

Universitat de Lleida

## Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada (*Rosa sp.*) y pimiento (*Capsicum annuum L.*): efectos en desarrollo y producción

Nuria Carazo Gómez

<http://hdl.handle.net/10803/383065>

**ADVERTIMENT.** L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

**ADVERTENCIA.** El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

**WARNING.** Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

**Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de  
rosa para flor cortada (*Rosa sp.*) y  
pimiento (*Capsicum annuum* L.).  
Efectos en desarrollo y producción**





*Tesis doctoral*

**Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada (*Rosa sp.*) y pimiento (*Capsicum annuum* L.).**

**Efectos en desarrollo y producción.**

Memoria de tesis presentada por Nuria Carazo Gómez para optar al grado de Doctora Ingeniera Agrónoma por la Universidad de Lleida

Dirigida por el Dr. Oriol Marfà i Pagès y el Dr. Joaquim Azcón-Bieto

Tutorada por el Dr. Jordi Voltas Velasco, profesor del Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal de la Escuela Tècnica Superior de Ingeniería Agraria de Lleida:

Los contenidos de esta tesis se han difundido parcialmente en Congresos y en los artículos siguientes:

Carazo, N., López, D., Mancilla, S., Martínez, A., Cáceres, R. y Marfà, O., 2005. Oxifertigation and Foliar Nutrient Contents of Closed Soilless Rose Crop. *ISHS Acta Hort.* 697, 493-497.

Carazo, N., López, D., Peleato, M., Cáceres, R. y Marfà, O., 2007. Oxifertirrigación de rosa: contenido de nutrientes en flor cortada. *Actas de Horticultura II Cong. Nacional SECH.*

Carazo, N., López, D., Rodrigo, M.C., Brunet, G., Cáceres, R. and Marfà, O., 2008. The effect of oxygenation on the root hydraulic conductivity of container-grown roses. *Acta Hortic.* 779, 471-476. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.779.59.

Foto de portada:

Detalle del sistema radicular de esquejes enraizados cultivados con (superior) y sin (inferior) oxifertirrigación. IRTA de Cabrils (Barcelona)

*A mi familia, a mis amigos*

## Agradecimientos

La vida está llena de sorpresas y de pequeñas cosas que pasan sin hacer mucho ruido pero van calando en nuestro interior.

Esta página es una de ellas. No espero llegar a agradecer a todos los que me han ayudado, animado y acompañado en este camino largo y de etapas intermitentes, sería muy difícil ya que para mi alegría y satisfacción han sido muchos.

En un principio pensé que no podría llegar a poner nombres, pero finalmente no quiero dejar de agradecer a mis directores y tutores a lo largo de este tiempo. Muy especialmente a Oriol Marfà, por los ‘això millor així, no?’ i ‘això jo ho treuria, no aporta res, sempre que a tu et sembli’, por todo el trabajo y ánimo desde el principio hasta el final, este final tan intenso como esperado, y por poner sólo la presión estrictamente necesaria, cosa que me ha dejado algo de salud. A Lola López por los muchos ratos de trabajo, algunas penas y amistad que se han quedado grabados en los recuerdos más queridos; a Joaquim Azcón por ayudarme a observar y profundizar en los aspectos menos agronómicos; a Juan Antonio Martín Sánchez por sus ánimos en todo momento y porque toda visita era garantía de salir con las energías renovadas y finalmente a Jordi Voltas, contar con su apoyo con papeles invertidos a los iniciales en la ESAB ha sido un regalo final. Ellos han sido mis compañeros de viaje académico, de fatigas diarias y trabajos compartidos, sin los que no hubiera empezado este camino, no lo hubiera vuelto a emprender cada vez que se ha detenido y, por supuesto, no hubiera llegado a su final.

Pero sois muchos más. Mi familia, sin vosotros simplemente no sería yo. Mis amigos, la sal de la vida, el interés por las cosas comunes, o no tan comunes. Mis compañeros, me habéis ayudado tanto en esta última etapa, desde el trabajo duro –clases cuando no se habían previsto, tiempo regalado,..- a las sonrisas por el pasillo, que me hace muy feliz. Y también mis alumnos, cada día motiváis aún más la búsqueda de respuestas, de mejores explicaciones,.. además de animar el paso por los cursos y por los pasillos.

A todos vosotros que me habéis hecho más fácil llegar al final de esta etapa,  
sois muchos,..

pero estáis todos en mi corazón.

# Índice

|  |     |
|--|-----|
| Resumen, resum, summary.....   | ix  |
| Índice de tablas.....  | xii |
| Índice de figuras.....   | xv  |
| <br>   |     |
| 1. Introducción general .....  | 3   |
| 1.1. Introducción .....  | 3   |
| 1.2. La oxigenación en las plantas.....  | 4   |
| <br>   |     |
| 2. Objetivos y experimentos .....  | 11  |
| 2.1. Objetivos .....   | 11  |
| 2.2. Experimentos y localización general.....  | 13  |
| <br>   |     |
| 3. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada. Efectos en desarrollo, producción y calidad. .... | 19  |
| 3.1. Introducción .....  | 19  |
| 3.1.1. La rosa: de los orígenes a la actualidad.....   | 19  |
| 3.1.2. Morfología de la planta.....  | 21  |
| 3.1.3. La producción y el comercio de rosa.....  | 24  |
| 3.1.4. La rosa: flor cortada .....   | 27  |
| 3.1.5. Nutrición y respiración radicular en rosa .....   | 28  |
| 3.2. Objetivos .....   | 29  |
| 3.3. Material y métodos.....   | 30  |
| 3.3.1. Localización e instalaciones.....   | 30  |
| 3.3.2. Cultivos y experimentos.....  | 34  |
| 3.3.3. Parámetros medidos .....  | 36  |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.4.   | Resultados y discusión .....   | 40 |
| 3.4.1. | Concentración de oxígeno en la solución nutritiva .....  | 40 |
| 3.4.2. | Productividad .....  | 40 |
| 3.4.3. | Calidad .....  | 42 |
| 3.4.4. | Postcosecha .....  | 44 |
| 3.4.5. | Contenido de nutrientes en fracciones de flor cortada .....  | 45 |
| 3.5.   | Conclusiones .....   | 51 |
| 4.     | Oxifertirrigación en esqueje y plántula enraizada de rosa. Efectos en el desarrollo y la respiración radicular. ....               | 55 |
| 4.1.   | Introducción .....   | 55 |
| 4.2.   | Objetivos y experimentos .....   | 56 |
| 4.3.   | Material y métodos .....   | 57 |
| 4.3.1. | Material vegetal, instalaciones y condiciones de cultivo .....   | 57 |
| 4.3.2. | Técnica de oxifertirrigación .....   | 58 |
| 4.3.3. | Parámetros biométricos .....   | 59 |
| 4.3.4. | Parámetros biométricos y contenido mineral .....   | 59 |
| 4.3.5. | Conductividad hidráulica radicular .....   | 60 |
| 4.3.6. | Respirometría de raíces escindidas .....   | 60 |
| 4.3.7. | Respirometría de planta entera de rosal .....  | 61 |
| 4.4.   | Resultados y discusión .....   | 63 |
| 4.4.1. | Parámetros biométricos .....   | 63 |
| 4.4.2. | Parámetros biométricos y contenido mineral .....   | 64 |
| 4.4.3. | Conductividad hidráulica .....   | 66 |
| 4.4.4. | Respirometría de raíces escindidas .....   | 67 |
| 4.4.5. | Respirometría de planta entera de rosal .....  | 68 |
| 4.5.   | Conclusiones .....   | 71 |
| 5.     | Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de pimiento ( <i>Capsicum annuum</i> L.). Efectos sobre su desarrollo y productividad. .... | 75 |
| 5.1.   | Introducción .....   | 75 |
| 5.1.1. | El pimiento .....  | 76 |
| 5.2.   | Objetivos .....  | 79 |
| 5.3.   | Material y métodos .....   | 80 |

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 5.3.1. | Localización, instalaciones y diseño experimental..... | 80  |
| 5.3.2. | Material vegetal y técnicas culturales.....            | 83  |
| 5.3.3. | Control de la concentración de oxígeno .....           | 85  |
| 5.3.4. | Biomasa y rendimiento agronómico .....                 | 86  |
| 5.3.5. | Efectos en el sistema radicular.....                   | 87  |
| 5.3.6. | Consumo de agua.....                                   | 88  |
| 5.4.   | Resultados y discusión .....                           | 89  |
| 5.4.1. | Concentración de oxígeno en la solución nutritiva..... | 89  |
| 5.4.3. | Calidad.....   | 96  |
| 5.4.4. | Parámetros fisiológicos radiculares .....              | 99  |
| 5.4.5. | Consumo de agua.....                                   | 102 |
| 5.5.   | Conclusiones.....                                      | 104 |
| 6.     | Conclusiones generales.....                            | 107 |
| 7.     | Bibliografía .....                                     | 109 |
|        | ANEJO .....  | 125 |



## Resum

La disponibilitat d'aire i, en concret d'oxigen per part del sistema radicular dels cultius té una gran importància per al procés respiratori, la seva consegüent producció d'energia aprofitable per al desenvolupament de la planta i la captació de nutrients per les arrels. Tot i això, és freqüent trobar cultius amb deficiències d'oxigen en l'àmbit radicular, ja sigui degut a altes taxes d'absorció d'O<sub>2</sub> en condicions càlides de desenvolupament, per un control insuficient d'aquest O<sub>2</sub>, o per les dues raons.

