*Cucumis melo* L. cv. Revigal). Fourteen rows with 10 plants per row made up seven sectors (two rows each), and each sector was divided into four replication plots (five plants per plot). Each sector (benches 0,5x1,2x10 m) had an independent system composed of a 60 L automatically-stirred tank containing the nutrient solution, electro valves, filters, polyethylene

tubes (25 mm Ø) for nutrient solution distribution, tubes (14 mm Ø) with selfcompensating emitters (2 L h^{-1}) and 10 substrate support trays with drainage exit. The temperature and relative humidity regimes in the greenhouse were controlled by automatic heating, ventilation through zenithal openings and refrigeration through a cooling system, all of which were controlled by means of an adjustable thermostat. The relative humidity was maintained at 65-85%, the temperature interval was 15-30°C during the day and above 8°C during the night.

Irrigation water

The irrigation water used was decalcified to below 0,01 mM of Ca and Mg. These elements were substituted by Na, the excess of which has a negative influence upon Ca uptake. The analytical characteristics of the irrigation water were: pH 8,21; electrical conductivity (EC) $1,68 \text{ dSm}^{-1}$ at 25°C; HCO_3^- 3,54 mM; Cl^- 4,87mM; SO_4^{2-} 3,88 mM; Ca^{+2} 0,01 mM; Mg^{+2} 0,01 mM; K^+ 0,06 mM; Na^+ 16,07 mM and B 0,16 mg L^{-1} . All other nutrients existed in negligible quantities.

Cultivation

The seeds were sown on September 21, 1994, the plants were transplanted on October 13, 1994, and the crop was regarded as finished on February 2, 1995 after 116 days. The sowing was made on plugs of rockwool (7x7x7 cm), and the plants remained in the seed plot until they had two or three true leaves. The plugs were placed directly on the substrate, through which the nutrient solution was discontinuously percolated with no recirculation of the solution. The crop was grown in autumn-winter, which is an unfavorable period for Ca uptake due to low light conditions and temperatures and aggravated by the high Na levels in the nutrient solution.

Each tray contained a block of rockwool (100x20x10 cm) wrapped in white plastic, on which two muskmelon (*Cucumis melo* cv. Revigal) plants were transplanted. These were vertically supported by plastic mesh (opening 15x15 cm) with upper tensors at a height of 1,8 m. Daily records were kept of the temperature, relative humidity, EC and pH of the nutrient and drainage solutions as well as of the drainage percentage.

Fertigation and deficiencies

The cultivation sectors were distributed and fertigated as follows: Sector 1 (NO_3^-) control test. Calcium was supplied in the form of 2-4 mM $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ in a nutrient solution suited to the crop. The solution was adjusted according to the phenological stage of the plants and the composition of nutrient and drainage solutions which were analyzed every fortnight. The composition of the starting nutrient solution in the control were: HCO_3^- 0,50 mM; Cl^- 4,87 mM; SO_4^{2-} 7,67 mM; NO_3^- 12,61 mM; H_2PO_4^- 1,52 mM; Ca^{+2} 3,91 mM; Mg^{+2} 1,37mM; K^+ 6,83 mM; Na^+ 16,07 mM; NH_4^+ 1,40 mM and 0,025 g L^{-1} of the micronutrients complex (7,5% Fe; 3,30% Mn; 0,60% Zn; 0,27% Cu; 0,65% B and 0,20% Mo). The irrigation supply was automatically regulated by a demand irrigation tray installed in this sector with two height-adjustable electrodes located in the lower part of the tray, initiating and terminating the irrigation according to the transpiration rate of the plants. Such a system made it possible to set the most suitable drainage percentage while at the same time the device governed all the sectors according to the control's response. Since the control showed a greater degree of vegetative development

than the other treatments with a corresponding greater demand for water, all the other sectors had drainage percentages above the optimum.

Sector 2 ($\text{Ch}^{-1/2}$) received chelated Ca as Ca-EDTA in a quantity equivalent to half the level of the Ca in the control (NO_3^-). To compensate for nitrate, $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ was added. This relative excess of Mg may have contributed to the signs of Ca deficiency observed since Ca^{+2} and Mg^{+2} are antagonistic. Sector 3 ($\text{Ch}^{-1/4}$), as above, but with Ca-EDTA corresponding to one quarter of the Ca in the control (NO_3^-).

Sectors 4 ($\text{Cl}^{-1/2}$) and 5 ($\text{Cl}^{-1/4}$) had supplied in the form of CaCl_2 equivalent to one half and one quarter of the control, respectively.

Sectors 6 ($\text{SO}_4^{-2-1/2}$) and 7 ($\text{SO}_4^{-2-1/4}$) had Ca added as CaSO_4 , equivalent to one half and one quarter of the concentration in the control, respectively.

From the outset of the experiment, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ was substituted by different Ca compounds and NO_3^- was compensated with $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ in sectors 2 to 7.

Samplings

Fortnightly samples were taken for analysis of the nutrient solution and the accumulated drainage solution in each sector, and the composition of the nutrient solution was adjusted accordingly.

Leaf samples were taken from each replication plot in each sector, coinciding with the following stages of cultivation: End of flowering (30 days after transplanting); end of fruit set (50 days); maximum growth (swelling) of fruits (73 days); and maturity of the first fruits (94 days). In each sampling, completely developed mature leaves were taken from the basal part of the plants (nutrient reservoirs and consequently suppliers) and young growing leaves from the tip of the stems (nutrient receptors).

Determination of calcium forms

To determine different forms of Ca, we followed the technique proposed by Carpena *et al.* (1972). The leaves were dried at 70°C for 24 hours, then ground and placed for 24 hours in a stove at 105°C for complete elimination of humidity.

Successive extractions then separated four Ca forms of increasing degrees of insolubility. Using a relation of 1:30 between sample and extractant, water, 2M Na nitrate, 10% acetic acid, or 2M hydrochloric acid, respectively, was used to extract soluble Ca, bound Ca (mainly Ca forming pectates and carbonates), inorganic insoluble Ca (mainly phosphates), and organic insoluble Ca (as oxalate) (Carpena *et al.*, 1973; Minamide *et al.*, 1986; Valenzuela *et al.*, 1994). Calcium in the extracts was determined by atomic absorption spectroscopy and the values for each sample were obtained by means of at least three analytical replications.

Results and discussion

Table 29 shows the actual concentration of Ca in the nutrient solutions taken from the emitters in the seven treatments during the cultivation period (116 days).

Table 29. Calcium (mM) in the nutrient solutions for the seven treatments during the cultivation period.

Days*	NO ₃ ⁻	Ch-½	Ch-¼	Cl ⁻ -½	Cl ⁻ -¼	SO ₄ ⁻² -½	SO ₄ ⁻² -¼
0-14	3,91	2,09	1,04	1,83	0,99	2,06	1,04
15-29	2,84	1,55	0,76	1,38	0,69	1,48	0,76
30-44	3,08	1,63	0,82	1,46	0,73	1,57	0,78
45-58	2,95	1,62	0,82	1,44	0,77	1,61	0,82
59-72	3,29	1,70	0,83	1,54	0,80	1,77	0,89
73-89	2,98	1,53	0,78	1,54	0,77	1,59	0,82
90-104	2,62	1,41	0,72	1,28	0,65	1,39	0,71
105-116	2,20	1,26	0,59	1,11	0,54	1,18	0,61

* Days from transplanting onwards

Figure 40 shows the evolution for the control of the four forms of Ca in leaves as a function of time from transplanting. The differences in concentration between mature and young leaves were substantial; the inorganic insoluble form of Ca was the main form in mature leaves and the bound form the least abundant. In young leaves, soluble Ca was the main form and organic insoluble the minority form. The ratios of the Ca contents (mature leaves/young leaves) were 2,3 (soluble Ca); 1,6 (bound Ca); 22,3 (inorganic insoluble Ca), and 61,5 (organic insoluble Ca), that is to say, much higher for the insoluble forms.

These data clearly show the difficulty of Ca⁺² redistribution inside the plant, especially under limiting conditions, so that growing organs such as young leaves which have a high demand for Ca to form the cell walls of the tissues, have deficient levels since this element is being accumulated in other parts of the plant (mature leaves).

Figure 41 shows the evolution of the soluble Ca content in leaves for the six treatments with chelate, chloride, and sulphate, and two deficient levels of Ca in the nutrient solution. Soluble Ca was higher in mature leaves and in the ½ Ca treatments; in general levels decreased rapidly (60-80 days after transplanting) and then stabilized. In mature leaves, soluble Ca levels were higher at the beginning (30-50 days) in treatments with a lower supply of Ca in the treatments with chloride and sulphate salts. Treatments with chelate led to lower levels of soluble Ca being observed in young leaves than in treatments in which Ca was supplied in the form of chloride or sulphate, whereas no appreciable differences among the three salts were observed in the mature leaves. The levels of soluble Ca in both kinds of leaves after treatment with chloride and sulphate did not differ significantly except that sulphate treatment led to slightly higher values in young leaves after the levels had stabilized during the last period of sampling. The ratios of the soluble Ca contents (mature leaves/young leaves) for the six treatments deficient in Ca varied from 10,2 to 18,5 (Ca-EDTA); 5,0 to 12,7 (CaCl₂), and 5,2 to 9,6 (CaSO₄); in all cases the lower ratio refers to ½ Ca treatments.

Figure 40. Changes with time in different calcium forms in mature and young leaves of the control fertilized with $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$. Bars indicate the standard deviation among four replications carried out for each sector and sampling date.

Figure 41. Time course of changes of soluble calcium concentration in mature and young leaves for six treatments deficient in calcium, involving Ca-EDTA , CaCl_2 and CaSO_4 , each at two calcium concentrations. Bars indicate the standard deviation among four replications carried out for each sector and sampling date.

In mature leaves, the time-course of changes in bound-Ca concentration was similar to that of soluble Ca, although the actual levels of Ca were two or three times lower in all treatments (figure 42). In young leaves, the treatments with the lowest concentration of Ca ($\frac{1}{4}$ Ca) gave rise to values approximately half those of treatments $\frac{1}{2}$ Ca throughout the cultivation period; the bound-Ca concentration was greater at the beginning (30 days after transplanting), and the minimum value was reached 50 days after transplanting, coinciding with the end of fruit setting. It then increased while the fruit swelled and fell slightly near maturity. The ratios of the bound-Ca contents (mature leaves/young leaves) for the six treatments deficient in Ca varied from 4,7 to 11,0 (Ca-EDTA); 4,2 to 8,5 (CaCl₂) and 3,8 to 7,4 (CaSO₄); in all cases the lower ratio refers to $\frac{1}{2}$ Ca treatments.

Figure 42. Time course of changes of bound calcium concentration in mature and young leaves for six treatments deficient in calcium, involving Ca-EDTA, CaCl₂ and CaSO₄ each at two calcium concentrations. Bars indicate the standard deviation among four replications carried out for each sector and sampling date.

Concentrations of inorganic insoluble Ca in mature leaves were the highest of all the extracted Ca forms and they reveal the differences between the treatments (figure 43). The lowest values were observed in treatments with Ca-EDTA involving the lower levels of Ca ($\frac{1}{4}$ Ca). In the CaCl₂ and CaSO₄ treatments, maximum levels in mature leaves were reached at the end of fruit set (50 days after transplanting). They then fell steadily, the $\frac{1}{2}$ Ca treatments producing inorganic insoluble Ca levels approximately three times greater than $\frac{1}{4}$ Ca. In young leaves, chelate treatment again produced the lowest values, with the $\frac{1}{4}$ Ca treatments leading to significantly lower levels than $\frac{1}{2}$ Ca. Chloride and sulphate treatments produced contrary results, Ca levels

falling after the first sampling date in the former and increasing after fruit set in the latter. The inorganic insoluble Ca ratios (mature leaves/young leaves) for the six treatments deficient in Ca varied from 9,0 to 9,5 (Ca-EDTA); 22,0 to 41,7 (CaCl₂) and 19,3 to 29,0 (CaSO₄); in all cases the lower ratio refers to ¼ Ca treatments.

Figure 43. Time course of changes of inorganic insoluble calcium concentration in mature and young leaves for six treatments deficient in calcium, involving Ca-EDTA, CaCl₂ and CaSO₄ each at two calcium concentrations. Bars indicate the standard deviation among four replications carried out for each sector and sampling date.

In mature leaves, the treatments with chelate resulted in lower concentrations of organic insoluble Ca than those obtained with the other salts (figure 44). The ¼ Ca treatments led to lower responses, both in mature and young leaves in all cases. Treatment with chloride and sulphate led to maximum levels occurring in mature leaves during the period in which fruits were swelling (73 days), particularly in the case of the ½ Ca treatments. In young leaves, this form was the least abundant, since it is especially related with the Ca precipitated as oxalate and which is accumulated in the vacuoles when in excess. The ratios of the organic insoluble Ca contents (mature leaves/young leaves) for the six treatments deficient in Ca varied from 9,0 to 11,6 (Ca-EDTA); 25,8 to 47,7 (CaCl₂) and 28,7 to 31,7 (CaSO₄); in all cases the lower ratio refers to ¼ Ca treatments, except for Ca-EDTA.

Figure 44. Time course of changes of organic insoluble calcium concentration in mature and young leaves for six treatments deficient in calcium, involving Ca-EDTA, CaCl₂ and CaSO₄ each at two calcium concentrations. Bars indicate the standard deviation among four replications carried out for each sector and sampling date.

For the sum of the four Ca forms, the differences between the control and the other treatments were marked, as were differences between treatments: Ch treatments led to much lower values than Cl⁻ and SO₄²⁻ for each amount of Ca supplied (figure 45). For every treatment and sampling date, total Ca levels in mature leaves were approximately 10 times greater than the respective levels in young leaves.

The ratios of Ca contents (mature leaves/young leaves) for the six deficient Ca treatments varied from 5,0 to 18,5 (soluble Ca); 3,8 to 11,0 (bound Ca); 9,0 to 41,7 (inorganic insoluble Ca) and 9,0 to 47,7 (organic insoluble Ca); for the control, those ratios were 2,3 (soluble Ca); 1,6 (bound Ca); 22,3 (inorganic insoluble Ca) and 61,5 (organic insoluble Ca). The insoluble forms always had higher ratios. For the soluble and bound-Ca forms, the control showed lower values than the Ca deficient treatments; for the inorganic insoluble Ca form, the control ratio was in the range of the deficient treatment ratios; and for the organic insoluble Ca form the control ratio was higher than the Ca-deficient treatment ratios. For increasingly insoluble Ca forms the control ratios increased more than the deficient treatment ratios.

Figure 45. Distribution of total calcium in mature and young leaves for seven treatments and four sampling dates.

Conclusions

Under the test conditions, which were unfavorable for Ca uptake, the concentrations of the different forms of Ca were in general considerably higher in mature leaves than in young leaves of muskmelon (cv. Revigal). In mature leaves, the minority form was usually bound Ca and the predominant form was inorganic insoluble (especially as phosphates). This last form and organic insoluble Ca precipitated as oxalate presented the most marked differences in relation to the levels in young leaves. In young leaves, the minority form was that precipitated as oxalate, whereas soluble Ca was generally accumulated in the greatest quantities. The presence of high levels of insoluble Ca salts in mature leaves when levels exceed a certain value and when the levels of bound Ca as pectates show no special increase suggests that this element has a

function in the regulation of cell pH and osmoregulation. In addition, when Ca is stored in the older leaves it cannot be transported to growth points even when Ca deficiency symptoms are evident in the growing tips (Loneragan and Snowball, 1969). This may be due to the precipitation of Ca^{+2} as Ca phosphate in the sap of the phloem which would explain the high content of the inorganic insoluble form (especially as phosphates) in mature leaves.

For all the Ca forms analyzed there was a great difference in concentration between the control plants (supplied with Ca nitrate) and the plants supplied with lower concentrations of Ca by different salts except in the case of soluble Ca in mature leaves, which did not show differences between treatments or the control.

The four forms of Ca in young leaves were lower for the treatments with the lower Ca supply ($\frac{1}{4}$ of control), whereas in mature leaves this was only really true in the case of the insoluble forms, both organic and inorganic, since bound and soluble forms were very near and interwoven.