La informació existent sobre el comportament dels cultius amb major o menor disponibilitat d'oxigen és limitada i ha promogut l'objectiu de la tesi: estudiar els efectes de l'oxifertirrigació –tècnica d'enriquiment en oxigen dissolt de l'aigua de reg o de la solució nutritiva fins a assolir condicions de sobresaturació- en dos cultius fora sòl de rosa per a flor tallada, d'esqueix i plàntula arrelada de rosa i de pebrot. S'han realitzat cultius de roser per a flor tallada, d'esqueix de rosa en arrelament i plàntula arrelada i de pebrot, els tres amb tractament d'oxifertirrigació o no, i la combinació amb d'altres factors (substrat, oxigenació nocturna, freqüència de reg). S'han mesurat paràmetres biomètrics (sistema radicular i part aèria), de rendiment productiu (número de flors, durada i qualitat de la flor tallada, pes i número de fruits, precocitat) i ecofisiològics (captació de nutrients, respiració, conductivitat hidràulica).

L'oxifertirrigació ha afavorit la productivitat (número de flors, número i pes de fruits), la qualitat (pes i longitud de la flor tallada, durada de la flor tallada, pes i superfície foliar i radicular d'esqueix i plàntula arrelada i pes de fruits) i el desenvolupament en diversos aspectes (paràmetres biomètrics, contingut mineral), possiblement degut a l'activació d'alguns paràmetres fisiològics (conductivitat hidràulica, respiració, absorció i fixació mineral en sistema radicular i part aèria).

## Resumen

La disponibilidad de aire y en concreto de oxígeno por parte del sistema radicular de los cultivos tiene una gran importancia en el proceso respiratorio, su consiguiente producción de energía aprovechable en el desarrollo de la planta y la captación de nutrientes por las raíces. A pesar ello, es frecuente encontrar cultivos con deficiencias de oxígeno en el ámbito radicular, ya sea por altos índices de absorción de  $O_2$  en condiciones cálidas de desarrollo, por un control insuficiente del mismo o por ambos motivos.

La información existente sobre el comportamiento de los cultivos con mayor o menor disponibilidad de oxígeno es limitada y ha promovido el objetivo de la tesis: estudiar los efectos de la oxifertirrigación -técnica de enriquecimiento en oxígeno disuelto del agua de riego o de la solución nutritiva hasta alcanzar condiciones de sobresaturación- en cultivos sin suelo de rosa para flor cortada, de esqueje y plántula enraizada de rosa y de pimiento. Se han realizado cultivos de rosal para flor cortada, de enraizamiento de esqueje y de plántula enraizada joven de rosa, y de pimiento, los tres con tratamiento de oxifertirrigación o no y la combinación con otros factores (sustrato, oxigenación nocturna, frecuencia de riego). Se han medido parámetros biométricos (sistema radicular y parte aérea), de rendimiento productivo (número de flores, duración y calidad de flor cortada, peso y número de frutos, precocidad) y ecofisiológicos (captación de nutrientes, respiración, conductividad hidráulica).

La oxifertirrigación ha favorecido la productividad (número de flores, número y peso de frutos), la calidad (peso y longitud de la flor cortada, duración de flor cortada, peso y superficie foliar y radicular de esqueje y plántula enraizada, y peso de frutos) y el desarrollo en diversos aspectos (parámetros biométricos, contenido mineral), posiblemente debido a la activación de algunos parámetros fisiológicos (conductividad hidráulica, respiración, absorción y fijación mineral en sistema radicular y parte aérea).

## Summary

Air availability, specially oxygen, by the crops root system plays an important role in the whole respiratory process, in the resulting energy production for plant development and in nutrient uptake by the roots. Nevertheless, there are evidences about oxygen deficiencies in the root system in some crops, due to high oxygen absorption rates in warm climate conditions, and to an insufficient control over it, or also because both of them.

The lack of information about the crops behaviour with great or slight oxygen disponibility has promoted the aim of this Ph-D thesis, that is to study the effects of oxifertirrigation – technique of water or solution dissolved O<sub>2</sub> enrichment until supersaturation conditions- in rose cut flower (adult plant, young plant or cutting) and pepper cultivated under soilless conditions.

Cut flower rose, rose cutting and pepper cultures were grown under oxifertigation treatment and a combination of other parameters such as substrate, night oxygenation and watering frequency. Biometric parameters (roots and aerial part), yield parameters (flower number, flower life and quality, fruits weight and number, earliness) and ecophysiological parameters (nutrients uptake, respiration, hydraulic conductivity) were measured.

The experiments showed that oxifertigation has rised productivity (flowers number, fruits weight and number), quality (flower weight and lenght, cut flower life, leaf and root area and weight of cuttings and rooted plantlets, fruits weight) and development in some aspects (biometrics parameters, mineral content) likely due to the activation of some physiological parameters such as hidraulic conductivity, respiration and nutrient uptake and fixation on roots and leaves.

## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 2.1. Cultivos y experimentos con planta de rosal para flor cortada.....   | 14 |
| Tabla 2.2. Cultivos y experimentos con esqueje enraizado de rosal para flor cortada .....   | 15 |
| Tabla 2.3. Cultivo y experimento con planta de pimiento.....  | 16 |
| Tabla 3.1. Importaciones y exportaciones (€) de rosas y otros productos ornamentales en España en 2014.....   | 26 |
| Tabla 3.2. ROSAS: Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción en España, 2013 .....   | 26 |
| Tabla 3.3. Media de la composición del agua de riego y composición inicial de la solución nutritiva .....   | 31 |
| Tabla 3.4. Número de rosas cortadas por planta y flujo productivo en un ciclo anual de la plantación (periodo anual abril - abril) .....  | 40 |
| Tabla 3.5. Número acumulado de rosas cortadas por planta en cada uno de los flujos florales anuales de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en los tratamientos de oxigenación y no oxigenación de la solución nutritiva (periodo anual abril - abril) .....  | 41 |
| Tabla 3.6. Peso fresco de flor cortada (g) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en el periodo julio-abril .....  | 42 |
| Tabla 3.7. Longitud de vara floral (cm) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en el periodo julio-abril.  | 42 |
| Tabla 3.8. Parámetros peso relativo de agua (PRA, %, peso relativo de agua en el séptimo día de la flor cortada (PRA7, %), días de duración (DIAS, número) y estadio de apertura (ESTADIO de flor cortada, 1-5) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® con y sin tratamiento de oxifertirrigación en el periodo julio-abril.....             | 44 |
| Tabla 3.9. Contenido en calcio y potasio (% sobre materia seca) en fracciones de flor cortada de rosa (cv. Lovely Red), al inicio y final del período de postcosecha. Cultivo con/sin aplicación de oxifertirrigación (OxF).....  | 46 |
| Tabla 3.10. Contenido en calcio y potasio (% sobre materia seca) en fracciones de flor cortada de rosa (cv. Lovely Red), al inicio y final del período de postcosecha. Cultivo con/sin aplicación de oxígeno nocturno (OxN).....  | 46 |
| Tabla 3.11. Conductividad hidráulica radicular (Lr) ( $\text{cm}^2 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y conductividad hidráulica radicular específica (Lre) ( $\text{cm}^2 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ ) en cultivo de rosa en perlita A13 o perlita B6, con o sin oxigenación complementaria..... | 49 |
| Tabla 3.12. Efecto de diferentes tratamientos en el contenido foliar de nutrientes en un cultivo de rosa para flor cortada (%N %P %K %Ca %Mg ppm Fe).....   | 50 |
| Tabla 4.1. Propiedades físicas de los sustratos B6® y A13®; Dr: densidad real, Da:  |    |

|  |    |
|--|----|
| densidad aparente, EPT: espacio poroso total, CA: capacidad de aireación, AFD: agua fácilmente disponible, AR: agua de reserva y ADD: agua difícilmente disponible (Orozco & Marfà, 1995).....   | 58 |
| Tabla 4.2. Efecto de la oxifertirrigación en el desarrollo radicular de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de crecimiento, bajo tratamiento continuo de oxifertirrigación o no (oxifert., no oxifert.).....   | 63 |
| Tabla 4.3. Biomasa aérea de neoformación (tallos y hojas): área foliar, área específica y tasa transpiratoria de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de crecimiento, bajo tratamiento continuo de oxifertirrigación o no (oxifert., no oxifert.) y con dos tipos granulométricos de perlita, fina (PF) y gruesa (PG).....        | 65 |
| Tabla 4.4. Contenido mineral en raíces de plantas de rosal cultivadas en cámara de condiciones controladas en perlita gruesa (PG) o fina (PF), tratadas o no mediante oxifertirrigación (% m.s. = % materia seca).....   | 66 |
| Tabla 4.5. Conductividad/resistencia hidráulica de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de condiciones controladas, con o sin oxifertirrigación, en perlita fina (B-10, PF) y perlita gruesa (A-13, PG).....  | 66 |
| Tabla 4.6. Tasa respiratoria, contenido de nitrógeno (N) y de carbono (C) de fragmentos escindidos de raíces y de hojas de plantas de rosa sometidas o no a oxifertirrigación (cámara condiciones controladas). Biomasa aérea y radicular (peso seco, PS; materia seca, m.s.) de las plantas de las que proceden los fragmentos de raíces..... | 68 |
| Tabla 4.7. Parámetros descriptivos de los modelos diarios de respiración sobre plantas de rosal cultivadas en cámara de condiciones controladas en plantas jóvenes de rosal con o sin oxifertirrigación.....   | 69 |
| Tabla 5.1. Países con mayor producción de pimiento (situación en 2013).....  | 76 |
| Tabla 5.2. Distribución del cultivo de pimiento y de la producción en España (situación en 2013).....  | 77 |
| Tabla 5.3. Propiedades físicas de los sustratos B6® y B12®; Dr: densidad real, Da: densidad aparente, EPT: espacio poroso total, CA: capacidad de aireación, AFD: agua fácilmente disponible, AR: agua de reserva, ADD: agua difícilmente disponible y Ksat: conductividad hidráulica saturada (Orozco, 1995).....                             | 83 |
| Tabla 5.4. Composición de las aguas de riego y las soluciones nutritivas utilizadas. SN 0: Solución recomendada por Sonneveld y Straver (1994); RED 1, 2: agua de red 1, 2. SN1 - 4: soluciones nutritivas 1 a 4. (*, **, ***, ajuste de las soluciones por necesidades del cultivo).....  | 84 |
| Tabla 5.5. Composición elemental (%p/p) del producto comercial Hortrilon®.....   | 85 |
| Tabla 5.6. Concentración media de oxígeno en la solución de riego a la salida de los goteros, con y sin aplicación de oxígeno complementario (n=4; error estándar entre paréntesis) .....  | 89 |
| Tabla 5.7. Concentración media de oxígeno en la solución del sustrato medido a media   |    |