For soluble and bound forms, there were no significant differences between treatments with the same Ca supply, whereas insoluble forms were much lower in the case of Ca-EDTA treatments, especially as far as mature leaves were concerned. EDTA has even been used in some plant physiology experiments to partially eliminate Ca in the form of pectate from the membranes, which consequently lose consistency show structural degradation and increased permeability to such an extent that organic and inorganic compounds can leak from the cell and cause substantial damage (Mengel and Kirkby, 1987). The use of commercial correctors of Ca deficiency based on Ca-EDTA would not seem to be advisable, since this form presents great stability and hinders both the uptake and internal transport of Ca which mainly occurs in ionic form (Ca^{+2}).

In general, the concentration of soluble and bound Ca forms tended to decrease with time in all the treatments particularly the former, whereas insoluble organic Ca tended to show a maximum coinciding with the fruit swelling period and inorganic insoluble did not show any clear tendency.

As regards the total Ca content, the concentration in mature leaves in all the treatments was approximately ten times higher than in the respective treatments in young leaves. In both leaf types and for each sampling date, the Ca contents followed the order: $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- \cdot \frac{1}{2} \approx \text{SO}_4^{-2} \cdot \frac{1}{2} > \text{Cl}^- \cdot \frac{1}{4} \approx \text{SO}_4^{-2} \cdot \frac{1}{4} > \text{Ch} \cdot \frac{1}{2} > \text{Ch} \cdot \frac{1}{4}$. This is the same order as that observed for fruit and biomass production. The scant difference between the responses to CaCl_2 and CaSO_4 treatment from a vegetative and productive point of view and as regards the time-course trend of the different Ca forms analyzed in mature and young leaves, it is suggested that the anion which accompanies Ca has very little influence on the dynamic of Ca in the plant, even though Cl^- ion is very mobile both in the phloem and in the xylem, while SO_4^{-2} anion shows a much more restricted mobility via phloem, which explains why it is not distributed from mature to young growing leaves.

3.3.2. CALCIUM DEFICIENCY PROVOKED BY THE APPLICATION OF DIFFERENT FORMS AND CONCENTRATIONS OF Ca⁺² TO SOIL-LESS CULTIVATED MUSKMELONS

AUTORES: ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & GUILLÉN, I.

TÍTULO: Calcium deficiency provoked by the application of different forms and concentrations of Ca⁺² to soil-less cultivated muskmelons

CLAVE: A FECHA: 1999

REF. REVISTA: Scientia Horticulturae, 81: 89-102.

Abstract

The influences of deficiency concentrations of calcium compounds other than the calcium nitrate usually used, on the development of *Cucumis melo* L. cv. Revigal cultivated in rockwool were studied under adverse calcium absorption conditions (low solar radiation, temperature and calcium and high sodium and magnesium levels in the nutrient solution). A standard Ca(NO₃)₂ concentration was used for comparison and two different concentrations of Ca-EDTA, CaCl₂ and CaSO₄ (equivalent to half and to one quarter of the calcium in the control) were used to create calcium deficiencies. The demand for calcium increased substantially during the period of the greatest vegetative growth. Ca-EDTA produced greater Ca deficiency symptoms than CaCl₂ and CaSO₄, and was not effective in alleviating calcium-associated problems. There were no significant differences in biomass production between the sulphate and chloride treatments with the same calcium levels, although there were great differences in biomass production in the different plant fractions between the two calcium levels applied. The biomass differences were greater half way through the cultivation cycle than at the end. The use of calcium concentrations below 3 mM in the nutrient solution, which represents a net daily calcium uptake of less than 1 mmol per plant throughout the cultivation cycle was insufficient and provoked deficiency symptoms in leaves and fruits in the conditions of this experiment. Calcium levels at the end of the growing cycle were significantly higher in the control than in other treatments in all plant fractions. There were very few differences in calcium content in fractions between the chloride and sulphate treatments, while the Ca-EDTA treatments led to noticeably lower calcium levels in the different fractions.

Introduction

The difficulties that plants have passively absorbing and transporting, and translocating calcium make them very susceptible to regional and seasonal deficiencies due to environmental variables. Once incorporated into the plant sap, calcium is directed preferentially to the parts of the plant with greatest transpiration rate. Hence, when transpiration is intense and the amount of calcium insufficient, the organs which show the least amount of transpiration (fruits and young leaves) develop a localized lack of this element, since it is scarcely transported by the phloem. This results in the appearance of nutritional damage due to the limited capacity of plants to regulate the internal distribution of calcium in accordance with the demands of low transpiration organs such as fast growing leaves, tubers and fruits (Bangerth, 1979; Kirkby and Pilbeam, 1984). In situations of low transpiration, the flow through the xylem depends mainly on root pressure, so that the calcium absorption will depend on the availability of water in the

root's surroundings. For this reason, in saline solutions with a high osmotic pressure, there is a decrease in calcium transport, which can also result in localized lack of calcium and the development of deficiency symptoms (Palzkill *et al.*, 1976; Bradfield and Guttridge, 1984). Generally, there is more calcium in leaves than in flowers and fruits; the high content in higher plants is related more to the levels which exist in soil solution than to the efficacy of the absorption mechanism of the root cells (Kazda and Weilgony, 1988).

Calcium deficiency interferes with photosynthetic processes, resulting in greatly decreased efficiency of carboxylation and the photosynthetic capacity. This leads to substantial decreases in biomass production in the affected plants (Atkinson *et al.*, 1989; Ramalho *et al.*, 1995). Calcium is essential for good growth, density and length of the root hairs which are necessary for nutrient absorption (Jaunin and Hofer, 1988). Calcium absorbance by the root is affected by the intensity of whole plant transpiration, the salt concentration of the solution (especially due to sodium) (Cramer *et al.*, 1989), the concentrations of antagonistic cations rapidly taken up by the root such as K^+ , NH_4^+ and even H^+ or Al^{3+} ions (Baligar *et al.*, 1987) and environmental conditions such as temperature of substrate.

Muskmelon (*Cucumis melo* L.) has been described by various authors as moderately salt-tolerant (Nukaya *et al.*, 1980; Meiri and Plaut, 1981; Meiri *et al.*, 1982) and proposed as a potential crop in areas with significant soil salinity problems such as southeastern Spain (Shannon and Francois, 1978).

The objectives of this work were to study the influence of different calcium compounds on calcium absorption and its distribution in the plant and on the development of muskmelon in adverse conditions of reduced solar radiation and temperature, and high sodium and magnesium levels in the nutrient solution, conditions that are common in southeastern Spain during the autumn-winter cultivation cycles. These cultivation periods are used in the area to obtain melon fruits outside their normal season, although their quality can be diminished by nutritional damage due to reduced calcium uptake. In this way, we intended to identify visible calcium deficiency symptoms in muskmelons and to study, in conditions which are unfavourable for its absorption, the behaviour of sources of calcium other than the addition of $Ca(NO_3)_2$ which is commonly used in the area to increase the concentration of calcium in the irrigation water and achieve adequate levels of calcium in the plants.

Materials and methods

Experimental design

The experiment was carried out in a polycarbonate greenhouse of 10 m x 20 m in the University of Murcia (Spain), using information from a preliminary assay carried out in 1994 with the same crop. There were 14 rows with 10 plants per row in seven sectors (two rows in each sector). The interior environment of the greenhouse was controlled by automatic heating, ventilation through zenithal openings and refrigeration through a cooling system, all of which were controlled by means of an adjustable relative humidity and temperature sensor. The relative humidity was maintained at 65-85%, the temperature range being 15-30°C during the day and above 8°C during the night.

Cultivation

Seeds were planted on 21 September 1994, on 7 cm x 7 cm x 7 cm plugs of rockwool, the plants remained in the seed plot until cotyledon state with two to three true leaves. The crop was terminated on 5 February 1995, a duration of 116 days. On 13 October 1994 the plug was transplanted directly onto the substrate, through which the nutrient solution percolated discontinuously and without recirculation. The crop was grown in autumn-winter (a period with conditions generally unfavorable for melon cultivation), under low solar radiation and temperature (greenhouse to north orientation) and high sodium content in the nutrient solution, conditions adverse for calcium uptake. Heating (circulating hot water below the substrate trays) was regulated by a thermostat equipped with a temperature probe in the substrate itself, and supplementary light was provided through blue-red spectral zone L36W lamps. However, even with this support the plants did not develop their usual luxuriance, and fruit and biomass production was lower than would be the case in their natural cultivation season.

Each substrate tray contained a 120 cm x 20 cm x 10 cm block of rockwool wrapped in white plastic, into which two plants of muskmelon (cv. Revigal) were transplanted. They were vertically supported with plastic mesh (15 cm x 15 cm) with upper tensors (1,8 m).

Irrigation water

Water decalcified by ion exchange of Ca^{2+} and Mg^{2+} by Na^+ was used; the relative excess of sodium was adverse for calcium uptake. The analytical characteristics of the irrigation water were: pH 8,21; electric conductivity (EC) 1,68 dS m^{-1} ; HCO_3^- 3,54 mM; Cl^- 4,87 mM; SO_4^{2-} 3,88 mM; Ca^{2+} 0,01 mM; Mg^{2+} 0,01 mM; K^+ 0,06 mM; Na^+ 16,07 mM and B 0,16 mg L^{-1} . Other nutrients existed in negligible quantities.

Fertigation and deficiencies

The cultivation sectors were fertigated in the following manner.

Sector one ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$): In the control test, which was used as reference to compare optimum calcium fertilization in the experimental conditions with other calcium-deficient sectors, calcium was supplied as calcium nitrate (3-4 mM Ca in the nutrient solution, the normal minimum concentration). Equilibrated nutrient solution for the cultivation was adjusted according to the phenological stage of cultivation and analysis of the nutrient and drainage solutions was carried out every 2 weeks. The concentration of a particular nutrient in the nutrient solution to be administered was adjusted in accordance with whether it was seen to increase or diminish in concentration in the drainage solution. The irrigation supply was regulated automatically by a demand irrigation tray installed in this sector, consisting of two height-adjustable electrodes, located in the lower part of the tray, which began and stopped the irrigation according to the transpiration rate of the plant. This made it possible to fix the most suitable drainage percentage uniformly. The device simultaneously governed all the sectors and, when the control showed greater vegetative development and a corresponding

increased hydric demand, the other sectors had drainage percentages above the optimum, as shown in Table 30.

Sector two (Ca-EDTA 1/2): This sector received chelated calcium as Ca-EDTA equivalent to half the level of the calcium in the control. To compensate for the supply of nitrate ion, its equivalent was added as magnesium nitrate, this relative excess of magnesium also perhaps contributes to the manifestation of calcium deficiency since they are antagonistic cations when absorbed.

Sector three (Ca-EDTA 1/4): Ca-EDTA with a quarter of the calcium in the control.

Sectors four (CaCl₂ 1/2) and five (CaCl₂ 1/4): The calcium was supplied with calcium chloride, equivalent to half and one quarter of the control, respectively.

Sectors six (CaSO₄ 1/2) and seven (CaSO₄ 1/4) received calcium sulphate, equivalent to half and one quarter of control, respectively.

Table 30. Mean drainage percentage (%), during the growth cycle for each treatment of muskmelon plants.

Treatment	Ca (mM)	Days from transplanting onwards							
		0-14	15-29	30-44	45-58	59-72	73-89	90-104	105-116
Control Ca(NO ₃) ₂	3-4	60	27	26	35	40	39	43	43
Ca-EDTA ½	1,5-2	91	82	91	85	75	81	76	68
Ca-EDTA ¼	0,75-1	76	71	81	80	86	85	84	79
CaCl ₂ ½	1,5-2	74	60	75	77	79	72	69	64
CaCl ₂ ¼	0,75-1	89	62	75	77	79	77	82	81
CaSO ₄ ½	1,5-2	80	55	57	67	62	59	59	48
CaSO ₄ ¼	0,75-1	86	62	76	80	79	78	80	75

Starting nutrient solutions

The fertilizers in the starting nutrient solution in the control were: H₃PO₄ 75% 0,124 ml L⁻¹; HNO₃ 59% 0,120 ml L⁻¹; KNO₃ 0,200 g L⁻¹; Ca(NO₃)₂ 0,813 g L⁻¹; NH₄NO₃ 0,080 g L⁻¹; K₂SO₄ 0,437 g L⁻¹; MgSO₄ 0,343 g L⁻¹ and 0,025 g L⁻¹ of the micronutrient complex (7,5% Fe; 3,30% Mn; 0,60% Zn; 0,27% Cu; 0,65% B and 0,20% Mo). From the beginning of the experiment the calcium nitrate was substituted by different calcium compounds and the meq of NO₃⁻ were compensated with magnesium nitrate in Sectors 2-7.

Controls and samplings

Daily controls of temperature, relative humidity, EC and pH of the nutrient and drainage solutions and drainage percentages for each sector were made. Fortnightly samples were taken in each sector of the solutions supplied and from the accumulated drainage solutions. By

calculating the difference between both the solutions the net consumption of calcium per plant and day was obtained.

Half way through the cyc1e (66 days after transplanting) and at the end of cultivation (116 days after transplanting) five complete plants per sector were collected at random. Each of the plants was fractionated into the following parts: Leaves (petioles + leaf lamina); fruits (pulp + peel + juice); stems (the stems themselves + tendrils and flowers + apices) and roots. By apices was understood the growth rosettes, the stems' tips with undifferentiated leaves.

Biomass and calcium determination

The dry weight in each fraction was obtained by drying the samples at 70°C in an oven for 24 h, then grinding and completing the desiccation at 105°C for 24 h. The calcium concentration in the dried samples was determined, after mineralization of the sample by dry ashing.

Analytical methods

The techniques proposed by the M.A.P.A. (1994) were used for the determination of calcium concentration in plant fractions (atomic absorption spectroscopy) and in the irrigation water and nutrient and drainage solutions and for the determination of pH; EC at 25°C; sulphates (turbidimetry); nitrates and phosphates (UV-Vis spectrophotometry); ammonium (steam distillation); chlorides, carbonates and bicarbonates (potentiometry); calcium and magnesium (atomic absorption spectroscopy); and potassium and sodium (emission spectroscopy). The values for each sample were obtained by means of at least three analytical repetitions.

Results and discussion

The control plants showed no calcium deficiency symptoms while those given CaCl_2 1/2, CaCl_2 1/4, CaSO_4 1/2 and CaSO_4 1/4 presented symptoms in their leaves and in some fruit, especially in those treatments receiving 1/4 calcium. The Ca-EDTA 1/2 and Ca-EDTA 1/4 plants showed the most pronounced effects of deficiency, with no fruit production and little initial growth. The calcium deficiency symptoms were as follows: The youngest leaves showed transparent white dots near the edges and between the veins, remained small and their edges were deeply incised and curled upwards; later they shrivelled from the edges inwards; interveinal chlorosis appeared in most leaves, gradually increasing in severity, the main veins remaining green; mature leaves curved downwards, petioles were brittle and leaves dropped easily; plants were stunted and internodes were short, especially near the apex; flowers were smaller than normal and pale yellow; fruit setting was poor and fruits showed brown dots and chlorosis in the calyx end.

Figure 46 shows the changes of calcium in the nutrient and drainage solutions for the seven treatments. The calcium concentration in the nutrient solution was adjusted in accordance with the levels found in the drainage solution. According to its accumulation or reduced concentration in the drainage solutions, the concentration of each of the nutrients supplied in the nutrient solution was adjusted. In the first phase of development, with great nutrient demand, calcium concentration in the drainage was low, rising sharply after 55 days (Control,

CaCl₂ 1/2 and CaSO₄ 1/2) when the demand fell; this behaviour was not so accentuated in plants showing clear symptoms of calcium deficiency (Ca-EDTA 1/2, Ca-EDTA 1/4, CaCl₂ 1/4 and CaSO₄ 1/4).

Figure 46. Calcium concentrations in nutrient and drainage solutions in each treatment from transplanting onwards. Vertical bars represent LSD at $p = 0,05$.

Table 30 shows the mean drainage percentage during the cultivation cycle for each treatment (quantity of drained solution with respect to the quantity of nutrient solution supplied in the period of time considered). With these data and the analytical results of the nutrient and drainage solutions, the daily mmol per plant supplied and drained were calculated for calcium.