|   |     |
|---|-----|
| altura del saco de cultivo en los diferentes tratamientos experimentales (con y sin oxifertirrigación, frecuencia alta y baja de riego, sustrato de grado fino y de grado grueso) y en 5 días del período de cultivo.....   | 90  |
| Tabla 5.8. Concentraciones medias de oxígeno (n=4) en la solución del sustrato a media altura del saco de cultivo en dos días de muestreo.....  | 91  |
| Tabla 5.9. Peso fresco/m <sup>2</sup> de frutos en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato y la combinación de oxigenación y frecuencia.....  | 93  |
| Tabla 5.10. Peso fresco de frutos acumulado por unidad de superficie (g/m <sup>2</sup> ) en los meses de agosto, septiembre y octubre y peso fresco medio de fruto (Pfm), acumulado al final del cultivo, para los tratamientos de oxigenación (O <sub>2</sub> , No O <sub>2</sub> ), frecuencia de riego (Alta, Baja) y tipo de sustrato (perlita B6 y perlita B12)..... | 94  |
| Tabla 5.11. Número de frutos por unidad de superficie recolectados en los meses de agosto, septiembre y octubre para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato y las combinaciones de los dos sustratos con los tratamientos de oxigenación y frecuencia.....  | 95  |
| Tabla 5.12. Número de frutos por unidad de superficie acumulado en los meses de agosto, septiembre y octubre para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato.....   | 96  |
| Tabla 5.13. Número de frutos de más de 1 cm de longitud por unidad de superficie medido el día 06/06 (Precocidad) y número de días necesarios para alcanzar el 20% del peso fresco total (Precocidad20%).....   | 97  |
| Tabla 5.14. Resistencia hidráulica (a 25°C) de raíces escindidas al final de cultivo: con oxifertirrigación (O <sub>2</sub> ) o sin (No O <sub>2</sub> ), frecuencia elevada (FE) o baja (FB) y sustrato de cultivo perlita B6 o B12, con las medias de las interacciones oxifertirrigación–sustrato y oxifertirrigación –sustrato-frecuencia.....                        | 100 |
| Tabla 5.15. Respiración radicular de raíces escindidas de plantas a diferentes temperaturas y con los diferentes tratamientos de oxigenación, sustrato y frecuencia elevada.....  | 101 |
| Tabla 5.16. Aportaciones, consumo, lixiviación y tasa de lixiviación medias en el periodo de cultivo.....   | 102 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.1. Representación esquemática de las posiciones taxonómicas de las especies en el género Rosa (Wylie, 1954).   | 20 |
| Figura 3.2. Estados de diferenciación floral en rosa, cv. Baccara (Moe & Kristofferson, 1969).  | 22 |
| Figura 3.3. Evolución de las exportaciones mundiales de productos ornamentales: bulbosas, verde de corte, flor cortada y planta viva, entre 2001 y 2013. (UN Comtrade, 2014).                                       | 25 |
| Figura 3.4. Principales países exportadores de flor cortada (% sobre el total): variación a lo largo de una década (UN Comtrade, 2014).   | 25 |
| Figura 3.5. Rosa (flor cortada): evolución de la superficie (áreas), producción (docenas x 1000) y rendimiento (docenas x 1000/área) en España del año 2003 al año 2013 (MAGRAMA, 2015).                            | 27 |
| Figura 3.6. Estadios de apertura de la rosa (Cid et al., 1999).   | 28 |
| Figura 3.7. Cabezal de riego (a) y equipo de desinfección de lixiviados (b).  | 32 |
| Figura 3.8. Componentes y esquema del cabezal de riego con oxifertirrigación.   | 33 |
| Figura 3.9. Ensayo de postcosecha en la cámara de condiciones estándar.   | 37 |
| Figura 3.10. Vista de la plantación (a) y del cultivo avanzado (b).   | 38 |
| Figura 3.11. Número de flores por planta en cada flujo floral anual de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en los tratamientos de oxigenación y no oxigenación de la solución nutritiva.                         | 41 |
| Figura 3.12. Peso fresco de flor cortada (g) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en cada flujo floral anual.  | 43 |
| Figura 3.13. Longitud de vara floral de flor cortada (cm) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en cada flujo floral anual.   | 43 |
| Figura 3.14. Contenido en calcio (% sobre materia seca) en fracciones de rosa para flor cortada en los tratamientos con y sin oxigenación diurna (a) y nocturna (b) en inicio y final de su periodo de postcosecha. | 47 |
| Figura 3.15. Contenido en potasio (% sobre materia seca) en fracciones rosa para flor cortada en los tratamientos con y sin oxigenación diurna (a) y nocturna (b) en inicio y final de su periodo de postcosecha.   | 47 |
| Figura 4.1. Cámara de crecimiento y detalle de plantas jóvenes de rosal   | 58 |
| Figura 4.2. Medidas de respiración (Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona)  | 61 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 4.3. (a) Planta entera de rosal monitorizada para la caracterización de los efectos de la oxifertirrigación en planta joven de rosal; (b) esquema de la cámara de respirometría de planta entera.  | 62 |
| Figura 4.5. Sistema radicular de esquejes enraizados cultivados con y sin oxifertirrigación   | 64 |
| Figura 4.6. Detalle del sistema radicular de esquejes enraizados cultivados con (a) y sin (b) oxifertirrigación.  | 64 |
| Figura 4.7. Conductividad hidráulica, Conductividad hidráulica específica y permeabilidad en esqueje enraizado de rosa, con y sin oxifertirrigación (sí O <sub>2</sub> , no O <sub>2</sub> ) y cultivadas en perlita fina (B-10) y perlita gruesa (A-13)  | 67 |
| Figura 4.8. Modelo diario de flujo de CO <sub>2</sub> en el sistema sustrato-sistema radicular: Taxa respiratoria (resp, $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{s}^{-1}$ ) y temperatura de sustrato de cultivo (°C) en plantas con oxifertirrigación (Oxi) y sin (Ctrl).  | 68 |
| Figura 5.1. Esquema e imagen de plantación de la parcela elemental de la plantación del ensayo  | 81 |
| Figura 5.2. Esquema de plantación del ensayo, con las diferentes unidades de los tratamientos: control (-) y oxifertirrigación (O), frecuencia de riego alta (FE) y baja (FB) y perlita B12 (S12) y B6 (S6); • recogida de drenaje; ----- sin O <sub>2</sub> , - · - con O <sub>2</sub> .                                   | 82 |
| Figura 5.3. Planta de pimiento y vista general de la plantación del ensayo .....  | 84 |
| Figura 5.4. Detalle de (a) la sonda utilizada para la toma de muestras.....   | 86 |
| Figura 5.5. Altura de planta, peso seco de tallo, peso específico foliar y contenido relativo de clorofila (tratamientos de oxifertirrigación o no, frecuencia de riego elevada o baja y dos tipos de sustrato, B6 y B12) .....   | 92 |
| Figura 5.6. Peso fresco de frutos por unidad de superficie cultivada (g/m <sup>2</sup> ), recolectados en todo el periodo de cosecha, para los tratamientos de oxifertirrigación o no, frecuencia de riego elevada o baja y tipo de sustrato, B6 y B12.....   | 94 |
| Figura 5.7. Vista general de la plantación a la mitad del periodo de cultivo y en una fase avanzada del mismo .....   | 94 |
| Figura 5.8. Número de frutos/m <sup>2</sup> recolectados en todo el periodo de cosecha para los tratamientos de oxigenación complementaria o no, frecuencia de riego baja o elevada y en los dos sustratos de la experiencia, B6 y B12.....   | 96 |
| Figura 5.9. Número de días para alcanzar el 20% de la producción final para los tratamientos de oxigenación complementaria o no en los dos sustratos de la experiencia, B6 y B12 .....  | 97 |
| Figura 5.10. (a) Diámetro de los frutos (mm), (b) longitud de los frutos (mm), (c) número de frutos de categoría GG (>90 mm) y (d) índice de necrosis apical ('Blossom end rot', BER) referido al tratamiento con menos número relativo de frutos con BER, para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato..... | 98 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.11. Resistencia hidráulica (a 25°C) de raíces escindidas al final de cultivo: con oxifertirrigación (O2) o sin (No O2), frecuencia elevada (FE) o baja (FB) y sustrato de cultivo perlita B6 o B12 (a) y las combinaciones triples de los 3 tratamientos (b).....     | 99  |
| Figura 5.12. Respiración radicular (a 25°C) con o sin oxifertirrigación (O2), frecuencia alta (FE) o baja (FB) de riego y sustrato perlita B6 y B12.....   | 101 |
| Figura 5.13. Consumo de agua (L.m-2.día-1) de las plantas en tratamiento de oxigenación o no de la solución (O2, No O2), frecuencia elevada o baja de riego (FE, FB) y perlita B6 o B12.....   | 102 |
| Figura 5.14. Relación entre el déficit de evapotranspiración relativa ( $1-ETa/ETm$ ) y el déficit de producción relativa ( $1-Ya/Ym$ ) para los tratamientos de oxigenación complementaria o no, perlita B6 y B12 y frecuencia de riego alta y baja de pimiento cv. Vidi..... | 103 |
| Figura 5.15. Eficiencia en el uso del agua para los tratamientos de oxigenación o no, frecuencia alta y baja y perlita B6 y B12.....   | 104 |