The difference between the amount of calcium supplied and drained (the net daily uptake per plant), is shown in figure 47. Changes in the drainage solution were clear, except during the first 20 days when the plants were adapting to the substrate: Calcium uptake rose and subsequently fell, and later rose again. The Ca-EDTA 1/2 and Ca-EDTA 1/4 plants, which grew very slowly at the beginning compared with the other plants, did not show the increases. CaSO₄, particularly in CaSO₄ 1/2, was more readily absorbed than CaCl₂.

Figure 47. Daily net calcium uptake per plant in each treatment from transplanting onwards. Vertical bars represent LSD at $p = 0.05$.

Table 31 shows the biomass per plant produced by the various fractions half way through the cultivation cycle for the seven treatments. The data were obtained by analysing the fractions of the five repetitions (five plants per sector sampled), and then applying Duncan's statistical test. In all the fractions, the control values differed significantly from the rest. The treatments with Ca-EDTA produced no fruit and had severely reduced vegetative growth. For the entire plant, the control had approximately double the biomass production of CaCl₂ 1/2 and CaSO₄ 1/2, and some five times greater production than Ca-EDTA 1/2 and Ca-EDTA 1/4. There were no significant differences between the chloride and sulphate treatments.

Table 31. Biomass (g d. w./plant) for the different plant fractions half-way through the cultivation cycle (66 days after transplant) in the seven treatments^a.

Treatment	Leaf lamina	Petioles	Total leaf	Fruit peel	Fruit pulp	Total fruit	Stems	Tendrils + flowers	Apices	Total stem	Roots	Total plant
Control	48,2 a ²	6,08 a	54,2 a	63,1 a	52,1 a	115,3 a	31,3 a	2,00 a	1,75 a	35,1 a	4,02 a	208,6 a
Ca-EDTA ½	22,1 c	2,25 de	24,4 cd	0,00 c	0,00 c	0,00 c	13,4 cd	1,63 ab	1,14 bc	16,2 de	2,03 de	42,5 de
Ca-EDTA ¼	21,0 c	1,80 e	22,8 d	0,00 c	0,00 c	0,00 c	10,5 d	1,00 c	0,53 d	12,0 e	1,52 e	36,3 e
CaCl ₂ ½	29,8 b	3,90 b	33,7 b	21,5 b	8,25 bc	29,8 b	23,1 b	1,69 ab	1,31 abc	26,1 b	2,96 bc	92,5 bc
CaCl ₂ ¼	27,8 bc	3,15 c	31,0 bc	18,6 b	7,63 bc	26,3 b	20,4 b	1,63 ab	0,96 cd	23,0 bc	2,48 cd	82,7 bc
CaSO ₄ ½	30,5 b	3,75 b	34,2 b	34,6 b	17,1 b	51,8 b	24,2 b	1,81 ab	1,49 ab	27,5 b	3,45 ab	116,9 b
CaSO ₄ ¼	23,0 c	2,55 d	25,5 cd	19,6 b	9,70 bc	29,3 b	15,8 c	1,25 bc	1,05 bc	18,1 cd	2,54 cd	75,5 cd

^a Mean separation in columns by Duncan's multiple range test, P = 0,05.

Table 32 shows the biomass per plant at the end of the cultivation cycle (116 days after transplant), for the same fractions as midway through the cycle. The data were obtained by analysing the fractions of the five repetitions (five plants per sector sampled), and then applying Duncan's statistical test. The biomass values for the vegetative part of the plant in the control experiment were similar to those obtained by Mendlinger and Pasternak (1992), although they are approximately half of the vegetative biomass production levels normally recorded in this region for soil-less cultivation in spring (with its higher temperatures and solar radiation). The mean percentage of dry matter in fruit was 6,9%, which implies a fresh production yield of 4,2 kg/plant for the control, just above half the yields normally obtained in rockwool culture in this area in spring (Alarcón *et al*, 1997. The control differed significantly from all the other treatments in all fractions except roots, leaves and petioles, The Ca-EDTA 1/4 treatment, with no fruit production, showed the smallest biomass production, being significantly different in all fractions except the apices, from the treatments with the same quantity of other forms of calcium.

Table 32. Biomass (g d. w./plant) for the different plant fractions at the end of the cultivation cycle (116 days after transplant) in the seven treatments^a.

Treatment	Leaf lamina	Petioles	Total leaf	Fruit peel	Fruit juice	Fruit pulp	Total fruit	Stems	Tendrils+ flowers	Apices	Total stem	Roots	Total plant
Control	98,9 a	16,1 a	114,9 a	95,6 a	85,7 a	110,8 a	292,1 a	60,6 a	3,70 a	1,69 a	65,9 a	13,0 a	486,0 a
Ca-EDTA ½	77,2 b	7,95 d	85,1 c	11,5 d	6,38 c	8,28 e	26,2 d	31,3 d	2,65 b	1,11 b	35,1 d	6,25 e	152,6 d
Ca-EDTA ¼	64,6 c	6,26 d	70,8 d	0,00 e	0,00 c	0,00 e	0,00 d	22,7 e	1,80 c	0,76 b	25,3 e	3,25 f	99,3 e
CaCl ₂ ½	88,2 ab	14,2 b	102,4 ab	48,1 b	32,1 b	47,1 b	127,3 b	48,3 bc	2,55 b	1,05 b	51,9 bc	9,75 bc	291,3 b
CaCl ₂ ¼	84,0 b	11,0 c	95,0 bc	27,2 c	27,1 b	35,1 cd	89,4 c	44,5 bc	2,55 b	0,94 b	47,9 bc	8,50 cd	240,8 c
CaSO ₄ ½	96,5 a	15,2 ab	111,7 a	46,6 b	32,4 b	44,2 bc	123,2 b	50,2 b	3,45 a	0,99 b	54,6 b	11,25 ab	300,7 b
CaSO ₄ ¼	78,6 b	14,5 c	89,2 bc	26,9 c	24,4 b	31,3 d	82,5 c	42,2 c	2,45 b	0,76 b	45,4 c	7,50 de	224,7 c

^a Mean separation in columns by Duncan's multiple range test, P = 0,05,

These biomass values correspond to the calcium concentrations measured in the different fractions analysed (table 33). It can be seen that for all the fractions, the control contained higher calcium concentrations than the other treatments, with the differences being statistically significant except in the case of the flowers. The high leaf calcium content of the control (8,81%), is explained by the fact that the values were calculated in the leaf mass as a whole, which would include mature leaves with higher levels of accumulated calcium, as the main part of the leaf biomass (Mengel and Kirkby, 1987). Normal values for totally developed young leaves for this crop in rockwool are 2-7% (Vega and Raya, 1997).

Differences between the chloride and the sulphate treatments were slight and only existed in leaves, tendrils and apices of the 1/4 Ca treatments and in the apices of the ½ Ca treatments, always being greater in the treatments with added CaSO₄. The lowest calcium levels corresponded to the Ca-EDTA 1/4 treatment in all the fractions except petioles, stems and apices, with significantly lower levels being observed in the leaves, tendrils and roots, Ca-EDTA 1/2 treatment produced lowest Ca levels in the peel and pulp of the fruit (N. B. Ca-EDTA 1/4 led to no fruit production) and always produced numerically lower calcium levels than the other 1/2-Ca treatments, significantly so in the leaf, tendrils, flowers, roots and fruit peel and pulp.

The very low calcium levels in juice are explained by the fact that the Ca²⁺ of this fraction can only be present as free Ca²⁺, while in pulp and peel it can be present both as free Ca²⁺ adsorbed

to indiffusible ions such as carboxylic, phosphorylic and phenolic hydroxyl groups, and it is also present in calcium oxalates, carbonates and phosphates (Mengel and Kirkby, 1987).

Table 33. Calcium content of the different plant fractions at the end of the cultivation cycle (116 days after transplant) in the seven treatments^a. All fraction is expressed as % dry weight, except juice and pulp of fruits, which are expressed as ppm dry weight.

Treatment	Leaf lamina	Petioles	Fruit peel	Fruit juice	Fruit pulp	Stems	Tendrils	Flowers	Apices	Roots
Control	8,81 a	3,67 a	0,29 a	122,0 a	1049,0 a	0,90 a	2,58 a	0,79 a	1,77 a	2,07 a
Ca-EDTA ½	1,84 cd	1,18 b	0,14 c	69,4 b	583,4 d	0,43 bc	0,64 d	0,44 d	0,23 cd	1,08 e
Ca-EDTA ¼	0,86 e	0,73 c	-	-	-	0,36 bc	0,43 e	0,39 d	0,17 cd	0,65 f
CaCl ₂ ½	3,60 b	1,40 b	0,19 b	84,0 b	959,7 b	0,49 b	1,47 b	0,63 abc	0,31 c	1,62 bc
CaCl ₂ ¼	1,57 d	0,71 c	0,17 bc	73,3 b	782,7 c	0,30 c	0,80 d	0,54 cd	0,13 d	1,40 cd
CaSO ₄ ½	3,47 b	1,27 b	0,19 b	82,6 b	883,0 b	0,43 bc	1,46 b	0,72 ab	0,52 b	1,67 b
CaSO ₄ ¼	2,24 c	0,79 c	0,16 bc	66,7 b	778,5 c	0,30 c	1,03 c	0,63 bc	0,31 c	1,30 de

^a Mean separation in columns by Duncan's multiple range test, P = 0,05.

Conclusions

Half way through the cultivation cycle the calcium concentration significantly influenced the amount of growth in all parts of the plant. At the end of the cultivation cycle, the major difference in biomass was in the fruits. In treatments which led to lower growth (calcium deficient plants) the vegetative parts, especially the secondary stems, continued to develop strongly.

The trend in total biomass production was Control > CaSO₄ ½ > CaCl₂ ½ > CaCl₂ ¼ > CaSO₄ ¼ > Ca-EDTA ½ > Ca-EDTA ¼. However, there were no significant differences between the treatments supplying the same amount of calcium in either chloride or sulphate form. Apparently, the calcium supplied in Ca-EDTA form was not easily assimilated by the plant and severely reduced vegetative development. Insufficient calcium availability had a severe negative effect on fruit production.

When calcium was supplied in sufficient quantity, its uptake by the melon plant rose sharply from 20 to 40 days after transplanting. It then fell until 80-100 days post-transplant, then it rose again. Calcium concentrations of less than 3 mM in the nutrient solution, which represented a net daily calcium uptake of less than 1 mmol per plant throughout the cultivation cycle were insufficient and provoked deficiency symptoms in leaves and fruits. Analysis of the fractions showed significantly higher levels of calcium in the control in all parts of the plants. Differences between the chloride and sulphate treatments were slight, while the Ca-EDTA treatments led to substantially lower levels of calcium in the fractions than those provoked by the other calcium compounds.

Use of calcium chelated as EDTA is not a good solution for correcting calcium associated problems because of the great stability of this form.

3.3.3. DISTRIBUCIÓN DEL CALCIO EN VARIEDADES DE MELÓN CANTALOUP BAJO FERTIRRIGACIÓN. CALIDAD DEL FRUTO

AUTORES: SÁNCHEZ, F. J.; PRETEL, M. T.; ROMOJARO, F.; MADRID, R. & ALARCÓN, A. L.

TÍTULO: Distribución del calcio en variedades de melón Cantaloup bajo fertirrigación. Calidad del fruto.

CLAVE: A, CL FECHA: 1997

REF. REVISTA/LIBRO: Actas de Horticultura 19: 177-184. ISBN: 84-87440-24-X. Edita: Sociedad Española de Ciencias Hortícolas (SECH).

Abstract

The Talma and Manta varieties of Cantaloup melon ("vitrescence" sensitive and resistant respectively) are cultivated in a greenhouse with automatic control of the climatic conditions and fertigation.

The levels and distribution of the calcium in different fractions of the plants (root, stem, leaf, fruit peduncle part, fruit basal part, skin and pulp) are studied; as well as physic-chemical representative parameters of the quality during the fruit ripening.

The levels of calcium are distributed for falling order in both varieties:

Leaves > Roots > Stems > Fruits (Skin > Pulp)

In the study of the fruit ripening both varieties present a similar behavior. The optimum stage of ripeness is reached in the 3 stages, which is the best moment for harvesting. It can also be seen that the Hunter "b" parameter can be used as an indicator of the state of ripening, since when it passes 20/22 the fruit is ready for consumption.

Introducción

Aunque el cultivo de melón Cantaloup ha experimentado en nuestro país un incremento apreciable, habiéndose alcanzado en estos últimos años una superficie de cultivo en las provincias de Almería y Murcia de 1500 ha como consecuencia de la apertura de nuevos mercados en la Unión Europea, no obstante, es muy limitada la información que se tiene sobre las técnicas agronómicas idóneas para lograr producciones competitivas y de calidad.

Esta problemática se ve agravada por la sensibilidad que presentan algunas variedades de este tipo de melón al desorden fisiológico denominado "vitrescencia", asociado a determinadas deficiencias nutricionales, en particular calcio, y que afecta a la estructura y textura de la pulpa (Madrid *et al.*, 1996) y también a la dificultad de establecer el momento idóneo de recolección, cuando el fruto alcanza la calidad sensorial exigida por el consumidor.

La introducción de nuevas variedades de este cultivo se deberá hacer bajo bases científicas, fijando los niveles adecuados de nutrientes y las modificaciones que experimentan los constituyentes químicos responsables de la calidad sensorial durante la maduración.

El calcio es un elemento que debido a la cantidad asimilada por las plantas es considerado como un macroelemento, presentando fundamentalmente funciones estructurales de fortalecimiento de las paredes celulares y de control de la permeabilidad de las membranas. La presencia cálcica es esencial para un buen crecimiento de los pelos radiculares que son esenciales para la absorción de nutrientes (Jaunin y Hofer, 1988). La deficiencia cálcica interfiere con los procesos fotosintéticos causando importantes reducciones en la eficacia de la carboxilación y capacidad fotosintética, lo que conduce a notables descensos en la producción de biomasa de las plantas afectadas (Atkinson *et al.*, 1989; Ramalho *et al.*, 1993).

La dificultad de absorción del calcio (de forma pasiva) y su transporte (vía xilema), sin prácticamente translocación, le hacen poco móvil y muy susceptible a carencias locales y estacionales con la consiguiente aparición de trastornos nutricionales tales como la 'vitrescencia' del melón, el "blossom end rot" del tomate y pimiento, el "rumple" en limón Fino, etc. Su absorción por la raíz se ve afectada por la intensidad de la transpiración, la concentración salina de la solución (principalmente sodio) (Cramer *et al.*, 1989), la concentración de cationes antagónicos como potasio, amonio, e incluso iones H^+ o Al^{3+} (Baligar *et al.*, 1987), la temperatura del sustrato, etc.

El melón Cantaloup es un fruto que presenta una pausa climatérica, con una crisis respiratoria y etilénica durante la maduración y cuya calidad depende de una serie de atributos a nivel de corteza y pulpa, como sabor, aroma, color, textura, valor nutritivo, etc., que vienen determinados por su estado de madurez.

Por lo general se considera en este fruto que la madurez de consumo corresponde al momento en que alcanzan los niveles máximos de azúcares y color y la textura adecuada. Además, la delimitación del tiempo necesario para alcanzar estas características en la planta tiene una gran importancia comercial, ya que si la recolección se hace prematuramente la calidad sensorial puede verse afectada muy negativamente.

Bianco y Pratt (1977), han constatado que la tasa máxima de incremento azucarado en los frutos de melón se desarrolla entre los 28 y 42 días tras la antesis, produciéndose esta principalmente en forma de sacarosa. Otros estudios de la evolución de la calidad del melón durante los últimos días antes de la madurez muestran que el índice refractométrico está todavía al límite inferior de la calidad (10%) 4 días antes de la madurez (Dumas de Vaulx y Aubert, 1977).

Pratt *et al.* (1977) han estudiado la relación entre la maduración del melón y el papel del etileno, constatando que un tratamiento con etileno a frutos recolectados con un bajo nivel de azúcares (10-12%) no puede mejorar el sabor al no haber acumulado almidón que por hidrólisis pueda formar sacarosa.

En el presente trabajo se estudia la respuesta de las variedades Talma y Manta frente a una disolución nutritiva base, determinando el contenido y distribución del calcio en distintas partes de la planta (raíz, tallo y hoja) y en el fruto a nivel peduncular y calicinal en corteza y pulpa.

También se han detenninado diferentes parámetros físicos-químicos representativos de la calidad durante la maduración del fruto en la planta.

Materiales y métodos

Para la realización de este trabajo se seleccionan dos variedades de melón Cantaloup, Manta y Talma, siendo esta última sensible a la manifestación de la fisiopatía denominada "vitrescencia".

Sistema de cultivo

El ensayo se realizó en la Escuela de Capacitación Agraria de la Consejería de Medio Ambiente, Agricultura y Agua en Torre Pacheco (Murcia), en un invernadero multitúnel de 250 m² de superficie con paramentos verticales de poliéster y una cubierta plástica flexible tricapa (PE-EVA-PE) de 800 galgas. Hay 16 filas con 11 bloques de sustrato de lana de roca (100x20x10 cm) por fila y 2 plantas por bloque. El marco de plantación es de 1,25x0,50 m. Los bloques extremos (1 y 11) de cada fila no se incluyen en la investigación y los bloques 2 a 10 se destinan para el estudio del tratamiento del calcio.

Instalación de riego

La instalación del riego consta de tuberías de distribución de polietileno (25 mm Ø), líneas portaemisores de polietileno (12 mm Ø) y emisores de 2 L/h de descarga y autocompensantes, con canal lateral de recogida de drenaje. La frecuencia de riego se establece mediante una bandeja de riego por demanda, consistente en un único electrodo fijado en una bandeja con dos bloques de lana de roca, que actúa de referencia; de este modo, se aporta la cantidad de solución nutriente que las plantas demandan en cada momento, de acuerdo con su transpiración.

Sistema de fertirrigación

El sistema de fertirrigación utiliza 2 tanques de disoluciones madre de fertilizantes con salida controlada por electroválvulas:

1. Nitrato cálcico, ácido fosfórico, restantes elementos (K, Mg, S, Cl, Na) y microelementos.
2. Ácido nítrico para el ajuste del pH.

También dispone de una cuba de mezcla con ajuste automático del pH y C.E., todo ello controlado por un ordenador que registra todo el proceso, con una base de datos que mide distintos parámetros de interés mediante los correspondientes sensores (Tª interior y exterior, H.R. interior y exterior, velocidad y dirección del viento, radiación solar y volumen, pH y C.E. de la solución aportada).

El agua de riego procede del trasvase Tajo-Segura, aunque dadas las características del experimento se trata en un equipo descalcificador con depósito de 2000 L de capacidad.

El agua es de calidad aceptable con pH elevado que obliga al uso de apreciables cantidades de ácidos para adecuar el pH de la disolución nutritiva que se aplique. La disolución nutritiva base utilizada se muestra en la tabla 34.

Tabla 34. Disolución nutritiva base.

iones	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	H ₂ PO ₄ ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺
mM	0,78	4,10	3,68	6,87	0,82	0,62	3,51	2,03	4,14	3,35

En función de los análisis del agua de drenaje, la solución nutritiva se modifica quincenalmente.

Plantación

Las plantas fueron sembradas el 22-02-96, trasplantadas el 15-03-96 y el cultivo fue dado por finalizado el 09-07-96, con una duración de 139 días. Sustrato de lana de roca, en bloques de 100x20x10 cm y tacos de 8x8x8 cm sobre los que se sitúan las plantas que se entutoran con malla vertical de polietileno (15x15 cm). La calefacción se realiza mediante un cañón de aire caliente alimentado por propano. Se controla diariamente la temperatura, humedad relativa del invernadero, C.E. y pH en las disoluciones nutritivas y de drenaje y el porcentaje de drenaje.

Muestreos

Cada dos semanas se toman muestras de las disoluciones nutritivas y de drenaje, y en base a los resultados de los análisis se ajusta la composición de la disolución nutritiva a utilizar a continuación.

Se efectuaron dos muestreos de plantas completas al inicio de la recolección (04-06-96) y al dar por finalizado el ensayo (09-07-96) que son fraccionadas en hojas, tallos, raíz y frutos. En estos últimos se distinguió la corteza y la pulpa del tercio superior (parte del pedúnculo) y del tercio inferior (parte calicinal) de los mismos. En todas estas muestras se determinó el calcio como elemento mineral.

Para el estudio de la maduración y determinación de los parámetros responsables de la calidad del fruto, se seleccionaron 4 estados de madurez en función de la producción de etileno cuando habían alcanzado la etapa final del desarrollo (entre 800 y 900 g). Para ello se tomó una muestra amplia de frutos que se transportó al laboratorio y se mantuvieron a 20°C durante siete horas para permitir la cicatrización de la zona de corte del pedúnculo y realizar la determinación de etileno bajo las mismas condiciones de temperatura.

Los estados de maduración son cuatro: 1.- Verde; 2.- Preclimatérico; 3.- Climatérico; 4.- Post-climatérico. Cada estado estaba compuesto de 10 frutos, que se procesaron el mismo día del muestreo.

Determinaciones analíticas

La metodología aplicada ha sido la siguiente:

Calcio: El material vegetal fresco, separado en sus distintas fracciones, se lava con agua destilada para eliminar posibles impurezas debidas al polvo, restos de plaguicidas, etc.

Una vez lavado, se trocea y se seca en estufa de aire forzado durante 24 horas a 65°C y a 105°C durante las dos horas finales. A continuación, se tritura para lograr una buena homogeneización y se vuelve a la estufa otras dos horas a 105°C (Ashby, 1969; Grier, 1966).

La digestión de las muestras molidas se realiza por vía seca en horno de mufla en crisoles de porcelana. Se realiza mediante programación de rampa de temperatura un ascenso gradual de la misma a lo largo de dos horas hasta 480°C y después se mantiene a 480-500°C durante 5 horas (Comité Inter-Instituts d'Etude des Techniques Analytiques du Diagnostic Foliare, 1969). Para la extracción del calcio de las cenizas se emplea ácido nítrico 0,6 N.

El calcio se determina en los extractos mediante espectrometría de absorción atómica a la longitud de onda de 422,7 nm, bajo las condiciones apropiadas de trabajo y la dilución correspondiente para entrar en la recta de calibrado.

Sólidos solubles: Se homogeneiza la pulpa en un triturador Osterizer y se mide en un refractómetro de Abbe marca Atago, expresando los resultados en °Brix a 20°C.

Acidez valorable: Sobre el homogeneizado por valoración potenciométrica con NaOH 0,1 N hasta pH 8,1. El resultado se expresa en g de ácido cítrico anhidro por 100 gramos de pulpa.

Color: Se mide por reflexión en colorímetro Minolta, modelo CR. 200, expresando los resultados en parámetros Hunter "L", "a" y "b". Se realizan cuatro medidas por fruto, en la corteza y pulpa.

Etileno: Los frutos se introducen individualmente en recipientes que se cierran herméticamente y están provistos de un septum de silicona. Después de una hora se extrae 1 ml de la atmósfera del mismo y se inyecta en un cromatógrafo de gases H. P., modelo 5890, provisto de detector de ionización de llama y columna de acero inoxidable de tres metros de longitud y 1/8" de diámetro interno, con relleno de alúmina activada de 80/100 mallas.

Análisis sensorial: Los frutos se sometieron a un panel de 3 catadores para que apreciaran el sabor, color y textura de la pulpa. Se definió la terminología a aplicar a cada atributo y la relación entre ellos permitió hacer la siguiente escala de clasificación:

<u>Aceptación</u>	<u>Color</u>	<u>Textura</u>	<u>Sabor</u>
1	Verde	-	Insípido
2	Amarillo	-	Insípido
3	Inicio color salmón	Algo dura	Algo dulce
4	Salmón típico	Óptima	Muy dulce
5	Salmón inicio vinoso	Algo blanda	Muy dulce
6	Vinoso	Blanda	Ligero pasado
7	Vinoso intenso	Muy blanda	Pasado
8	Vinoso muy intenso	Desecha	Muy pasado

Resultados y discusión

La tabla 35 muestra los niveles de calcio en las diferentes fracciones de las plantas completas (hoja, tallo, raíz y fracciones del fruto) al inicio y final de la recolección; para los frutos se distingue la corteza y la pulpa del tercio superior (parte del pedúnculo) y del tercio inferior (parte distal) de los mismos.

Tabla 35. Contenido en calcio en fracciones de la planta melón Cantaloup, variedades Manta y Talma (% Ca materia seca).

Fracción	Fecha muestreo	Talma	Manta
HOJA	04-06-96	6,010	5,553
	09-07-96	6,026	5,719
TALLO	04-06-96	0,927	0,820
	09-07-96	1,154	1,093
RAÍCES	04-06-96	1,878	1,691
	09-07-96	1,703	1,449
CORTEZA FRUTOS PARTE PEDÚNCULO	04-06-96	0,247	0,253
	09-07-96	0,188	0,213
CORTEZA FRUTOS PARTE BASAL	04-06-96	0,216	0,252
	09-07-96	0,175	0,223
PULPA FRUTO PARTE PEDÚNCULO	04-06-96	0,175	0,130
	09-07-96	0,131	0,165
PULPA FRUTO PARTE BASAL	04-06-96	0,154	0,113
	09-07-96	0,114	0,153

Se observa que la variedad Talma muestra unos contenidos superiores de calcio en hojas, en tallos y en raíces para las dos fechas muestreadas, resultando en cualquier caso los niveles más bajos, para ambas variedades, en tallos y superiores en la fracción de las hojas.

Los contenidos de calcio foliares en ambas variedades están ligeramente por encima de los valores considerados normales para este tipo de cultivo, pero esta acumulación de calcio no implica necesariamente que órganos como los frutos, que se nutren básicamente por el floema, reciban una cantidad adicional de este elemento. Efectivamente, existen una serie de mecanismos de regulación que mantienen la concentración de calcio en el floema a niveles bajos, y cuando el crecimiento de los frutos es rápido, la concentración de calcio en los mismos puede descender por debajo del nivel crítico necesario para mantener la integridad celular (Duarte y Guardiola, 1995).

Excepto en la pulpa de la variedad Manta, los niveles de calcio en fruto son superiores en la primera fecha de muestreo y al contrario para los contenidos foliares, hechos que se explican en función de la transpiración. Conforme las temperaturas registradas son más elevadas, la transpiración aumenta con lo que la mayor parte del flujo del xilema está dirigido hacia órganos exteriores como las hojas en detrimento de los frutos. En cambio, en la primera fecha, temperaturas más bajas reducen la transpiración y el transporte de calcio por el xilema se distribuye tanto a hojas como frutos (Wiebe *et al.*, 1977).

Las dos variedades muestran unas concentraciones de calcio superiores en la parte del pedúnculo tanto en pulpa como en corteza y en ambas fechas, debido a que en el interior del fruto el calcio es transportado en su mayor parte por los vasos del xilema cuya densidad disminuye del pedúnculo a la parte distal (Odet y Dumoulin, 1993).

El estudio de la maduración del fruto en la planta puso de manifiesto un comportamiento muy similar entre las dos variedades. En la tabla 36 se recogen los valores correspondientes a las variedades Manta y Talma, observándose como resultados más significativos un aumento de los azúcares, disminución de la acidez, modificaciones del color a nivel de corteza y pulpa (valores Hunter "b" y "a") y una crisis etilénica muy intensa entre los estados 2 y 3, que confirma el carácter climatérico de este fruto. De acuerdo con la evolución de los parámetros analizados se puede afirmar que, en nuestras condiciones experimentales, el melón alcanza la madurez óptima en el estado 3, siendo el momento adecuado para su recolección. También se ha comprobado que el parámetro de color Hunter "b" de la piel puede utilizarse como índice para determinar el estado de maduración, ya que cuando alcanza niveles próximos a 24 el melón presenta una calidad sensorial adecuada para el consumo.

Si comparamos los valores obtenidos para ambas variedades en el estado de maduración número 3, con objeto de evaluar la influencia de la variedad sobre la calidad del fruto, se observa que, como en el estudio de la maduración del fruto, los valores son muy similares, aunque en el caso de sólidos solubles y acidez, la variedad Talma presenta contenidos algo más bajos.

Tabla 36. Evolución de diferentes parámetros físico - químicos durante el desarrollo y maduración de las variedades Manta y Talma.

	ESTADO DE MADURACIÓN							
	1		2		3		4	
Parámetro	Manta	Talma	Manta	Talma	Manta	Talma	Manta	Talma
Sólidos solubles (°Brix)	6,19	6,16	6,99	6,45	12,21	11,02	13,77	10,78
Acidez (% ácido cítrico)	0,1	0,09	0,12	0,12	0,09	0,06	0,07	0,06
Etileno (nl / g·L)	0,02	0,11	0,91	0,54	82	99	50	32
Valor Hunter "b" (corteza)	16,0	15,8	18,0	13,89	24,0	25,8	28,0	28,5
Valor Hunter "a" (pulpa)	-4,3	-6,52	-1,7	-1,54	11,7	9,36	10,0	6,72
Análisis sensorial	1	1	2	2	4	4	6	7

4. CONCLUSIONES

1. El estudio de la absorción del agua y de los iones mayoritarios que componen las soluciones nutritivas aplicadas a diferentes cultivos sin suelo, muestran unos valores medios diarios similares y más o menos constantes, una vez completado el periodo de establecimiento y desarrollo inicial del cultivo (30-40 días), para los cultivos típicos de invernadero el sureste español (tomate, pepino, melón, pimiento), con una densidad de plantación similar. Solo los elementos en exceso en el agua de riego distorsionan estos valores al exceder las necesidades del cultivo. De esta forma las medias diarias por planta se pueden establecer en los valores siguientes: 1,5-2,0 L de agua, 25-30 mM de nitrógeno, 12-16 mM de potasio, 5-10 mM de calcio, 3-4 mM de fósforo, 1,5-2 mM de magnesio y 2-3 mM de azufre.
2. Además, se hace patente una interdependencia en la absorción hídrica y de los diferentes iones que componen la solución nutritiva donde se constata que la asimilación de uno no es independiente, sino que depende de algunos otros, viéndose esta interrelación influida por la concentración (en exceso o no) presente en la solución nutritiva.
3. Con toda la información anterior y otra mucha recabada de experiencias similares, se pudo elaborar una aplicación informática para el reajuste nutricional de los cultivos sin suelo del sureste español, que es una conclusión en sí misma, ya que demostró ser una herramienta eficiente para la gestión nutricional de este tipo de cultivos.
4. El calcio se muestra como un elemento tremendamente conflictivo en su gestión, debido a las particularidades de sus funciones y su asimilación problemática. Las concentraciones de calcio de menos de 3 mM en la solución nutritiva, que representan una captación diaria neta de calcio de menos de 1 mmol por planta a lo largo del ciclo de cultivo son insuficientes y provocan síntomas de deficiencia en hojas y frutos.
5. El análisis de la concentración de las distintas formas de calcio en melón tipo Galia, muestra que las diferencias entre hojas maduras y jóvenes son muy acusadas para la totalidad de fracciones. En hojas maduras predomina la fracción de Ca insoluble inorgánico, el Ca ligado es la forma minoritaria. En hojas jóvenes el Ca soluble suele ser la forma mayoritaria, mientras que el Ca insoluble orgánico es la minoritaria.
6. Los ratios del contenido en Ca hojas maduras / hojas jóvenes, para los tratamientos deficientes en Ca varían en los siguientes rangos:
 - De 5,0 a 18,5 para el Ca soluble (2,3 en control).
 - De 3,8 a 11,0 para el Ca ligado (1,6 el control).
 - De 9,0 a 41,7 para el Ca insoluble inorgánico (22,3 el control).
 - De 9,0 a 47,7 para el Ca insoluble orgánico (61,5 el control).

Las formas insolubles siempre presentan ratios más elevados.

7. Las cuatro fracciones de Ca en hojas jóvenes son inferiores para los tratamientos con menor aporte cálcico (1/4 del control), mientras que, en hojas adultas, esto solo es claramente

patente en las dos fracciones insolubles (inorgánica y orgánica), en las formas soluble y ligada son próximas.