## **1. Introducción general**



# **1. Introducción general**

## **1.1. Introducción**

La competencia productiva en agricultura y, en especial en el sector de los cultivos hortícolas, tanto comestibles como ornamentales, orienta a las explotaciones hacia nuevas formas de producción que mejoren cada vez más sus rendimientos. La globalización de productos, tan extendida para todo tipo de productos agrícolas, hace difícil mantenerse en un mercado en el que los fuertes no lo son sólo por su potencial productivo, sino por su control de los factores comerciales y económicos. En cualquier caso, hay productos que tienen un sector de mercado dispuesto a absorber un producto de mayor precio pero con el valor añadido de la calidad, no sólo del producto en sí, sino de todo el proceso de producción, respecto a factores medioambientales, sociales y biológicos, siendo la proximidad uno de los más valorados.

En este sentido, la asociación Ethical Trading Initiative (ETI, 2015) sugiere la idoneidad de cultivos forzados altamente tecnificados para suplir, aunque sea parcialmente, los productos provenientes de zonas muy lejanas que conllevan costes sociales por la falta de salarios justos en origen y en destino, y costes ecológicos por la necesidad de un transporte que no siempre está compensado por el ahorro energético de unas condiciones ambientales más favorables.

Posibles vías para obtener producciones agrícolas con grandes rendimientos son la mejora de las condiciones naturales de los cultivos tradicionales o bien la práctica de cultivos sin suelo, cultivos forzados muy tecnificados que permiten una gran optimización de los factores que intervienen, principalmente disponibilidad de agua, aire y nutrientes por parte de la planta, además de las condiciones ambientales más adecuadas.

El papel del oxígeno en la naturaleza es diverso y ha promovido y promueve una gran cantidad de estudios de diversos ámbitos que han dado lugar a la disciplina de Oxigenología

(Stepniewski, 2005). La disponibilidad de aire, y en concreto oxígeno, por parte del sistema radicular de las plantas tiene una importancia bien conocida para el proceso respiratorio, que se traducirá en energía para el desarrollo de la planta y para la captación de nutrientes por las raíces. A pesar de ello, hay evidencias de que es frecuente encontrar cultivos con deficiencias de oxígeno en la rizosfera, resultado de altas tasas de respiración radicular, ya sea por temperaturas elevadas, por una deficiente capacidad de aireación del medio de cultivo o por un manejo inadecuado del riego (Morgan, 2002). Estas situaciones han dado lugar a diferentes prácticas culturales y/o técnicas de oxigenación –aerohidroponía, oxygation, oxyfertigation,– del medio radicular, del agua de riego o de la solución nutritiva (Soffer et al., 1988; Marfà et al., 2005; Battharai et al., 2006; Midmore, 2007; Chen et al., 2011).

## 1.2. La oxigenación en las plantas

Los diferentes aspectos del papel del oxígeno en la rizosfera los resume Morgan (2002) en los siguientes puntos:

- La importancia del oxígeno en el proceso respiratorio y la consiguiente liberación de energía derivada de los procesos metabólicos aprovechable en el desarrollo.
- La necesidad de oxígeno en la zona radicular y su dependencia de la especie cultivada; necesidad que aumenta con la temperatura y varía con el tamaño radicular y de la planta.
- Las deficiencias leves o intermitentes de oxígeno en la zona radicular que no suelen mostrar síntomas visibles, aunque afecten al rendimiento, sanidad y calidad de la producción; las deficiencias más intensas sí que ocasionan marchitez (epinastia), carencias, problemas fitosanitarios y debilidad del sistema radicular y del vigor general de la planta.
- El mantenimiento de concentraciones de oxígeno altas en la rizosfera durante el cultivo da lugar a mayores índices de crecimiento, cosecha, de área foliar y menores problemas fitosanitarios,

El papel del oxígeno en el proceso respiratorio se ha estudiado en diversos aspectos. Amoore (1961) concluía que la respiración de los ápices radiculares quedaba limitada en situaciones de difusión lenta de oxígeno, la energía disponible para células aisladas bajo condiciones anaeróbicas era del 1% de la disponible en condiciones de aireación y la falta de oxígeno se traducía en una disminución de la división celular.

La respiración es un proceso oxidativo controlado por diferentes vías metabólicas que en las plantas muestra una gran flexibilidad para desviarse de algunos pasos comunes del metabolismo con el fin de evitar situaciones de baja disponibilidad de energía (Drew, 1992; Castillo, 2005; Toro y Pinto, 2015). En la respiración intervienen diferentes procesos

responsables de la oxidación de moléculas de glucosa para la obtención de energía y estructuras carbonadas, tanto en presencia de oxígeno como en ausencia del mismo. La complejidad de estas vías metabólicas incluye en las plantas la posibilidad de pasar a un metabolismo fermentativo que permite el mantenimiento de la oxidación del sustrato con una producción mínima de energía o posibles vías de mantener la producción de energía en situaciones de hipoxia (van Dongen et al., 2011; Gupta et al., 2015) y hace que el conocimiento de su regulación sea limitado (Ferne et al., 2004).

Algunos de los procesos metabólicos descritos como prioritarios desde el punto de vista energético son: el desarrollo en general (Dutilleul et al., 2003) y, más concretamente, la renovación de proteínas (Scheurwater et al., 2000), la reducción del nitrato, la fijación del nitrógeno simbiótico, la absorción del nitrato y otros iones por las raíces y el mantenimiento del gradiente de protones (van Iersel y Seymour, 2000, M'Bou et al., 2010; Makita et al., 2015).

La respiración radicular depende de diversos factores: temperatura (Rachmilevitch et al., 2006), salinidad (Schwartz y Gale, 1981; Bernstein et al., 2013), metales pesados (Moyen y Roblin, 2013), estrés hídrico (Jiménez et al., 2013), anegación (Liao y Lin, 2001), pero el factor que muestra una relación más directa es la disponibilidad de oxígeno (Gupta et al., 2009), que permite o no el proceso.

Hay numerosos estudios sobre el oxígeno en diferentes medios de cultivo y diferentes especies cultivadas (Jackson et al., 1984; Schwarz, 1989; Morgan, 2002; Marfà et al., 2005; Bonachela et al., 2010 a, b; Friedman y Naftaliev, 2012); algunos de ellos se refieren a deficiencias de oxígeno en la rizosfera y a sus efectos. En sistemas de cultivo sin suelo se utilizan técnicas de mejora de la aireación del medio de cultivo que con frecuencia no llegan a ser suficientes para mejorar las condiciones de oxigenación de la rizosfera (Marfà et al., 2005) y que podrían mejorarse mediante la hiperoxigenación de las soluciones nutritivas o del agua de riego, alcanzando concentraciones mayores que las correspondientes a las de saturación de oxígeno disuelto, tal como muestran algunos trabajos (Jackson, 1980; Tanaka, 2001).

La solubilidad del oxígeno en el agua depende de la temperatura del agua, la presión parcial de oxígeno, la presión atmosférica, la salinidad del agua y la superficie de agua en contacto con el oxígeno. No obstante, en condiciones normales (20°C, 1 atmósfera de presión y aire con contenido normal de oxígeno) la cantidad máxima de oxígeno disuelto es 9 ppm. Esta concentración de saturación disminuye con el aumento de la temperatura y también al aumentar el contenido de sales disueltas. Por otra parte, la respiración radicular aumenta al aumentar la temperatura y la concentración de sales en la solución de la rizosfera. El resultado habitual de la deficiencia no extrema de oxígeno en la rizosfera es la hipoxia, que se da cuando la respiración radicular se ve alterada por bajas concentraciones de oxígeno, sin llegar a la falta total del mismo (Drew, 1997).

En condiciones de hipoxia debe considerarse por una parte la planta y por otra el medio de cultivo o sustrato (Friedman y Naftaliev, 2012). Además de los aspectos estrictamente físicos del medio de cultivo o sustrato ya mencionados, la actividad respiratoria de los microorganismos del sustrato también tiene su papel en el descenso del contenido de oxígeno; de hecho estos microorganismos compiten con la planta por el oxígeno disponible. Esto se puede dar en los sustratos orgánicos con actividad microbiana considerable y a menudo está asociado con la inestabilidad o inmadurez del material orgánico, como ocurre cuando se utiliza un compost (Lynch y Harper, 1980).

Los estudios sobre la evolución del contenido de oxígeno en la solución de la rizosfera permiten identificar tres etapas diferentes en las curvas de descenso del oxígeno. En un primer estadio la caída es lineal, hasta alcanzar una presión parcial de oxígeno de entre el 4% y el 6%. En el segundo la disminución es más lenta y la tasa de respiración cae gradualmente hasta una presión parcial del 1% de oxígeno. Finalmente, en un tercer estadio se da una evolución asintótica cerca del 1%, zona umbral que coincide con la que da lugar a condiciones de asfixia radicular en la mayoría de las especies vegetales (Morard, 1995; Stepniewski et al., 2005).

Al principio del segundo estadio, que se asocia con el inicio de las condiciones de hipoxia, la cantidad de CO<sub>2</sub> liberada por las plantas aumenta, así como el etileno en la rizosfera (Pezeshki, et al., 1993). Los numerosos efectos de las condiciones de hipoxia sobre las plantas se han descrito con detalle en diferentes estudios. Los cambios morfológico-estructurales observados incluyen epinastia, clorosis, acortamiento de los entrenudos, reducción del desarrollo y necrosis radicular, disminución del contenido mineral y reducción de cosechas. También tienen lugar cambios metabólico-fisiológicos regulados hormonalmente que llevan a un descenso del nivel de giberelinas, así como al cierre de estomas asociado con un aumento de ácido abscísico. Asimismo se ha observado un aumento en la producción de etileno endógeno y hay estudios que muestran una reducción de la permeabilidad radicular y una inhibición considerable del transporte de iones (Martínez, 1990; Sojka, 1992; William et al., 1995; Drew, 1997).

El estatus y la dinámica del oxígeno en el suelo se han estudiado desde hace décadas (Luxmoore et al., 1970; Friedmann y Naftaliev, 2012) también se han analizado los efectos de diferentes métodos de aireación sobre la mejora de las condiciones de cultivo (Melsted et al., 1949; Williamson, 1964; Bryce, 1982; Busscher, 1982; Cook et al., 2007).

Los efectos de la aireación de la solución nutritiva en cultivo sin suelo se han descrito en varias especies. En rosa se han evaluado los efectos de la aireación sobre el desarrollo radicular, crecimiento de la planta y sobre la actividad de la alcohol deshidrogenasa (ADH) (Gislerød et al. 1997). También se ha estudiado la eficacia de la oxigenación en la reducción del 'blossom-end-rot' o podredumbre apical en tomate (Tachibana, 1988), la variación del contenido de oxígeno en tomate y pepino (Gislerød y Adams, 1983) y la eficacia de la aireación de la solución en términos de productividad en pepino (Yoshida et al., 1996). Aunque los resultados obtenidos

con técnicas de oxigenación complementaria en general son positivos, en algún estudio el enriquecimiento no da lugar a mejoras en parámetros bioproductivos, tal como documentan Goto et al. de un estudio sobre el cultivo de lechuga (1996).

En cultivo sin suelo y en particular en un contexto agroclimático mediterráneo, se dan a menudo condiciones que causan hipoxia. Estas condiciones consisten en la restricción del volumen de medio de cultivo, una alta densidad radicular, niveles bajos de capacidad de aireación del sustrato, altas concentraciones salinas, altas temperaturas y soluciones nutritivas con bajos contenidos de oxígeno disuelto. De aquí que sea aconsejable adoptar prácticas y soluciones técnicas que puedan reducir el alcance de estas condiciones. La solución más habitual ha sido la optimización del manejo de la dosis y frecuencia del riego según las propiedades hídricas del sustrato, que se muestra como una buena técnica para el control de las condiciones de aireación del medio (Goorahoo et al., 2002). La optimización de estas prácticas y su combinación con técnicas de enriquecimiento en oxígeno del medio radicular, ya sea el espacio poroso del sustrato, el agua o la solución nutritiva, se presentan como buenas herramientas para la mejora de las condiciones de cultivo en orden a alcanzar un mejor desarrollo y mayor rendimiento del mismo.

La oxifertirrigación es una técnica que consiste en el enriquecimiento en oxígeno disuelto del agua de riego o de la solución nutritiva hasta alcanzar condiciones de sobresaturación. Esta sobresaturación en oxígeno se consigue gracias a que en las tuberías de riego el agua está a una presión mayor que la atmosférica y por tanto es posible aumentar la concentración de saturación de oxígeno correspondiente a presión atmosférica. El uso de la oxifertirrigación permite aplicar agua enriquecida en oxígeno cada vez que se riega. En riegos de alta frecuencia, como los empleados habitualmente en los cultivos sin suelo, mediante dicha técnica se aplica frecuentemente a la rizosfera agua con una elevada concentración de oxígeno que de forma más o menos lenta va dejando de estar disuelta pero que en parte queda adsorbido en la superficie de la matriz porosa del medio de cultivo a disposición de las raíces o que retrasa el descenso de la concentración de oxígeno disuelto en la solución acuosa de la rizosfera (Marfà et al., 2005).



## **2. Objetivos y experimentos**



## 2. **Objetivos y experimentos**

### 2.1. **Objetivos**

La tesis se plantea el **objetivo principal** de determinar los efectos de la oxifertirrigación en cultivos sin suelo de rosa para flor cortada y de pimiento. En concreto se estudiarán los tres aspectos siguientes:

1. El efecto de la oxifertirrigación sobre el desarrollo, la producción y la calidad de la rosa para flor cortada, incluido su comportamiento en post-cosecha (Apartado 3).
2. El efecto de la oxifertirrigación en el desarrollo, composición mineral, respiración y algunos otros aspectos de esqueje de rosa enraizado y en la fase de enraizamiento (Apartado 4).
3. El efecto combinado de la aplicación de la oxifertirrigación, la frecuencia de riego y la naturaleza hidrofísica del sustrato en el desarrollo, el rendimiento, la calidad y algunos parámetros fisiológicos del pimiento cultivado sin suelo (Apartado 5).

Más detalladamente, los objetivos que se plantean en cada apartado son:

#### **Apartado 3**

Evaluar los efectos de la oxifertirrigación

- sobre el rendimiento y la calidad de la rosa cultivada para flor cortada, y en el comportamiento de la flor escindida en el transcurso de su vida en vaso (fase de postcosecha).

- sobre el contenido mineral de las fracciones de flor cortada y la productividad, interaccionando con la aplicación de oxigenación del medio de cultivo durante el período nocturno.
- sobre la conductividad hidráulica radicular de plantas de rosa

#### **Apartado 4**

Evaluar los efectos de la oxifertirrigación en esquejes de rosal durante el enraizamiento y durante el crecimiento de la plántula enraizada sobre:

- el desarrollo radicular y la parte aérea
- los contenidos de C y N radicular
- el contenido mineral de las raíces
- la respiración de la raíz escindida
- la respiración de la planta entera a tiempo real

#### **Apartado 5**

Evaluar los efectos de la aplicación de la oxifertirrigación, la frecuencia del riego y la tipología del sustrato en relación a sus propiedades hidrofísicas sobre el desarrollo, rendimiento y algunos parámetros fisiológicos del pimiento cultivado en condiciones de cultivo sin suelo en:

- la producción de biomasa y el índice de cosecha o rendimiento agronómico
- la resistencia hidráulica radicular
- la respiración radicular
- el consumo hídrico y la eficiencia en el uso del agua del cultivo

Estos estudios ayudarán a evaluar la técnica de la oxifertirrigación en dos cultivos importantes como son el de la rosa para flor cortada, una de las flores con mayor demanda a nivel mundial y el del pimiento, cultivo hortícola de gran consumo y contribuir a la mejor comprensión de la casuística relacionada con los efectos agronómicos que puedan derivarse del empleo de la mencionada técnica en los cultivos sin suelo objeto de los trabajos experimentales de esta Tesis Doctoral.

## **2.2. Experimentos y localización general**

Los ensayos se realizaron en las instalaciones del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) de Cabrils (comarca del Maresme, Barcelona), en el marco del Proyecto de investigación "*Técnicas de mejora de la oxigenación de la rizosfera en cultivos sin suelo y enarenados del litoral mediterráneo*" (CYCIT AGL 2002-04098-C02-02).

Los cultivos de rosas para flor cortada se realizaron en un invernadero ubicado en la Finca Quintana del Mig (41° 25' N, 2° 23' E) del centro de Cabrils del IRTA (Cabrils, Barcelona, Cataluña). Los dos primeros cultivos se llevaron a cabo en banqueta (cultivo 1: cultivo de rosas para flor cortada con los cultivares Dallas® y Red Corvette® y cultivo 2: cultivo de rosas para flor cortada con el cultivar Lovely Red®) y los dos cultivos siguientes en contenedor (cultivos en contenedor 1 y 2: cultivo de rosas para flor cortada con el cultivar Red Corvette®). En estos cultivos se realizaron los experimentos I.1, I.2, I.3, I.4 y I.5 que se describen en el apartado 3 (Tabla 2.1).

Los experimentos con esquejes de rosas (experimentos II.1, II.2 y II.3) se llevaron a cabo en una cámara de crecimiento con condiciones controladas en el centro de Cabrils del IRTA, descritos en el apartado 4 (Tabla 2.2).

El experimento III (partes III.1, III.2, y III.3), relativo al cultivo sin suelo de pimiento (apartado 5) se realizó en un invernadero ubicado en la finca Santa Creu del centro del IRTA de Cabrils (41° 25' N, 2° 23' E) (Tabla 2.3).