8. Para el Ca soluble y el ligado no existen diferencias significativas entre tratamientos con la misma cantidad de Ca aportado con diferentes compuestos, mientras que las fracciones insolubles son muy inferiores para los tratamientos con aporte de EDTA-Ca, sobre todo, si atendemos a las hojas maduras.
9. La escasa diferencia entre los tratamientos con CaCl_2 y CaSO_4 , tanto en el aspecto vegetativo y productivo como en la evolución y valores de las distintas fracciones de Ca en hojas maduras y jóvenes, induce a pensar que el anión que acompaña al Ca ejerce poca influencia sobre la dinámica de este, pese a ser el ion Cl^- muy móvil tanto en el xilema como en el floema mientras que el anión SO_4^{2-} presenta una movilidad mucho más limitada.
10. Al final del ciclo de cultivo, la diferencia en biomasa de los tratamientos deficientes en calcio se centra en los frutos, las partes vegetativas, especialmente los tallos secundarios, continúan desarrollándose con vigor.
11. Hay aproximadamente 10 veces más Ca total en todos los tratamientos y fechas de muestreo en hojas maduras que en jóvenes, guardando los contenidos el orden siguiente: $\text{C} > \text{Cl}^- \frac{1}{2} \approx \text{SO}_4^{2-} \frac{1}{2} > \text{Cl}^- \frac{1}{4} \approx \text{SO}_4^{2-} \frac{1}{4} > \text{Q} \frac{1}{2} > \text{Q} \frac{1}{4}$. El mismo orden que se observa en producción de frutos y biomasa vegetal.
12. Los niveles de calcio en las distintas fracciones de la planta siguen el orden siguiente: Hojas (Lámina > Pecíolos) > Zarcillos > Raíz > Ápices de crecimiento > Tallos > Flores > Frutos (Corteza > Pulpa > Jugo).
13. Los tratamientos con Ca-EDTA presentan valores muy inferiores al resto y ni tan siquiera son capaces de producir fruta. No parece adecuado el uso de correctores comerciales de deficiencia cálcica a base de Ca-EDTA, ya que esta forma presenta una enorme estabilidad y dificulta la absorción y transporte del Ca en el interior de la planta.

5. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA PRESENTE TESIS DOCTORAL

Esta tesis engloba una serie de trabajos publicados, que constituyen la mayor parte de los resultados expuestos, junto a multitud de experiencias e investigaciones que complementan el objeto del presente trabajo. Las referencias completas de los artículos que incluyen el cuerpo de la tesis y otras no completamente incluidas, que se han derivado de la realización de la presente tesis doctoral, son referidas a continuación.

5.1. PUBLICACIONES EN REVISTAS LISTADAS EN EL JCR

- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C. 1997. Hydric and Nutrient Element Nutrition of a Tomato Crop on Rockwool: Ionic Interrelationship. *Journal of Plant Nutrition*, 20(12): 1811-1828.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; ROMOJARO, F. & MOLINA, E. 1998. Calcium forms in leaves of muskmelons (cv. Revigal) plants tested with different calcium compounds. *Journal of Plant Nutrition*, 21(9): 1897-1912.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & GUILLÉN, I. 1999. Calcium deficiency provoked by the application of different forms and concentrations of Ca^{+2} to soil-less cultivated muskmelons. *Scientia Horticulturae*, 81: 89-102.
- MADRID, R.; NAVARRO, F.; COLLADOS, I.; EGEA, C. & ALARCÓN, A. L. 1999. Development of colour in red pepper fruits in soilless culture. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 74 (2): 175-180. F-Impacto: 0.608.

5.2. PUBLICACIONES EN LIBROS / REVISTAS NO LISTADOS EN EL JCR

- ALARCÓN, A. L. 1998. Fundamentos teóricos de la conductividad eléctrica. *Horticultura*, 128, Vol. XVII: 97-98. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1998. Concepto de pH e importancia en fertirrigación. *Horticultura*, 132, Vol. XVII: 46-49. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1998. Acidificación de soluciones nutritivas en fertirrigación. *Horticultura*, 129, Vol. XVII: 66-69. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1998. Modificaciones de conductividad eléctrica en fertirrigación. *Horticultura*, 130, Vol. XVII: 50-53. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1998. Abonado y salinidad en fertirrigación. *Horticultura*, 131, Vol. XVII: 90-95. ISSN: 1132-2950.

- EGEA, C.; MADRID, R.; ALARCÓN, A. L. & SÁNCHEZ, F. J. 1997. Nutrición hídrica y mineral en el cultivo de pepino (cv. Alaska) sobre lana de roca. Interrelación iónica. Información Técnica y Económica Agraria (ITEA), Vol. 93V Nº2: 104-115.
- ALARCÓN, A. L. & EGEA, C. 2000. Consumos hídricos en cultivos hortícolas sin suelo bajo invernadero. Horticultura, 145, Vol. XIX: 16-24. ISSN: 1132-2950.
- MADRID, R.; ROMOJARO, F.; MOLINA, E.; SÁNCHEZ, F. J. & ALARCÓN, A. L. 1997. La vitrescencia del melón. Agrícola Vergel, nº182, año XVI: 90-96. ISSN: 0211-2728.
- ALARCÓN, A. L. 1997. Fertilizantes para fertirrigación: tablas prácticas orientativas. En: Melones, Compendios de Horticultura 10: 201-213. ISBN: 84-87729-21-5. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Tarragona).
- ALARCÓN, A. L. & MADRID, E. 1997. Cultivo sin suelo con recirculado de lixiviados. Horticultura, 125, Vol. XVI: 42-47. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1999. La calidad del agua de riego para fertirrigación. Horticultura, 134, Vol. XVIII: 88-89. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1999. La calidad del agua de riego para fertirrigación. II Parte. Horticultura, 135, Vol. XVIII: 65-69. ISSN: 1132-2950.
- ALARCÓN, A. L. 1999. Calidad del agua de riego para fertirrigación. III Parte. Horticultura, 136, Vol. XVIII: 50-52. ISSN: 1132-2950.
- MADRID, R.; ALARCÓN, A. L.; EGEA, C. & BORONAT, M. 1999. Deficiencias de calcio en hortícolas y frutales. Agrícola Vergel, 206, año XVIII: 59-64. ISSN: 0211-2728.
- BRAÑAS, F. J.; CASTAÑÓN LION, G. & ALARCÓN, A. L. 2000. Recirculación de los lixiviados producidos en un cultivo de tomate. Riegos y Drenajes XXI, 112, año XV: 60-62. ISSN: 0213-3660.
- ALARCÓN, A. L. 2001. Manejo de la solución nutritiva y diagnóstico en cultivos sin suelo. Jornadas 12: II Jornadas Técnicas sobre cultivos sin suelo. Págs: 69-93. Dep. Legal: MU-1281-2001. Edita: Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia.
- ALARCÓN, A. L.; JUSTRIBÓ, X. & GONZÁLEZ, L. M. 2006. Bases prácticas para optimizar la asimilación del calcio. Fruticultura Profesional, nº 161: 49-60. ISSN: 1131-5660.

5.3. COMUNICACIONES EN CONGRESOS Y SIMPOSIUMS

- MADRID, R.; ALARCÓN, A. L.; MURCIA, F.; EGEA, C. & COLLADOS, I. "Programación de la nutrición hídrica y mineral del pepino (var. Alaska) en cultivo sin suelo". V Simposium Nacional y I Ibérico sobre la Nutrición Mineral de las Plantas. Badajoz. 1994.

- MADRID, R.; ALARCÓN, A. L.; EGEA, C. & COLLADOS, I. "Programación de la nutrición hídrica y mineral del tomate (var. Rambo) en cultivo sin suelo". VI Congreso de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. Barcelona. 1995.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & RINCÓN, L. 1997. "Respuesta del melón Galia (cv. Revigal) sobre lana de roca, a diferentes aguas de riego y zonas de cultivo". II Congreso Iberoamericano y III Ibérico de Ciencias Hortícolas. Vilamoura, El Algarve (Portugal). 1997.
- SÁNCHEZ, F. J.; PRETEL, M. T.; ROMOJARO, F.; MADRID, R. & ALARCÓN, A. L. "Distribución del calcio en variedades de melón Cantaloup bajo fertirrigación. Calidad del fruto". I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. Murcia. 1997.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & VARÓ, P. "Consumos de agua y nutrientes de dos cultivos de melón Galia sobre lana de roca con diferente calidad de agua de riego". I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. Murcia. 1997.
- SÁNCHEZ, F. J.; MADRID, R.; ROMOJARO, F.; & ALARCÓN, A. L. "Consumo hídrico y macronutrientes en melón Cantaloup bajo fertirrigación". I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. Murcia. 1997.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & SÁNCHEZ, F. J. "Formas de calcio en melón tipo Galia bajo condiciones adversas para la absorción del calcio". V Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal, XII Reunión Nacional de la SEFV. Córdoba. 1997.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C. "Evolución del contenido en macronutrientes en hojas jóvenes y maduras de melón tipo Galia sobre lana de roca". VII Simposio Nacional y III Ibérico sobre Nutrición Mineral de las Plantas. Madrid. 1998.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C. "Consumos hídricos en plantas de melón, tomate y pepino bajo invernadero en cultivo sin suelo". IV Simposium Hispano - Portugués sobre Relaciones Hídricas en las Plantas. Murcia. 1998.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & BRAÑAS, F. J. "Modelo de cultivo sin suelo con recirculado integral de lixiviados". VI Jornadas del Grupo de Horticultura de la SECH. Almería. 1998.
- EGEA, C.; MADRID, M.; ALARCÓN, A. L.; CONESA, J. J. & BRAÑAS, F. J. "Consumo de agua y producción en cultivo de tomate en dos sustratos diferentes con recirculado de lixiviados en cultivo sin suelo". VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Murcia. 1999.
- BRAÑAS, F. J.; ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C. "Producción y consumos de agua y fertilizantes (NPK) en un sistema con recirculado integral de drenajes". VIII Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Murcia. 1999.
- BRAÑAS, F. J.; CASTAÑÓN LION, G. & ALARCÓN, A. L. "Recirculación de los lixiviados producidos en un cultivo de tomate". XVII Congreso Nacional de Riegos. Murcia. 1999.

- EGEA, C.; MADRID, R.; ALARCÓN, A. L.; ALBURQUERQUE, J. A. & GUILLÉN, I. "Consumo de N-P-K en cultivo de tomate en dos sustratos diferentes con recirculado de lixiviados en cultivo sin suelo". VI Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal y XIII Reunión de la SEFV. Sevilla. 1999.
- ALARCÓN, A. L.; EGEA, C.; BRAÑAS, F. J. & FAZ, A. "Macroelements uptake and ionic interrelationships of a tomato soilless crop in recirculating system". International Symposium on Protected Cultivation in Mild Winter Climates: Current Trends for Sustainable Technologies. Cartagena (Murcia) y Almería. 2000.
- EGEA, C.; MADRID, R.; ALARCÓN, A. L. & ALBURQUERQUE, J. A. "Consumo de agua en cultivo de tomate en dos sustratos diferentes. Influencia del aporte de CO₂". Congreso nacional sobre gestión del agua en cuencas deficitarias. Orihuela (Alicante). 2000.
- EGEA, C.; MADRID, R.; ALBURQUERQUE, J. A. & ALARCÓN, A. L. "Consumo de macronutrientes en tomate (var. Durina) en cultivo hidropónico con recirculación". VIII Simposio Nacional y IV Ibérico sobre Nutrición Mineral de las Plantas. Murcia. 2000.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ABAD, M. & NOGUERA, P. 1997. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Manual de Cultivo sin suelo. Ed. Universidad de Almería. Págs.: 101-150.
- ABRISQUETA, C.; ARTÉS, F. & ROMERO, M. 1962. Estudio crítico del método de Bower y Huss para la determinación de yeso en suelos calizos de Murcia. An. Edafol. y Agrobiol. 21: 531-538.
- ABUTALYBOV, M. G. 1956. Distribution du calcium chez les végétaux. Fiziol. Rasten. S. S. S. R. 3, 306-312.
- ADAMS, P. & HAND, D. J. 1993. Effects of humidity and Ca level on dry-matter and Ca accumulation by leaves of cucumber (*Cucumis sativus* L.). Journal of Horticultural Science. 68(5): 767-774.
- ADAMS, P. & HO, L. C. 1992. The susceptibility of modern tomato cultivars to blossom-end rot in relation to salinity. Journal of Horticultural Science. 67: 827-839.
- ADAMS, P. & HO, L. C. 1993. Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and the incidence of blossom end rot. Plant and Soil. 154: 127-132.
- ADAMS, P. & HOLDER, R. 1992. Effects of humidity, Ca and salinity on the accumulation of dry matter and Ca by the leaves and fruit of tomato (*Lycopersicon esculentum*). Journal of Horticultural Science. 67: 137-142.
- ADAMS, P.; GRAVES, C. J. & WINSOR, R. C. W. 1989. Some responses of cucumber, grown in beds of peat, to micronutrients and pH. J. Hort. Sci. 64(3): 293-299.
- AGÜI, L.; ÁLVAREZ- TINAUT, M. C. & RECALDE, L. 1979. Efecto de la proporción K, Ca y Mg en la solución nutritiva sobre la absorción y distribución de micronutrientes. Anales de Edafología y Agrobiología XXXVIII: 267-281.
- ALAN, R. 1989. The effect of nitrogen nutrition on growth, chemical composition and response of cucumber to nitrogen forms in solution culture. J. Hort. Sci. 64(4): 467-474.
- ALARCÓN, A. L. & FUENTES, S. 2017. Melón. En: Cultivos hortícolas al aire libre (Coord. J. V. Maroto & Baixauli, C.): 569-592. Edita: Cajamar Caja Rural.
- ALARCÓN, A. L. & MADRID, E. 1997. Cultivo sin suelo con recirculado de lixiviados. Horticultura, 125: 42-47.
- ALARCÓN, A. L. & URRESTARAZU, M. 2006. Cultivo en coco. En: Cultivos Sin Suelo. Pág.: 117-130. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- ALARCÓN, A. L. 1996. El cultivo hidropónico de hortalizas tempranas. 4ª Ponencia del I Fórum Internacional de Agricultura y Tecnología, FITECH' 96. Valencia.
- ALARCÓN, A. L. 1998. Tendencias de la fertirrigación española. Horticultura nº 133: 38-51.
- ALARCÓN, A. L. 2006. Proyectos en Cultivos Sin Suelo: ¿Cómo empezar? En: Cultivos Sin Suelo. Pág.: 11-21. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- ALARCÓN, A. L. 2013. Fertirrigación práctica. Edita: Disagro, Guatemala. 302 pp.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R. & EGEA, C. 1996. El rumple del limón: descripción y factores influyentes. Levante Agrícola: 356-364.
- ALARCÓN, A. L.; MADRID, R.; EGEA, C. & RINCÓN, L. 1997. Respuesta del melón Galia (cv, Revigal) sobre lana de roca, a diferentes aguas de riego y zonas de cultivo. Actas de Horticultura 16: 91-97.
- ALLAN, E. & HEPLER, P. K. 1989. Calmodulin and calcium-binding proteins. En: Marcus, A. (ed) The Biochemistry of Plants. Volume 15, Molecular Biology. London, UK; Academic Press, pp. 455-484.

- ARMSTRONG, M. J. & KIRKBY, E. A. 1979. The influence of humidity on the mineral composition of tomato plants with special reference to Ca distribution. *Plant and Soil*. 52: 427-435.
- ASHBY, D. L. 1969. Washing techniques for the removal of nutrient element deposits from the surface of apple, cherry and peach leaves. *S. Amer. Soc. Hort. Sci.* 94: 266-268.
- ATKINSON, C. J.; MANSFIELD, T. A.; KEAN, A. M. & DAVIES, W. J. 1989, Control of stomatal aperture by calcium in isolated epidermal tissue and whole leaves of *Commelina communis* L. *New Phytol.* 111: 9-17.
- BAKER, J. C. & SONNEVELD, C. 1988. Calcium deficiency of glasshouse cucumber as affected by environmental humidity and mineral nutrition. *J. Hort. Sci.* 63:214-246.
- BAKER, J. C. 1984. Physiological disorders in cucumber under high humidity conditions and low ventilation rates in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 156: 257-264.
- BALIGAR, V. C.; KINRAIDE, T. B.; WRIGHT, R. J.; BENNET, O. L. & SMEDLEY, M. D. 1987. Aluminium effects of growth and P, Ca and Mg uptake efficiency in red clover cultivars. *J. Plant Nutr.* 10(0-16): 1131-1137.
- BANGERTH, F. 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Annu. Rev. Phytopathol.* 17: 97-122.
- BANGERTH, F.; DILLEY, D. R. & DEWEY, D. H. 1972. Effect of postharvest calcium treatment on internal breakdown and respiration of apple fruit. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 97: 679-682.
- BATTEY, N. H. 1990. Calcium deficiency disorders of fruits and vegetables. *Postharvest News and Information*. Vol. 1. Nº 1: 23-27.
- BAUGERTH, F. 1979. Calcium-related physiological disorders of plants. *Annu. Rev. Phytopath.* 17: 97-122.
- BES, W. & WESTON, L. A. 1991. Nutrient accumulation and tipburn in NFT-grown lettuce at several potassium and pH levels. *HortScience* 27(7): 790-792.
- BHAT, M. Y., AHSAN, H.; BANDAY, F. A.; DAR, M. A.; IMTIYAZ WANI, A. & HASSAN, G. I. 2012. Effect of harvest dates, preharvest calcium sprays and storage period on physico-chemical characteristics of pear cv. Bartlett. *E3 Journal of Agricultural Research and Development* 4: 101–106.
- BHELLA, H. 1985. Muskmelon growth, yield and nutrition as influenced by planting method and trickle irrigation. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 110(6): 793-796.
- BLANCO, V. V. & PRATT, H. K. 1977. Compositional changes in muskmelons during development and in response to ethylene treatment. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, núm. 102(2): 127-133.
- BLANKE, M. M. 1986. Comparative SEM study of stomata on developing quince, apple, grape and tomato fruit. *Angewandte Botanik*. 60: 209-214.
- BOGLE, C. & HARTZ, J. 1986. Comparison of drip and furrow irrigation for muskmelon production. *HortScience* 21(2): 424-244.
- BOULARD, T. & JEMAA, R. 1993. Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Horticulturae*. 335: 381-387.
- BRADFIELD, E. G. & GUTTRIDGE, C. G. 1984. Effects of night-time humidity and nutrient solution concentration on the calcium of tomato fruit. *Scientia Hortic.* 22: 207-217.
- CABANNE, C. & DONECHE, B. 2001. Changes in polygalacturonase activity and calcium content during ripening of grape berries. *Am. J. Enol. Vitic.* 52, 331–335.
- CACHORRO, P.; ORTÍZ, A. & CERDÁ, A. 1994. Implications of calcium nutrition on the response of *Phaseolus vulgaris* L. to salinity. *Plant Soil* 159: 205-212.
- CADAHÍA, C. 1988. Fertilización en riego por goteo en cultivos hortícolas. Ed. Egraf, S. A. Madrid.

- CÁNOVAS, F. 1993. Principios básicos de la hidroponía. Aspectos comunes y diferenciales de los cultivos con y sin suelo. En: Cultivos sin suelo. Curso Superior de especialización. FIAPA. Págs.: 29-42.
- CANTERA, A. 2006. Cultivo en perlita. En: Cultivos Sin Suelo. Pág.: 99-116. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- CANTLIFEE, D. J. 1977. Nitrogen fertilizers requeriments of pickling cucumbers grown for once-over harvest. I. Effects of yield and fresh quality. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 102(2): 112-114.
- CARPENA, O.; CADAHÍA, C.; LUQUE, A. & CASTELLANO, E. 1980. Effect of sodium on cationic relations in tomato plants. Proceedings of the 5th International Colloquium of the Control Plant Nutrition. Italia 1:242-247.
- CARPENA, O.; LEÓN, A.; LLORENTE, S. & DE LA PEÑA, C. 1972. Fracciones de calcio en limonero y su relación con la clorosis férrica. IIIth Colloque Europeen et Mediterranéen sur le controle de l'alimentation des Plantes cultivees. Budapest. Vol. I, 489-497.
- CARPENA, O.; LEÓN, A.; LLORENTE, S. & DE LA PEÑA, C. 1973. Estudio de fracciones de calcio en limonero Verna. En: Proceedings of the I International Citrus Congress, Murcia, Spain. Vol. I, pp. 171-176.
- CASELLES, L; ZORNOZA, P. & CARPENA, O. 1988. Efecto de la relación NO₃⁻/NH₄⁺ en la composición mineral de plantas de tomate y pimiento cultivadas en ambiente controlado. Anales de Edafología y Agrobiología XLVIII: 941-950.
- CASTILLA, N. & BRETONES, E. 1983. El pepino en invernadero. Ed. Caja Rural Provincial, Almería. 61 pp.
- CASTILLA, N.; BRETONES, E. & LÓPEZ-GÁLVEZ, J. 1990. Caracterización del cultivo de pepino en invernadero en Almería. ITEA. 86 V (3): 131-141.
- CASTILLA, N.; ELÍAS, F. & FERERES, E. 1990. Evotraspiración de cultivos hortícolas en invernadero en Almería. Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetal. 5(1): 117-125.
- CERDÁ, A. & ROORDA VAN EYSINGA, J. P. N. L. 1981. Tomato plant growth as affected by horizontally unequal osmotic concentrations in rockwool. Netherlander J. Agric. Sci 29: 189-197.
- CIRULLI, M. & CICCARESE, F. 1981. Effect of mineral fertilizers on the incidence of blossom-end rot of watermelon. Phytopathology. 71: 50-53.
- CLARK, C. J. & SMITH, G. S. 1991. Seasonal changes in the form and distribution of calcium in fruit of kiwifruit vines. Journal of Horticultural Science, 66 (6) 747-753.
- CLARK, C. J.; SMITH, G. S. & WALKER, G. D. 1987. The form, distribution and seasonal accumulation of calcium in kiwileaves. New Phytologist, 105, 477-86.
- CLEARWATER, M. J.; LUO, Z. W.; ONG, S. E. C.; BLATTMANN, P. & THORP, T. G. 2012. Vascular functioning and the water balance of ripening kiwifruit (*Actinidia chinensis*) berries. J. Exp. Bot. 63, 1835–1847.
- COCKSHUIL, K. E.; GRAVES, C. J. & CAVE, C. R. J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. J. Hort. Sci. 67(1): 11-24.
- COLMER, T. D.; FAN, T. W. M.; HIGASHI, R. M. & LÄUCHLI, A. 1996. Interactive effects of Ca²⁺ and NaCl salinity on the ionic relations and proline accumulation in the primary root tip of *Sorghum bicolor*. Physiol. Plant. 97: 421-424.
- COMBRINK, N. J. J.; JACOBS, G. & MAREE, P. C. J. 1995. The effect of calcium and boron on the quality of muskmelons (*Cucumis melo* L.). J. S. Afr. Soc. Hort. Sci. 5(1): 33-38.

- COMITÉ INTER-INSTITUTS D'ETUDE DES TECHNIQUES ANALYTIQUES DU DIAGNOSTIC FOLIARE. 1969. Méthodes de référence pour la détermination des éléments minéraux dans les végétaux, oleagineux, 24: 497-504.
- CONN, S. J.; GILLIHAM, M.; ATHMAN, A.; SCHREIBER, A. W.; BAUMANN, U. & MOLLER, I. 2011. Cell-specific vacuolar calcium storage mediated by CAX1 regulates apoplastic calcium concentration, gas exchange, and plant productivity in *Arabidopsis*. *Plant Cell* 23, 240–257.
- COOLONG, T.; MISHRA, S.; BARICKMAN, C. & SAMS, C. 2014. Impact of supplemental calcium chloride on yield, quality, nutrient status, and postharvest attributes of tomato. *J. Plant Nutr.* 37, 2316–2330.
- CRAMER, G. R.; EPSTEIN, E. & LAÜCHLI, A. 1989. Na-Ca interactions in barley seedlings: relationship to ion transport and growth. *Plant, Cell and Environment* 12(5): 551-558.
- CRAMER, G. R.; EPSTEIN, E. & LAÜCHLI, A. 1990. Effects of sodium, potassium and calcium on salt-stressed barley. I. Growth Analysis. *Physiol. Plant.* 80: 83-88.
- CRESSWELL, G. C. 1991. Effect of lowering nutrient solution concentration at night on leaf calcium levels and the incidence of tipburn in lettuce (var. Gloria). *Journal of Plant Nutrition*, 14:9 pp 913 - 924.
- CUNNINGHAM, D. 1998. Everything old is new again: the return of the Gericke system. En: *The Best of Practical Hydroponics and Greenhouses*. Ed. Casper Publications. Págs.: 58-59.
- CHAPMAN, H. D. & PRATT, P. E. 1979. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Ed. Trillas, S.A., México. 195 pp.
- CHEUNG, W. Y. 1980. Calmodulin plays a pivotal role in cellular regulation. *Science* 207: 19-27.
- CHOAT, B.; GAMBETTA, G. A.; SHACKEL, K. A. & MATTHEWS, M. A. 2009. Vascular function in grape berries across development and its relevance to apparent hydraulic isolation. *Plant Physiol.* 151, 1677–1687.
- DANE, F. & TSUCHIYA, T. 1976. Chromosome studies in the genus *Cucumis*. *Euphytica* 25: 367-374.
- DAYOD, M.; TYERMAN, S. D.; LEIGH, R. A. & GILLIHAM, M. 2010. Calcium storage in plants and the implications for calcium biofortification. *Protoplasma* 247, 215–231.
- DE FELIPE, M. R. & SÁNCHEZ, M. P. 1984. Estudio de la composición mineral y ultraestructura de la hoja de plantas de tomate (*lycopersicum esculentum* Mill.) sometidas a diferentes presiones osmóticas y niveles de calcio. *Anales de Edafología y Agrobiología*, 43: 269-282.
- DE FREITAS, S. T. & MITCHAM, E. J. 2012. Factors involved in fruit calcium deficiency disorders. In *Horticultural Reviews*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.: 107–146.
- DE FREITAS, S. T.; MCELDRONE, A. J.; SHACKEL, K. A. & MITCHAM, E. J. 2014. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments. *J. Exp. Bot.* 65, 235–247.
- DE GRAAF, R. 1988. Automation of water supply of glasshouse crops by means of calculating their transpiration and measuring the amount of drainage water. *Acta Horticulturae*, 229: 219-231.
- DEKOCK, P. C.; DYSON, P. W.; HALL, A. & GRABOWSKA, F. 1975. Metabolic changes associated with calcium deficiency in potato sprouts. *Potato Re.* 18: 573-581.
- DEULOFEU, C. 1997. Situación y perspectivas del melón en el mundo. En *Melones, Compendios de Horticultura* nº 10. Ed. Ediciones de Horticultura S. L. Págs.: 21-24.
- DODD, A. N.; KUDLA, J. & SANDERS, D. 2010. The language of calcium signalling. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61, 593–620.

- DONNAN, R. 1994. Nutrient management in hydroponic systems. *Practical Hydroponics and Greenhouses*, nº 16.
- DRAZETA, L.; LANG, A.; HALL, A. J.; VOLZ, R. K. & JAMESON, P. E. 2004. Causes and effects of changes in xylem functionality in apple fruit. *Ann. Bot.* 93, 275–282.
- DU, Y. C.; ZHANG, E. M. & LIU, B. Z. 1989. Effects of nitrogen type on growth, development, yield and composition of cucumbers grown in sand culture. *Acta Hort. Sin.* 16(1): 45-50.
- DUARTE, A. M. M. & GUARDIOLA, J. L. 1995. Aplicaciones del calcio en citricultura. *Levante Agrícola*, 2º Tr.: 117-124.
- DUMAS DE VAULX, R. & AUBERT, C. 1977. Test de fermeté non destructif pour controller la maturité du melon. *Ann. Technol. Agricole*, 27 (3): 243-254.
- EHRET, D. L. & HO, L. C. 1986. Translocations of calcium in relation to tomato fruit growth. *Annals of Botany*. 58: 679-788.
- ESCOBAR, I. 1995. Cultivo de melón en sustratos bajo las condiciones del Sudeste español. Resúmenes del VI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Barcelona. Pág.: 195.
- EVANS, D. E. 1988. Regulation of cytoplasmic free calcium by plant cell membranes. *Cell Biology International Reports*. 12: 383-396.
- FARADAY, M.; HITTORF, J. W.; KOHLRAUSCH, F. W. G.; GOODWIN, H. M. 1899. The Fundamental Laws of Electrolytic Conduction: Memoirs by Faraday, Hittorf and F. Kohlrausch. Publisher Harper & brothers. London.
- FEIGIN, A.; RYLSKI, I. & SHALHEVET, J. 1984. Responses of melon plants to different combinations of nitrate and chloride in saline nutrient solutions. In: *Soil salinity under irrigation. Processes and management. Conferences. Inter Soc. Soil Sci. Bet Dagan. Israel*.
- FENN, L. B. & WU, E. 1987. Effect of ammonium fertilizer on NH₃ loss and Ca, Mg, ammonium and nitrate content in a calcareous soil solution. *Biology and Fertility of Soils*, 5 (2): 161-174.
- FLORIÁN, P. & ABAD, M. 1993. Sistemas actuales de cultivo sin suelo. Posibilidades de aplicación en España. *Revista Hortofruticultura IV* (7/8): 21-29.
- FRANCO, J. A.; ESTEBAN, C. & RODRÍGUEZ, C. 1993. Effects of salinity on various growth stages of muskmelon cv. Revigal. *Journal of Horticultural Science*. 68 (6): 899-904.
- FRENKEL, H.; GERSTL, Z. & ALPEROVITCH, N. 1989. Exchange-induced dissolution of gypsum and the reclamation of sodic soils. *J. Soil Science*. 40(3): 599-611.
- FROST, D. J. & KRETCHMAN, D. W. 1989. Calcium deficiency reduces cucumber fruit and seed quality. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 114: 552-556.
- FUNKHOUSER, E. A.; CAIRNEY, J.; CHANG, S.; DILIP, M. A.; DIAS, L.; NEWTON, R. J. & ARTLIP, T. S. 1993. Cellular and molecular responses to water deficit stress in woody plants. *En Handbook of Plant and Crop Stress*. Ed. M. Pessarakli. pp. 347-362. Marcel Dekker Inc., New York.
- GALLAHER, R. N. & JONES, J. B. 1976. Total, extractable and oxalate calcium and other elements in normal and mouse ear pecan tree tissue. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101: 692-696.
- GANMORE-NEUMANN, R. & DAVIDOV, S. 1993. Uptake and distribution of calcium in rose plantlets as affected by calcium and boron concentration in culture solution. En Barrow N. J., eds, *Plant Nutrition, from genetic engineering to field practise*, Kluwer Academic Pub, Dordrecht, pp 165-168.
- GÁRATE, A.; PEÑALOSA, J. M.; DEL BARRIO, A. & DE LA TORRE, F. 1987. Aplicaciones de calcio como corrección de la podredumbre apical del tomate en condiciones de salinidad.