Tabla 2.1. Cultivos y experimentos con planta de rosal para flor cortada (Apartado 3)

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Cultivo 1</b>               | Plantación en banqueta de dos cultivares de rosal (Dallas® y Red Corvette®), injertados sobre <i>Rosa indica</i> L. con y sin oxifertirrigación  |
|                                | <b>Experimento I.1:</b> Efectos de la oxifertirrigación en la productividad y la calidad de la flor cortada de dos variedades de rosa para flor cortada  |
|                                | <b>Experimento I.2:</b> Efectos de la oxifertirrigación en la postcosecha de la flor cortada de dos variedades de rosa para flor cortada   |
|                                | <b>Diseño experimental:</b> factorial con dos fuentes de variación (2x2): oxifertirrigación (plantas oxifertirrigadas / plantas no oxifertirrigadas) y dos cultivares (Red Corvette® y Dallas®)                                    |
| <b>Cultivo 2</b>               | Plantación en banqueta del cultivar de rosal Lovely Red® (var. Meiburu), injertado sobre un pie de <i>Rosa indica</i> L. con y sin oxifertirrigación y en dos sustratos (perlita y fibra de coco)                                  |
|                                | <b>Experimento I.3:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación y la aplicación de oxígeno nocturna en el contenido mineral de diferentes partes de la flor cortada de rosa.  |
|                                | <b>Diseño experimental:</b> factorial con dos fuentes de variación (2x2): oxifertirrigación (sí/ no) y oxigenación nocturna (sí/no).   |
| <b>Cultivo en contenedor 1</b> | Plantación en contenedor de plantas de rosal de 1-2 años, cv. Red Corvette®, injertadas sobre <i>Rosa indica major</i> , con y sin oxifertirrigación, empleando dos sustratos (perlita B6 y perlita A13)                           |
|                                | <b>Experimento I.4:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación y el sustrato en la conductividad hidráulica radicular.   |
|                                | <b>Diseño experimental:</b> factorial con dos fuentes de variación (2x2): oxifertirrigación (sí/no) y sustrato (perlita B6 y perlita A13).   |
| <b>Cultivo en contenedor 2</b> | Plantación en contenedor de plantas de rosal de 1-2 años, cv. Red Corvette®, injertadas sobre <i>Rosa indica major</i> , con y sin oxifertirrigación, con y sin oxigenación nocturna y en dos sustratos (perlita B6 y perlita A13) |
|                                | <b>Experimento I.5:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación, la aplicación de oxígeno nocturna y el sustrato en el contenido foliar de nutrientes.  |
|                                | <b>Diseño experimental:</b> factorial con tres fuentes de variación (2x2x2): oxifertirrigación (sí/no), oxigenación nocturna (sí/no) y sustrato (perlita B6 y perlita A13).  |

**Tabla 2.2. Cultivos y experimentos con esqueje enraizado de rosal para flor cortada (Apartado 4).**

|   |  |
|---|--|
| <b>Cultivo de esqueje 1</b>   | Cultivo en contenedor de esqueje de rosa enraizado (Rosa hybrida L. cv. Lovely Red®) con y sin oxifertirrigación y empleando dos sustratos (perlita B10 y perlita A13) (marzo-mayo 2004)   |
|   | <b>Experimento II.1.</b> Efectos de la oxifertirrigación, combinada con dos sustratos, en el enraizamiento de esqueje de rosa.   |
| <b>Cultivo de esqueje 2</b>   | Cultivo en contenedor de plántula de rosa (Rosa hybrida L. cv. Lovely Red®) con y sin oxifertirrigación y en dos sustratos (perlita B10 y perlita A13) (septiembre-octubre 2004)   |
|   | <b>Experimento II.2</b> Efectos de la oxifertirrigación de plántula de rosa, empleando dos sustratos (perlita B10 y perlita A13), en el crecimiento, nutrición mineral y aspectos ecofisiológicos de plántulas de rosal recién enraizadas. |
| <b>Diseño experimental (II.1 y II.2):</b> factorial con dos fuentes de variación (2x2): oxifertirrigación (plantas oxifertirrigadas / plantas no oxifertirrigadas) y dos sustratos (perlita B6 y perlita A13) |  |
| <b>Cultivo de esqueje 3</b>   | Cultivo en contenedor de plántula de rosa (Rosa hybrida L. cv. Lovely Red®) con y sin oxifertirrigación) (marzo-mayo 2005)   |
|   | <b>Experimento II.3:</b> Efectos de la oxifertirrigación en la respirometría radicular medida en plántula de rosa entera y a tiempo real.  |
| <b>Diseño experimental:</b> fuentes de variación: oxifertirrigación (plantas oxifertirrigadas / plantas no oxifertirrigadas).   |  |

**Tabla 2.3. Cultivo y experimento con planta de pimiento (Apartado 5).**

|  |  |
|--|--|
| <b>Cultivo de pimiento</b>   | Cultivo sin suelo de pimiento (cv. Vidi®) con y sin oxifertirrigación, empleando dos frecuencias de riego y dos sustratos (perlita B6 y perlita B12) :   |
|  | <p><b>Experimento III:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación, la frecuencia de riego y el sustrato en diversos parámetros, que presentamos en tres partes:</p> <p><b>III.1:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación, la frecuencia de riego y el sustrato en la productividad y la calidad de pimiento</p> <p><b>III.2:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación, la frecuencia de riego y el sustrato en parámetros fisiológicos radiculares (resistencia hidráulica radicular y respiración radicular)</p> <p><b>III.3:</b> Efectos combinados de la oxifertirrigación, la frecuencia de riego y el sustrato en el consumo y la eficiencia del agua.</p> |
| <p><b>Diseño experimental:</b> factorial con tres fuentes de variación (2x2x2): oxifertirrigación (plantas oxifertirrigadas / plantas no oxifertirrigadas, frecuencia de riego (alta y baja) y sustrato (perlita B6 y perlita B12)</p> |  |

A lo largo de la memoria se hará referencia a las tablas de este apartado para recordar las condiciones de los diferentes experimentos.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó con el programa SAS/STAT® de SAS Institute Inc., Cary, NC USA, versión 6.12 y se utilizó el test de Tukey para la separación de medias de los tratamientos.

**3. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa**  
**para flor cortada**



### **3. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada. Efectos en desarrollo, producción y calidad.**

#### **3.1. Introducción**

##### **3.1.1. La rosa: de los orígenes a la actualidad**

Las rosas poblaban el mundo hace ya unos cuarenta millones de años, como muestran los fósiles de una especie cercana (*Rosa nutkana*) en Estados Unidos (Tarbouriech, 1996).

Las plantas de Rosa son originarias de zonas templadas y subtropicales de todo el hemisferio norte (Eurasia, África y América), aunque las dos áreas de mayor presencia son la cuenca mediterránea y el Extremo Oriente; China es la zona de mayor biodiversidad, con 95 especies, 65 de ellas endémicas (Zieslin y Moe, 1988; fr.Wikipedia, 2015).

La clasificación de las casi 120 especies del género Rosa es muy compleja debido a la gran cantidad de nombres publicados y las hibridaciones hechas desde hace siglos. Sólo ocho especies del género Rosa han contribuido al desarrollo de los cultivares modernos de rosa y siete han tenido algún papel menor (remarcadas y punteadas en la Figura 3.1) (Wylie, 1954; Widlechner, 1981). La rosas modernas y la mayoría de especies del género Rosa forman el subgénero Eurosa, de la familia *Rosaceae*, de floración en primavera y verano, excepto Rosa

*moschata autumnalis* (R. x *noisettiana*) que florece en otoño y podría proceder de *Rosa damascena semperflorens* (planta de día corto, con floración recurrente) y *Rosa gallica* (Zieslin y Moe, 1988).

La introducción de derivados de *Rosa sinensis* y *Rosa gigantea* (floración recurrente o continua) desde el Lejano Oriente, con características que eran producto de muchas generaciones de reproducción y las posteriores mutaciones y cruzamientos con rosas europeas y de Oriente Medio darían lugar a los modernos cultivares de floraciones recurrentes.

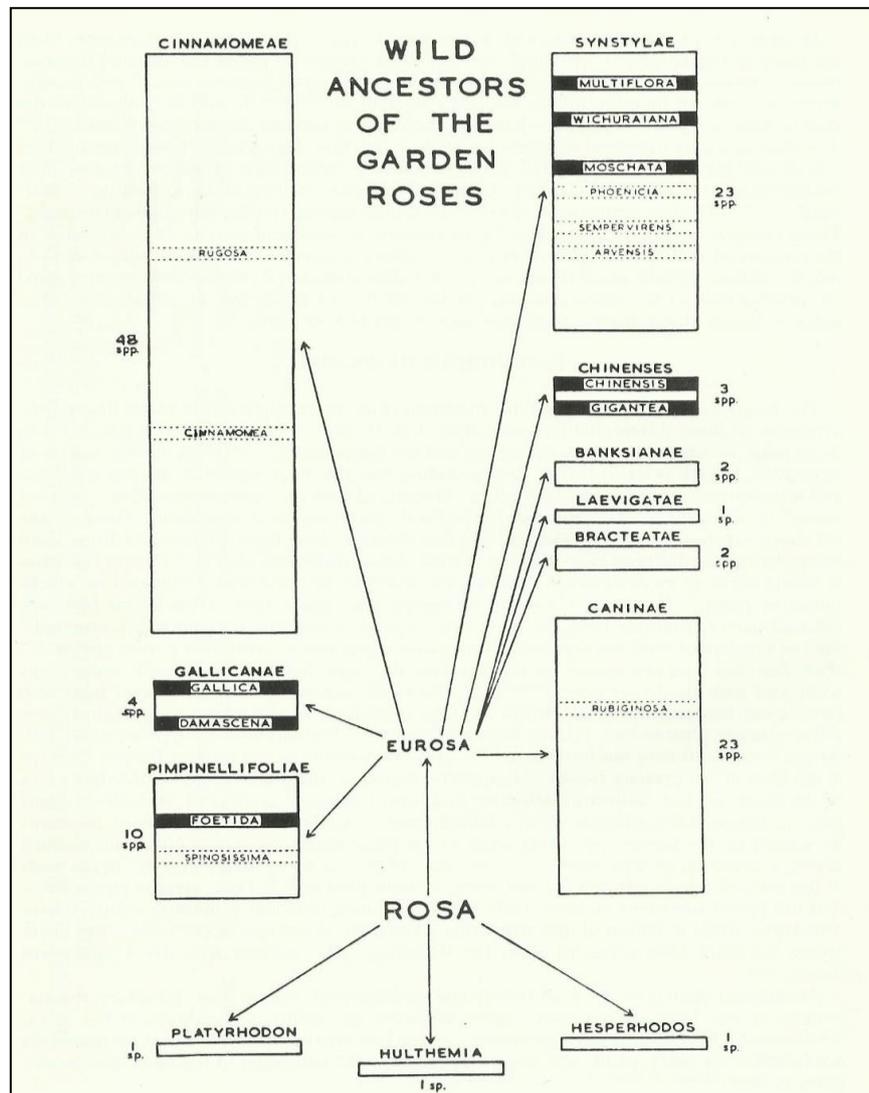


Figura 3.1. Representación esquemática de las posiciones taxonómicas de las especies en el género *Rosa* (Wylie, 1954)