- Proceedings of the 7th National Congress of Chemistry (Agricultural and Food Chemistry) 2: 21-26, Sevilla, Spain.
- GARCÍA, A. 2006. Cultivo en lana de roca. En: Cultivos Sin Suelo. Pág.: 91-98. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- GAVALAS, N. & MANETAS, Y. 1980. Calcium inhibition of phosphoenolpyruvate carboxylase. Possible physiological consequences for 4-carbon-photosynthesis. Z. Pflanzenphysiol. 100: 179-184.
- GERICKE, W. F. 1929. Aquaculture: a means of crop production. American Journal of Botany. 79: 862-868.
- GERICKE, W. F. 1937. Hydroponics Crop Production in Liquid Culture Media. Science. 85: 177.
- GERICKE, W. F. 1938. Crop Production without soil. Nature Lond. 141: 536-540.
- GERICKE, W. F. 1940. The complete guide to soilless gardening. Prentice-Hall. New York.
- GILROY, S.; BLOWERS, D. P. & TREWAVAS, A. J. 1987. Calcium: a regulation system emerges in plant cells. Development. 100: 181-184.
- GILLIHAM, M.; DAYOD, M.; HOCKING, B. J.; XU, B.; CONN, S. J. & KAISER, B. N. 2011. Calcium delivery and storage in plant leaves: exploring the link with water flow. J. Exp. Bot. 62, 2233-2250.
- GISLERØD, H. R. & ADAMS, P. 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirements of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. Sci. Hort. 21: 311-321.
- GÖHLER, F.; HEIBNER, A. & SCHMEIL, H. 1989. Control of water and nutrient supply in greenhouse vegetable production by means of hydroponic systems. Acta Horticulturae. 260: 237-246.
- GÓMEZ, J. 1993. Enfermedades del melón en los cultivos "sin suelo" de la provincia de Almería. Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Comunicación I+D Agroalimentaria 3/93. 64 pp.
- GÓMEZ-GUILLAMÓN, M. L.; CAMERO, R. & GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, J. J. 1997. El melón en invernadero. En: Melones, Compendios de Horticultura nº 10. Ediciones de Horticultura S. L. Págs.: 67-77.
- GREENLEAF, W. H. & ADAMS, F. 1969. Genetic control of blossom-end rot disease in tomatoes through calcium metabolism. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 94: 248-250.
- GRIER, J. D. 1966. Preparation of plant material for plant analysis. S. Ass. Pffic. Anal. Chem. 49: 292-298.
- HALLET, I. C. 1989. Calcium oxalate crystal in the flesh of kiwifruit. Proceedings of the New Zealand Society for Electron Microscopy. Fifteenth National Conference, S18.
- HANDBOOK OF CHEMISTRY AND PHYSICS. 1993. David R. Lide, Editor in Chief. 73rd Edition.
- HANSON, J. B. 1984. The functions of calcium in plant nutrition. En pb Tinker, A Läuchli, eds, Advances in Plant Nutrition, New York, pp. 149-208.
- HAWKINS, H-J. & LEWIS, O. A. 1993. Combination effect of NaCl salinity, nitrogen form and calcium concentration on the growth, ionic content and gaseous exchange properties of *Triticum aestivum* L. cv. Gamtoos. New Phytol. 124: 161-170.
- HEPLER, P. K. & WAYNE, R. O. 1985. Calcium and plant development. Ann. Rev. Plant. Physiol. 36: 397-439.
- HEPLER, P. K. & WINSHIP, L. J. 2010. Calcium at the cell wall-cytoplasm interface. J. Integr. Plant Biol. 52, 147-160.
- HILL, J. 1980. The remobilization of nutrients from leaves. J. Plant Nutr. 2: 407-444.

- HIMELRICK, D. G. 1981. Determination of the total and ionic calcium in apple leaf and fruit tissues. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 106, 619-21.
- HO, L. C. & ADAMS, P. 1994. The physiological basis for high fruit yield and susceptibility to calcium deficiency in tomato and cucumber. *Journal of Horticultural Science*. 69(2): 367-376.
- HO, L. C. & WHITE, P. J. 2005. A cellular hypothesis for the induction of blossom-end rot in tomato fruit. *Ann. Bot.* 95, 571–581.
- HO, L. C. 1989. Environmental effects on the diurnal accumulation of ^{45}Ca by young fruit and leaves of tomato plants. *Annals of Botany*. 63: 281-288.
- HO, L. C.; ADAMS, P.; LI, X. Z.; SHEN, H.; ANDREWS, J. & XU, H. 1995. Responses of Ca-efficient and Ca-inefficient tomato cultivars to salinity in plant growth, calcium accumulation and blossom end rot. *J. Hortic. Sci.* 70: 909-918.
- HO, L. C.; GRANGE, R.I. & PICKEN, A. J. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell and Environment*. 10: 157-162.
- HOCKING, B.; TYERMAN, S. D.; BURTON, R. A. & GILLIHAM, M. 2016. Fruit Calcium: Transport and Physiology. *Front. Plant Sci.* 7:569.
- HOCKING, P. J. 1980. The composition of phloem exudate and xylem sap from tree tobacco (*Nicotiana glauca* Grah.). *Ann. Bot.* 45, 633–643.
- HUMPHRIES, P. D. & DEVONALD, V. G. 1977. The distribution of potassium, calcium and magnesium in young tomato plants grown in water culture. *Plant Soil* 48: 435-445.
- JAUNIN, E. & HOFER, R. M. 1988. Calcium and rhizodermal differentiation in primary maize roots. *J. Exp. Bot.* 39: 587-593.
- JENSEN, M. H. & MALTER, A. J. 1995. Protected Agriculture: A Global Review. World Bank Technical Paper nº 253.
- JIANG, L. X.; YANG, S. L.; XIE, L. F.; PUAH, C. S.; ZHANG, X. Q. & YANG, W. C. 2005. Vanguard encodes a pectin methylesterase that enhances pollen tube growth in the *Arabidopsis* style and transmitting tract. *Plant Cell* 17, 584–596.
- KAFKAFI, U. 1984. Plant nutrition under saline conditions. In: Soil salinity under irrigation. Processes and management. *Ecological studies* 51: 319-331. En: I. Shaimberg and J. Shalshvet. Eds. Springer-Verlag. New York.
- KAUSS, H. 1987. Some aspects of calcium-dependent regulation in plant metabolism. *Annual Review of Plant Physiology*. 38: 47-72.
- KAZDA, M. & WEILGONY, P. 1988. Seasonal dynamics of major cations in xylem sap and needles of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) in stands with different soil solution chemistry. *Plant & Soil* 110(1): 91-100.
- KIRKBY, E. A. & MENGAL, E. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to to nitrate, urea or ammonium nutrition. *Plant Physiology* 42: 6 - 14.
- KIRKBY, E. A. & PILBEAM, D. J. 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant Cell & Environ.* 7: 397-405.
- KIRKBY, E. A. 1979. Maximizing calcium uptake. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 10: 89-113.
- KNEE, M. 1982. Fruit softening. III. Requirement for oxygen and pH effects. *Journal of Experimental Botany*. 33: 1263-1269.
- KNIPFER, T.; FEI, J.; GAMBETTA, G. A.; MCELDRONE, A. J.; SHACKEL, K. A. & MATTHEWS, M. A. 2015. Water transport properties of the grape pedicel during fruit development: insights into xylem anatomy and function using microtomography. *Plant Physiol.* 168, 1590–1602.
- KNOP, W. 1860. *Landwirtsch. Versuchs-Stat.* 2, 65 y 270.

- KOHNO, T. & SHIMMEN, T. 1988. Accelerated sliding of pollen tube organelles along *Characeae* actin bundles regulated by calcium. *Journal of Cell Biology*. 106: 1539-1543.
- KONRAD, K. R.; WUDICK, M. M. & FEIJO, J. A. 2011. Calcium regulation of tip growth: new genes for old mechanisms. *Curr. Opin. Plant Biol.* 14, 721–730.
- KRAMER, G. F.; WANG, C. Y. & CONWAY, S. 1991. Inhibition of softening by polyamine application in Golden delicious and McIntosh apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116: 813-817.
- KUDLA, J.; BATISTIC, O. & HASHIMOTO, K. 2010. Calcium signals: the lead currency of plant information processing. *Plant Cell* 22, 541–563.
- LAHAYE, P. A. & EPSTEIN, E. 1971. Calcium and salt toleration by bean plants. *Physiol. Plant.* 25: 213-218.
- LESTER, G. 1996. Calcium alters senescence rate of postharvest muskmelon fruit disks. *Postharvest Biology and Technology*. 7 (1/2): 91-96.
- LONERAGAN, J. F. & SNOWBALL, K. 1969. Calcium requirements of plants. *Australian J. Agric. Res.* 20: 465-478.
- LÓPEZ, J. J. & MARRERO, A. 1995. Efectos de los pretratamientos térmicos y las sales de calcio sobre la susceptibilidad al frío de los frutos de plátano. *Resúmenes del VI Congreso Nacional de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas*, Barcelona. Pág.: 169.
- LÓPEZ-CANTARERO, I. 1992. Influencia de la salinidad sobre indicadores bioquímicos en plantas de *Solanum melongena* L. cv. Bonica. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Granada.
- LORENZO, P. 1997. Gestión de la fertirrigación en los sistemas de cultivo en sustrato. Ponencia I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. *Actas de Horticultura*. 19: 151-162.
- LORENZO, P.; MEDRANO, E. & GARCÍA, M. 1996. Estudio comparativo de la eficiencia hídrica de dos sistemas de control de riego en sustrato. XIV Congreso Nacional de Riegos. D.G.I.A. Congresos y Jornadas. 37: 668-672.
- LU, Y. Q.; LIU, H. P.; WANG, Y.; ZHANG, X. Z. & HAN, Z. H. 2013. Synergistic roles of leaf boron and calcium during the growing season in affecting sugar and starch accumulation in ripening apple fruit. *Acta Physiol. Plant.* 35, 2483–2492.
- LUCENA, J. J. 1992. El calcio en la nutrición de las plantas. *Hortofruticultura* 10: 76-83.
- LUQUE, A.; CARPENA, O.; CADAHIA, C. & PALOMINO, E. 1980. Interrelationship $\text{Cl}^-/\text{NO}_3^-$ on nutrition of tomato plants. *Proceedings of the 5th International Colloquium of the Control Plant Nutrition*. Italia 1: 277-282.
- M. A. P. A. 1994. Métodos oficiales de análisis. Ed. Secretaría General Técnica del M.A.P.A., Madrid. 662 pp.
- MACKLON, A. E. S. & SIN, A. 1980. Electrophysiological factors in the influence of nitrate and ammonium ions on calcium uptake and translocation in tomato plant. *Plant Physiol.* 49: 449-454.
- MADRID, R.; ROMOJARO, F.; MOLINA, E.; SÁNCHEZ, F. J. & ALARCÓN, A. L. 1997. La vitescencia del melón. *Agrícola Vergel*, año XVI. 182: 90-96.
- MADRID, R.; VALVERDE, M.; ALCOLEA, V. & ROMOJARO, F. 2004. Influence of calcium nutrition on water soaking disorder during ripening of Cantaloupe melon. *Sci. Hortic.* 101, 69–79.
- MAGALHAES, J. R. & WILCOX, G. E. 1983. Tomato growth and mineral composition as influenced by nitrogen form and light intensity. *J. Plant Nutr.* 6(11): 911-939.
- MAJUMDAR, S. K.; CLINE, S. W. & ZELNICK, R. W. 1989. Chemical analysis of soils and oak trees tissues from two forest habitats in Pennsylvania differing in their sensitivity to acid precipitation. *Environ. Technol. Letters*. 10 (12): 1019-1026.

- MAKEYEV, A. O. & BERKGAUT, V. V. 1989. Weathering of silicates as a source of mineral nutrients for plants, as exemplified by soils with texturally-differentiated profile of the Komi ASSR. *Sov. Soil Sci.* 21 (3): 42-52.
- MARFÁ, O. 1996. Sistemas de microirrigación en horticultura intensiva. *H. F. Hortoinformación.* 78: 41-45.
- MAROTO, J. V. 1995. Horticultura Herbácea Especial. Ed. Mundi Prensa, 4ª edición. Madrid. 611 pp.
- MAROTO, J. V. 1997. Calendarios de producción en melón. En: *Melones, Compendios de Horticultura nº 10.* Ediciones de Horticultura S. L. Págs.: 51-57.
- MARSCHNER, H. 1983. General introduction into the mineral nutrition of plants. *Inorganic Plant Nutrition.* pp. 5-60. In: A. Laüchli and R. L. Bielecki (eds.), *Encyclopedia of Plant Physiology.* Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- MARSCHNER, H. 2012. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, 674 pp.
- MARTÍNEZ, E. & GARCÍA, M. 1993. Cultivos sin suelo: Hortalizas en clima mediterráneo. Ediciones de Horticultura S. L. Tarragona. 123 pp.
- MARTÍNEZ, V. & CERDÁ, A. 1987. Influencia de la fertilización nitrogenada en condiciones salinas en el cultivo de plantas de tomate y pepino. I. Rendimientos y calidad del fruto. *Anal. Edaf. Agrobiol.* XLVI, 1397-1408.
- MASON, J. 1990. Commercial Hydroponics. Ed. Kangaroo Press. Australia. 172 pp.
- MAZZEO, M.; DICHIO, B.; CLEARWATER, M. J.; MONTANARO, G. & XILOYANNIS, C. 2013. Hydraulic resistance of developing *Actinidia* fruit. *Ann. Bot.* 112, 197–205.
- MEIRI, A. & PLAUT, Z. 1981. Salt tolerance of glasshouse grown muskmelon. *Soil Sci.* 131: 189-193.
- MEIRI, A.; HOFFMAN, G.; SHANNON, M. & POSS, J. 1982. Salt tolerance of two muskmelon cultivars under two solar radiation levels. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 107: 1168-1172.
- MENDLINGER, S. & PASTERNAK, D. 1992. Effect of time of salinization on flowering, yield and fruit quality factors in melon *Cucumis melo* L. *J. Hort. Sci.* 67(4): 529-534.
- MENGEL, K. & KIRKBY, E. A. 1987. Principles of Plant Nutrition, 4th edn. International Potash Institute, Berne, Switzerland.
- MINAMIDE, T.; GOTO, M. & IWATA, T. 1986. Forms of calcium compounds and their changes after harvest in fruits and vegetables. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science.* 54 (4) 507-513.
- MONCRIEF, N.; KRETSINGER, R. & GOODMAN, M. 1990. Evolution of EF-hand calcium-modulated proteins. I. Relationships based on amino acid sequences. *J. Mol. Evol.* 30: 522-562.
- MONTANARO, G.; DICHIO, B. & XILOYANNIS, C. 2012. Fruit transpiration: mechanisms and significance for fruit nutrition and growth. In *Advances in Selected Plant Physiology Aspects*, ed. G Montanaro.
- MONTANARO, G.; DICHIO, B.; LANG, A.; MININNI, A. N.; NUZZO, V. & CLEARWATER, M. J. 2014. Internal versus external control of calcium nutrition in kiwifruit. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 177, 819–830.
- MORENO, J. F. 2006. Sistemas, dispositivos y automatismos para cultivo sin suelo. En: *Cultivos Sin Suelo.* Pág.: 11-21. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- MORGAN, L. 1998. In *Best of Practical Hydroponics & Greenhouses.* Ed. Casper Publications. Australia. Págs. 134-139.
- MOSTAFA, M. A. E. & ULRICH, A. 1976. Absorption, distribution and form of Ca in relation to Ca deficiency (tip burn) of sugarbeets. *Crop Sci.* 16: 27-30.

- MÜNGER, H. M. & ROBINSON R. W. 1991. Nomenclature of Cucumis melo L. Cucurbit Genet. Coop. Report nº 14: 43-45.
- MUSARD, M. & YARD, C. 1990. Melons à chair vitreuse: le point de la situation. P. H. M. Revue Horticole, nº 305. Pág. 57.
- NADIR, M. 1969. Les diferentes formes de calcium et les antagonismes K-Ca, K-Mg et Ca-Mg dans les feuilles d'agrumes. II Colloque Europeen et Mediterranéen. "Control de la fertilización de las plantas cultivadas". 435-447. Ed. C. E. B. A. C., Sevilla.
- NAKAMURA, Y.; TANAKA, K.; OHTA, E. & SAKATA, M. 1990. Protective effect of external Ca²⁺ on elongation and the intracellular concentration of K in intact mung bean roots under high NaCl stress. Plant Cell Physiol. 31: 815-821.
- NAREDO, J. M. & LÓPEZ-GÁLVEZ, J. 1992. Los cultivos bajo plástico en el área de Almería. Actas XII Congreso Internacional de Plásticos en Agricultura. Granada. B: 3-14.
- NAVARRO, V. 1997. La búsqueda de la larga vida en el melón. En: Melones, Compendios de Horticultura nº 10. Ediciones de Horticultura S. L. Págs.: 35-40.
- NERSON, H. & PARIS, H. S. 1984. Effects of salinity on germination, seedling growth and yield in melons. Irrigation Science, 5: 265-269.
- NISHIZAWA, T.; KOBAYASHI, T. & AIKAWA, T. 2004. Effect of calcium supply on the physiology of fruit tissue in 'Andesu' netted melon. J. Hortic. Sci. Biotechnol. 79, 500-508.
- NUKAYA, A.; MASUI, N. & ISHIDA, A. 1980. Salt tolerance of muskmelon grown different salinity soil. Journal of The Japanese Society for Horticultural Science. 48: 468-474.
- ODET, J. & DUMOULIN, J. 1993. Un accident physiologique complexe. La vitescence du melon. Infos- Ctifl, núm. 89: 31-34.
- ORTIZ, A.; MARTÍNEZ, V. & CERDÁ, A. 1994. Effects of osmotic shock and calcium on growth and solute composition of *Phaseolus vulgaris* plants. Physiologia Plantarum. 91: 468-476.
- OSMOND, C. B. 1967. Acid metabolism in Atriplex. I. Regulation in oxalate synthesis by the apparent excess cation absorption. Australian J. Biol. Sci. 20: 575-587.
- OSORIO, S.; CASTILLEJO, C.; QUESADA, M. A.; MEDINA-ESCOBAR, N.; BROWNSEY, G. J. & SUAU, R. 2008. Partial demethylation of oligogalacturonides by pectin methyl esterase 1 is required for eliciting defence responses in wild strawberry (*Fragaria vesca*). Plant J. 54, 43-55.
- PACHECO, A O.; HOCHMUTH, G. J.; MAYNARD, D. N.; CSIZINSZKY, A. A. & SARGENT, S. A. 1996. Abstracts of 93 rd Annual Conference of the American Society for Horticultural Science. Lexington, Kentucky, USA.
- PALZKILL, D. A.; TIBBITTS, T. W. & WILLIAMS, P. H. 1976. Enhancement of calcium transport to inner leaves of cabbage for prevention of tipburn. J. Am. Soc. Hort. Sci. 101: 645-648.
- PEET, M. ; RAPER, C. D. ; TOILEY, L. C. & ROBARGE, W. P. 1985. Tomato responses to ammonium and nitrate nutrition under controlled root-zone pH. J. Plant Nutr. 8(9): 787-798.
- PEÑALOSA, J. M. & SARRO, M. J. 1993. Aplicación de amonio, en diferentes períodos del ciclo de cultivo, a plantas de pepino. Actas de Horticultura, 11 Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas. Vol. 11, 1130-1135.
- PERRING, M. A. 1986. Incidence of bitter pit in relation to the calcium content of apples: problems and paradoxes. A review. Journal of the science of Food and Agriculture. 46: 439-448
- PETERSON, K. K. & WILLUMSEN, J. 1992. Effects of root-zone warming and season on blossom-end rot and chemical composition of tomato fruit. Danish Journal of Plant and Soil Science 96: 489-498.

- PIII, W. G. & LAMBERT, V. N. 1977. Effects of NH_4^+ and NO_3^- nutrition with and without pH adjustment on tomato growth, ion composition and water relations. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 102(1): 78-81.
- PLAVCOVA, L. & HACKE, U. G. 2011. Heterogeneous distribution of pectin epitopes and calcium in different pit types of four angiosperm species. *New Phytol.* 192, 885–897.
- PLOWRIGHT, C. B. 1881. On the fungoid diseases of the tomato. *Gard. Chronical* (London). 16: 620-622.
- POOVAIAH, B. W.; GLENN, G. M. & REDDY, A. S. N. 1988. Calcium and fruit softening: Physiology and biochemistry. *Horticultural Reviews*, 10, 107-152.
- POOVAIAH, B.W. 1988. Molecular and cellular aspects of calcium action in plants. *Hort. Science* 23(2): 267-271.
- POSADAS, F. M. 1993. El cultivo hidropónico del melón Galia. En: *Cultivos sin suelo. Curso Superior de especialización. FIAPA. Págs.: 321-327.*
- POZUELO, J. M. 1982. Anomalías inducidas por deficiencia de Ca o de Mg en raíces de plantas de *Zea mays* L. Observaciones de “visu” y a nivel celular. *An. Edaf. y Agrob.* 41, nº 9-10: 1957-1970.
- PRATT, H. K.; GOESCHL, J. D. & MARTIN, F. W. 1977. Fruit growth and developpment, ripening and the role of ethylene in the Honey-Dew muskmelon. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 102 (2): 203-210.
- RAMALHO, J. C.; REBELO, M. C. & NUNES, M. A. 1993. Efeitos da deficiencia de cálcio en algunas características fotossintéticas e de crescimento un *Coffea arabica*. *Garcia de Orta* 19.
- RAMALHO, J. C.; REBELO, M. C.; SANTOS, M. E.; ANTUNES, M. L. & NUNES, M. A. 1995. Effects of calcium deficiency on *Coffea arabica*. Nutrient changes and correlation of calcium levels with some photosynthetic parameters. *Plant Soil* 172: 87-96.
- RESH, H.M. 1997. *Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción.* Ed. Mundi-Prensa. pp. 509.
- RICHARDSON, P. T.; BAKER, D.A. & HO, L.C. 1982. The chemical composition of cucurbit vascular exudates. *Journal of Experimental Botany.* 33: 1239-1247.
- RIGNEY, C. J. & WILLS, R. B. H. 1981. Calcium movement, a regulating factor in the initiation of tomato fruit ripening. *Hort Science.* 16: 550-551.
- RINCÓN, L. 1991. Fertirrigación en cultivos hortícolas. En: *El agua y los fertilizantes. Fertirrigación localizada. Serie Congresos 3. Consejería de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Región de Murcia.* Editor científico R. Madrid. Págs.: 223-239.
- RINCÓN, L. 1997. Características y manejo de sustratos inorgánicos en fertirrigación. Ponencia I Congreso Ibérico y III Nacional de Fertirrigación. *Actas de Horticultura.* 19: 28-45.
- RINCÓN, L.; SÁEZ, J.; GÓMEZ, A; PELLICER, C. & MADRID, R. 1996. Growth and nutrient absorption by muskmelon under greenhouse conditions. *Acta Horticulturae.*
- ROBERTS, D.M. & HARMON, A.C. 1992. Calcium-modulated proteins: targets of intracellular calcium signals in higher plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 43: 375-414.
- ROGIERS, S. Y.; GREER, D. H.; HATFIELD, J. M.; ORCHARD, B. A. & KELLER, M. 2006a. Mineral sinks within ripening grape berries (*Vitis vinifera* L.). *Vitis* 45, 115–123.
- ROGIERS, S. Y.; GREER, D. H.; HATFIELD, J. M.; ORCHARD, B. A. & KELLER, M. 2006b. Solute transport into Shiraz berries during development and late-ripening shrinkage. *Am. J. Enol. Vitic.* 57, 73–80.
- ROGIERS, S. Y.; KELLER, M.; HOLZAPFEL, B. P. & VIRGONA, J. M. 2000. Accumulation of potassium and calcium by ripening berries on field vines of *Vitis vinifera* (L) cv, Shiraz. *Aust. J. Grape Wine Res.* 6, 240–243.

- ROUNDS, C. M.; LUBECK, E.; HEPLER, P. K. & WINSHIP, L. J. 2011. Propidium iodide competes with Ca^{2+} to label pectin in pollen tubes and *Arabidopsis* root hairs. *Plant Physiol.* 157, 175–187.
- RUSSELL, R. S. & CLARKSON, D. T. 1976. Ion transport in root systems. In: N. Sunderland: Perspectives in Experimental Biology. Vol. 2. Botany, p. 401-411, Pergamon Press, Oxford and New York.
- SACH, J. 1860. *Landwirtsch. Versuchs-Stat.* 2, 219 y 3, 30.
- SÁNCHEZ, M. P. 1982. Evaluación de la distribución de nutrientes en la planta de tomate (*Lycopersicon esculentum* L.) en dos estados de su ciclo vegetativo. *Anales de Edafología y Agrobiología XLI*: 713-719.
- SARRO, M. J.; CADAHÍA, C. & PEÑALOSA, J. M. 1986. Control de un cultivo hidropónico de tomate mediante correcciones periódicas de los nutrientes. Aplicaciones a invernaderos comerciales. *Anales de Edafología y Agrobiología XLV*: 729-738.
- SCOTT, W. D.; Mc CRAW, B. D.; MOTES, J. E. & SMITH, M. W. 1993. Application of calcium to soil and cultivar affect elemental concentration of watermelon leaf and rind tissue. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 118 (2): 201-206.
- SCHALLER, G. E. & SUSSMAN, M. R. 1988. Phosphorylation of the plasma-membrane H^+ -ATPase of oat roots by calcium-stimulated protein kinase. *Planta.* 173: 509-518.
- SHANNON, M. & FRANCOIS, L. 1978. Salt tolerance of three muskmelon cultivars. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 103: 127-130.
- SHMUELI, M. & GOLDBERG, D. 1971. Sprinkle, furrow and trickle irrigation of muskmelon in a arid zone. *Hortscience*, 6: 557-559.
- SLUTZKY, B.; GONZÁLEZ-ABREU, A. & BERDAM, I. 1981. Chilling injury related to mineral composition of grapefruit and limes during cold storage. *Proc. Int. Soc. Citricult.* 2: 779-782.
- SØRENSEN, S. 1909. Enzymstudien II: Über die Messung und die Bedeutung der Wasserstoffionenkonzentration bei enzymatischen Prozessen. *Biochem. Zeit*, 21, 131-200. See especially p. 134.
- STANGHELLINI C. & VAN MEURS, W. T. M. 1989. Crop transpiration: a greenhouse climate control parameter. *Acta Horticulturae*, 254.
- STAUB, J. E.; ROUSOS, P. & STRUCKMEYER, B. E. 1988. Anatomical characterization and possible role of calcium in "Pillow", a fruit disorder in processing cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science.* 113: 905-909.
- STEER, M. W. & STEER, J. M. 1989. Pollen tube tip growth. *New Phytologist.* 111: 323-358.
- TAYLOR, M. D. & LOCASCIO, S. J. 2004. Blossom-end rot: a calcium deficiency. *Journal of Plant Nutrition* 27, 123 – 139.
- THOMAS, R. S. & STAUB, J. E. 1992. Water stress and storage environment affect pillow fruit disorder in cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science.* 117: 394-399.
- TILBROOK, J. & TYERMAN, S. D. 2009. Hydraulic connection of grape berries to the vine: varietal differences in water conductance into and out of berries, and potential for backflow. *Funct. Plant Biol.* 36, 541–550.
- TORRES, J. M. 1997. Los tipos de melón comerciales. En: Melones, Compendios de Horticultura. nº 10. Ed. Ediciones de Horticultura S. L. Págs.: 13-19.
- TROMP, J. & VAN VUURE, J. 1993. Accumulation of calcium, potassium and magnesium in apple fruits under various conditions of humidity. *Physiol. Plant.* 89: 149-156.

- TURNER, N. A. 1980. Micro-determinación of oxalate in crude extracts of plant tissues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 31, 171-6.
- ULRICH, A. & HILLS, E. J. 1967. Principles and practices of plants analysis, pp. 28-33. In *Soil testing and plant analysis*, Part 11, SSSA Special Publ. Series nº2, Soil Sci. Soc. of Amer. Madison, Wisc.
- URRESTARAZU, M.; MAZUELO, P. C. & ALARCÓN, A. L. 2006. Cultivo en sustratos alternativos. En: *Cultivos Sin Suelo*. Pág.: 11-21. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- URRESTARAZU, M. 2006. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. En: *Cultivos Sin Suelo*. Pág.: 23-42. Edita: Ediciones de Horticultura S. L. (Reus, Tarragona).
- VALENZUELA, J. L.; SÁNCHEZ, A. & ROMERO, L. 1994. Influencia de la fertilización N, P y K sobre las fracciones de calcio en plantas de melón. I Simposium Internacional sobre la nutrición mineral de las plantas. Badajoz. 390-394.
- VALENZUELA, J. L.; SÁNCHEZ, A.; DEL RÍO, A. & ROMERO, L. 1992. Relationships between nitrogen supply and different phosphorus and calcium fractions in leaves of tomato and cucumber plants. *Isr. J. of Botany* 41: 67-74.
- VALVERDE, M.; MADRID, R. & ROMOJARO, F. 1997. Efecto de los niveles de calcio en la aparición del "Blossom end rot" en variedades de pimiento dulce. *Actas de Horticultura*, 20: 936-944.
- VAN SAANE, J. & VAN KRUISTUM, G. 1987. Low temperature breakdown of chicory. *Groenten en Fruit*. 42: 62-63.
- VARGAS, L.; LORENTE, F. A.; SÁNCHEZ, A.; VALENZUELA, J. L. & ROMERO, L. 1990. Phosphorus, calcium, pectin and carbohydrate fractions in varieties of watermelon. *Acta Horticulturae* 287: 469-473.
- VEGA, M. & RAYA, J. L. 1997. El cultivo en lana de roca. In: *Manual de Cultivo Sin Suelo*, (Ed.), Universidad de Almería, Servicio de Publicaciones, Almería, Spain, pp, 304-323.
- WAGNER, S.; DE BORTOLI, S.; SCHWARZLÄNDER, M. & SZABÒ, I. 2016. Regulation of mitochondrial calcium in plants versus animals. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 67, No. 13 pp. 3809–3829.
- WALLACE, A. & DE KOCK, P. C. 1966. Translocation of iron in tobacco, sunflower, soybean, and bush bean plants. "Current topics in Plant Nutrition". 3-9. Ed. A. Wallace. UCLA. Los Angeles.
- WANG, W. H.; CHEN, J.; LIU, T. W.; CHEN, J.; HAN, A. D. & SIMON, M. 2014. Regulation of the calcium-sensing receptor in both stomatal movement and photosynthetic electron transport is crucial for water use efficiency and drought tolerance in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.* 65, 223–234.
- WARD, G. M. & MILLER, M. 1970. Relationship between fruit sizes, and nutrient content of greenhouse tomatoes and cucumbers. *Canadian Journal of Plant Science*. 50: 451-455.
- WARD, G. M. 1967. Growth and nutrient absorption in greenhouse tomato and cucumber. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*. 90: 335-341.
- WELLEMANN, J. C. C. & VERWER, F. L. 1984. The technical installation for GRODAN rockwool. *Proceedings 6th International Congress on Soilless Culture*. ISOSC: 763-772.
- WHITE, P. J. 2000. Calcium channels in higher plants. *BBA-Biomembranes* 1465, 171–189.
- WIEBE, H. J.; SCHÄTZLER, H. P. & KÜHN, W. 1977. On the movement and distribution of calcium in white cabbage in dependence of the water status. *Plant Soil* 48: 409-416.
- WIERSUM, L. K. 1979a. Calcium content of the phloem sap in relation to the Ca status of the plant. *Acta Bot. Neerl.* 28: 221-224.

- WIERSUM, L. K. 1979b. Effects of environment and cultural practices on calcium nutrition. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 10: 259-278.
- WILCOX, O. E. ; MITCHELL, C. A. & HOFF, J. E. 1977. Influence of nitrogen form on exudation rate and ammonium, amide and cation composition of xylem exudate in tomato. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 102(2): 192-196.
- WILKINSON, R. E. & DUNCAN, R. R. 1993. Calcium ($^{45}\text{Ca}^{2+}$) absorption inhibition by aluminium (Al^{+3}) in sorghum roots. *Journal of Plant Nutrition.* 16: 235-240.
- WOJCIK, P. & BOROWIK, M. 2013. Influence of pre-harvest sprays of a mixture of calcium formate, calcium acetate, calcium chloride and calcium nitrate on quality and 'Jonagold' apple storability. *Journal of Plant Nutrition* 36: 2023–2034.
- WOOD, R. 1993. Tipburn. *NZ Commercial Grower* Vol 28 no 1, pp 9.
- XU, H. L. ; OAUTHIER, L. & OOSSELIN, A. 1995. Effects of fertigation management on growth and photosynthesis of tomato plants grown in peat, rockwool and NFT. *Sci. Hort.* 63: 11-20.
- ZHANG, J. & KIRKHAM, M. B. 1995. Sap flow in a dicotyledon (sunflower) and a monocotyledon (sorghum) by the heat-balance method. *Agroclimatology.* 87: 1106-1114.

Páginas web

www.fepex.es (acceso 2016)

www.magrama.gob.es (acceso 2016)

www.faostat.fao.org (acceso 2016)