### 3.1.2. Morfología de la planta

Los rosales son arbustos cuya clasificación se basa en el número de flores de la inflorescencia, el tamaño de la flor, la longitud del tallo y el modo de desarrollo de la planta. Los grupos principales, correspondientes a diferentes líneas de origen y reproducción son:

- Híbridos de té, con una o pocas flores terminales,
- Polyantha, con grupos de abundantes flores pequeñas,
- Híbridos Polyantha o Floribunda y Grandiflora, con un número intermedio de flores por inflorescencia

Un grupo aparte son los rosales trepadores de crecimiento indeterminado, floración lateral y cultivares de floración recurrente o estacional (Zieslin & Moe, 1988).

**Parte aérea.** La estructura general del arbusto se debe al desarrollo de unas pocas ramas a partir de una yema injertada o un esqueje que, a su vez, forman una serie de brotes axilares. En producción intensiva de rosa estos brotes sólo permanecen intactos cuando son portadores de flor, el resto se corta en cosecha, se podan o se doblan con fines productivos dependiendo de la técnica utilizada (André, 2003).

**Brotos.** Los brotes más largos son los de las yemas inferiores (prolépticos), se caracterizan por su dominancia apical y su crecimiento casi vertical (Wu, 2001) y son las futuras varas florales de la mayor calidad (60-80 cm).

**Hojas.** Las hojas de la rosa son identificadores taxonómicos de forma entre ovalada y elíptica y son compuestas, de 5 a 15 folíolos según las especies (Torre, 2003). El tamaño y la forma de los folíolos depende directamente de las condiciones ambientales; el área foliar influirá en el desarrollo de los brotes primarios de los esquejes ya que se forman a partir de los asimilados aportados por las hojas maduras y éstas tienen una relación directa con la formación de raíces del esqueje y su enraizamiento (Costa, 2002) y también pueden influir directamente en la vida de la flor cortada igual que en la de las plántulas de cultivo in vitro (Capellades, 1996).

**Flores.** Las rosas son arbustos perennes que forman brotes de forma continua y cada brote puede formar una flor terminal. Después de la cosecha de una vara floral, las yemas axilares más distales brotarán y formarán los brotes florales que producirán el siguiente flujo floral. Se han estudiado efectos de combinaciones patrón-esqueje (Fuchs, 1994), métodos de cosecha, regulación del desarrollo (Horridge et al., 1974; Bar-Tal, 2001) y factores ambientales en la producción floral. El origen de la parte aérea de la planta en propagación vegetativa son las yemas axilares y también se acepta que son estas yemas las que dan lugar a los tallos basales, determinantes del potencial productivo de la planta y del mejor manejo para optimizar la

productividad (Chimonidou, 2003). En el desarrollo floral de la rosa se han fijado ocho estados de desarrollo (Figura 3.2). Horridge y Cockshull (1974) vieron que la iniciación de la flor se puede dar en cualquier yema axilar después de la extensión del brote y unas dos semanas después del corte de la vara floral por encima de la yema. Los tallos ciegos proceden de abortos de yemas florales en desarrollo.

El aporte de agua, esencial en el desarrollo de las plantas de rosa, afecta negativamente a la cantidad y la calidad de producción si es limitado. Más concretamente, la zona de abscisión en la unión entre el tallo y el pedúnculo floral tiene un papel relevante, aunque haya disponibilidad de agua, el flujo de la misma a través del tallo floral y del resto de la planta es variable. La región de menor conductancia es la distal, en la base del receptáculo floral (un 20% de la conductancia del tallo). La flor es el principal sumidero de agua y si la pérdida de agua es excesiva para la planta, los embolismos de cavitación inducida en la región distal del pedúnculo limitarán el flujo de agua hacia la flor, reservando así el agua para la base de la planta (Chimonidou, 2003).

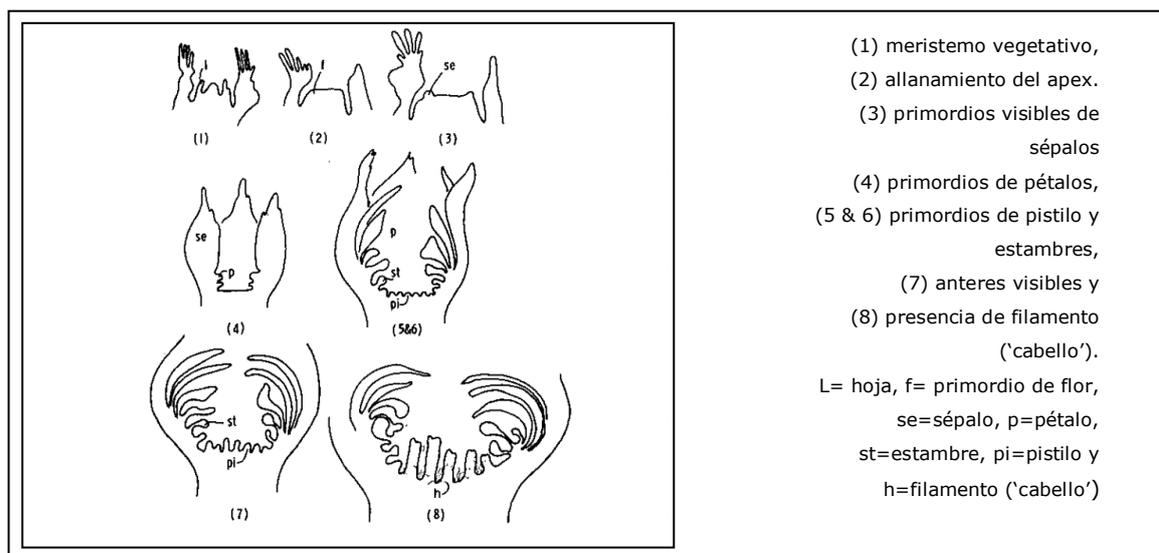


Figura 3.2. Estados de diferenciación floral en rosa, cv. Baccara (Moe & Kristofferson, 1969).

**Sistema radicular.** El sistema radicular de la rosa es muy diverso dependiendo del tipo de planta: plantas propagadas por semilla, patrón radicular en el que se injerta una yema o brote o planta de raíces 'propias' propagada vegetativamente con raíces adventicias. Se pueden encontrar diferencias muy notables incluso entre cultivares muy cercanos (Skytt y Fuchs, 2001). Además de las características genéticas y del tipo de planta también dependerá de las condiciones del medio -suelo, agua, nutrientes- y su desarrollo influirá en el de la parte aérea de la planta, desde la resistencia a la marchitez a la duración de la flor. Así, se ha visto que aportes menores de nutrientes como nitrógeno y fósforo se traducen en una disminución de

tamaño de la raíz; también se ha relacionado un buen contenido en nitrógeno con una mayor formación de raíces en esqueje (Drueghe et al., 2000, Scagel, 2004). Además, un aporte menor de P reduce no sólo la raíz sino también de una forma más acentuada el desarrollo aéreo de la planta, hecho interesante en planta en contenedor (ratio raíz/parte aérea mayor) pero no así en plantas para flor cortada que tendrán un desarrollo óptimo y unos tallos florales de mayor calidad con dosis ricas en P.

El sistema radicular de una planta de rosa propagada por semilla se forma a partir de la radícula que emerge de la semilla en la germinación. A partir de esta única estructura se forman las raíces laterales de formas diversas según las especies –algunas superficial y extendido otras profundo y poco ramificado- y dan lugar a un sistema radicular fibroso.

Una gran cantidad de rosas se propagan por esqueje, mayoritariamente en el caso de planta en tiesto y de forma creciente en el caso de las rosas de mayor tamaño. Sus raíces se diferencian de las que provienen de semilla en que hay entre 5 y 10 raíces 'primarias', de desarrollo similar aunque su morfología varíe. El desarrollo de estas raíces (peso seco) estará directamente relacionado con el área foliar original de los esquejes (Costa, 2002). Alguna de ellas se convierte en la dominante. Se ha expuesto que estas raíces resultan más vulnerables que las provenientes de semilla, quizás por su fragilidad inicial que hace que se puedan romper y separar del tallo (Skytt y Fuchs, 2001).

Otro factor notable en el desarrollo de la raíz es el manejo de la parte aérea y los tratamientos que se lleven a cabo. La poda o la cosecha de flores puede causar la muerte de raíces y reducir la nueva formación de las mismas, debido a la disminución de disponibilidad de carbohidratos producidos por las hojas (Fuchs, 1994). Las raíces funcionan como órgano de almacenamiento de carbohidratos, sobre todo en forma de almidón.

En el caso de rosas de invernadero se utiliza el término potencial de regeneración radicular ('root regeneration potential, RRP') para la capacidad del sistema radicular de regenerarse después de un corte intenso. Este factor está muy relacionado con el número de yemas que quedan en los tallos restantes ya que actúan como competidores de los meristemas radiculares en cuanto a carbohidratos y hormonas (Skytt y Fuchs, 2001).

La anatomía de la raíz de la rosa es sustancialmente distinta de las raíces de otras plantas leñosas, aumentando esta diferencia con la edad de la planta. El ápex de la raíz principal está cubierto por la caliptra, que puede escamarse con la penetración en el suelo durante el crecimiento. El meristemo radicular produce nuevas células por división y éstas se alargan y especializan detrás del meristemo. También, las raíces tienen un tejido especializado alrededor del cilindro central de la raíz, el periciclo y la endodermis. La función de ésta es el control de absorción de iones y agua hacia los tejidos conductores de la planta. Las raíces jóvenes tienen extensiones de la epidermis, los pelos radiculares, que están en contacto directo con los poros

llenos de agua del sustrato y la mayoría de la captación de la solución se hace por ellos (Skytt y Fuchs, 2001).

La zona de elongación de la raíz se sitúa por detrás del meristemo, con crecimiento hacia abajo (gravitropismo positivo). Se originan una serie de sucesos de carácter hormonal a través de pequeños gránulos de almidón, muy densos, de las células de la caliptra terminal de la raíz, que responden a la gravedad y dan sentido al crecimiento de la raíz en función del movimiento de la tierra. También reaccionan negativamente a la luz y tienen crecimiento diferencial, ciñendo el desarrollo a la zona que no contacta con partículas duras.

Las raíces laterales se originan de diferente forma que las hojas y brotes. Su formación se inicia en puntos de actividad meristemática más lejanos, el periciclo, atraviesan las capas exteriores de células del córtex y epidermis y se conectan con la raíz principal. Las raíces viejas forman tejidos protectores suberosos (felógeno o cambium suberoso) de células no especializadas que sustituyen a la epidermis de las raíces más jóvenes, en sus capas más externas. En muchas células floemáticas radicales de rosa se depositan cristales de oxalato de calcio. El crecimiento secundario de la raíz se da a partir del cambium (Waisel et al., 2002), cilindro de células meristemáticas entre el xilema primario y el floema, con elementos xilemáticos transversales del centro al perímetro, que en raíces viejas llegan a ser muy variables de tamaño. Los vasos xilemáticos son solitarios o apareados, sin anillos anuales aparentes, de forma que permitirían distinguir raíces de rosa de las de otras especies, además de presentar cristales característicos en algunas células floemáticas.

### **3.1.3. La producción y el comercio de rosa**

La rosa híbrido de té es uno de los cultivos de flor cortada de mayor producción mundial, con más de seis billones de tallos vendidos anualmente en los últimos años (IFD 2010). Anualmente se plantan entre 60 y 80 millones de nuevas plantas de rosa sólo para satisfacer la demanda de producción de flor cortada y más de 200 millones de plantas de rosa en total en todo el mundo (Zlesak, 2007; IFD 2010; Nau, 2011).

En la floricultura actual y en sus mercados se da un auge de los países exportadores de flor de bajo coste, cercanos al ecuador (Kenia, Etiopía, Ecuador, Colombia, Malasia, Vietnam,..), gracias a sus condiciones favorables de cultivo, demanda creciente de precios competitivos en los principales mercados y desarrollo eficaz de la logística. Los productores de costes más elevados optan por diferenciarse o se trasladan a producir a regiones de menor coste. Los grandes productores tradicionalmente habían sido los grandes consumidores, pero esa tendencia parece haberse invertido definitivamente (Rabobank, 2015).

La producción nacional en los países de consumo elevado está estancada, pero queda un mercado para rosas de alta calidad para productores cercanos. Hay productores de rosas de gran cultivo, con economías a la escala necesaria para la venta en grandes mercados, y pequeños productores, que en general acentúan calidad y servicio en los mercados nacionales con menores costes de distribución (Pemberton, 2003) (Figuras 3.3 y 3.4).

Otro aspecto interesante es el coste ecológico y valor social de la industria de la flor cortada. Organismos con motivación ética y medioambiental justifican en parte las producciones actuales en regiones de bajo coste ante producciones locales de regiones occidentales (no mediterráneas) por el consumo en carburantes que esto implicaría, menor que el necesario para su transporte y distribución (ETI, Ethical Trading Initiative 2015), aunque las condiciones sociales no tengan nada en común. Faltaría también el estudio comparativo con producciones como las de nuestras zonas, mediterráneas y mucho más cercanas.

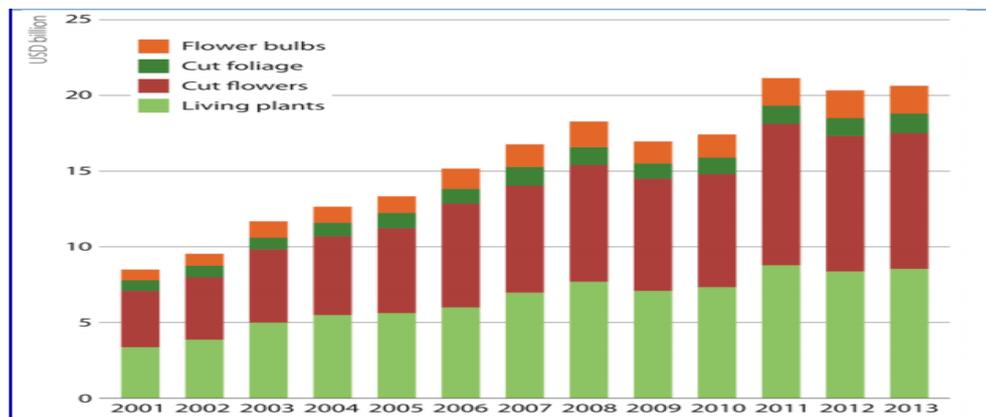


Figura 3.3. Evolución de las exportaciones mundiales de productos ornamentales: bulbosas, verde de corte, flor cortada y planta viva, entre 2001 y 2013. (UN Comtrade, 2014)

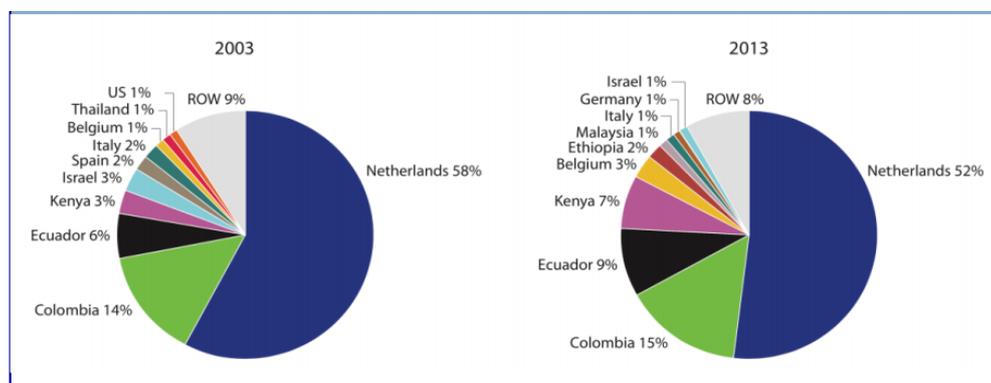


Figura 3.4. Principales países exportadores de flor cortada (% sobre el total): variación a lo largo de una década (UN Comtrade, 2014).

En España la producción de flor cortada, y en concreto la rosa, sufrió un fuerte descenso entre el 2000 y el 2010 debido a la irrupción en el mercado de los productores emergentes africanos y sudamericanos (Figura 3.5). La rosa disminuyó al 20% de producciones anteriores (Tabla 3.2), quedando principalmente producciones tradicionales de calidad, de consumo cercano y algunas pequeñas exportaciones a países vecinos. (Tabla 3.1; FEPEX, 2015).

**Tabla 3.1. Importaciones y exportaciones (€) de rosas y otros productos ornamentales en España en 2014.**

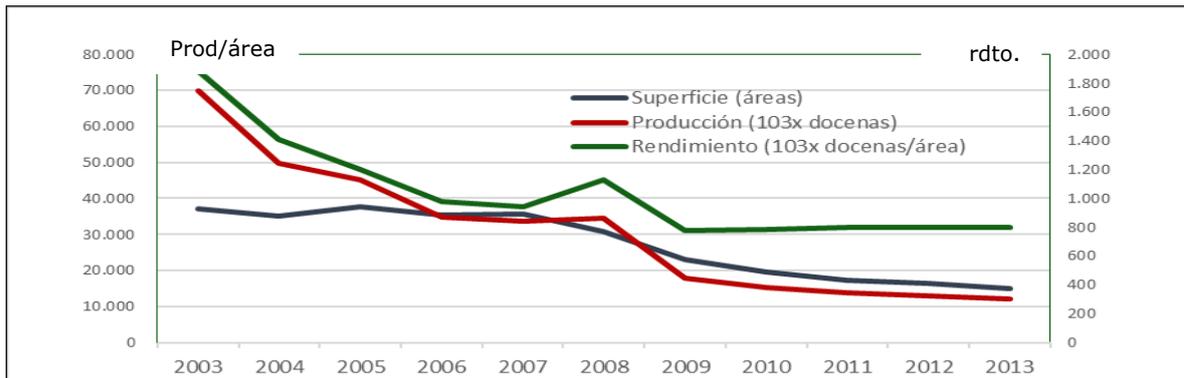
| <b>EXPORTACIONES</b> | ALEMANIA       | FRANCIA        | PPBB            | PORTUGAL       | TOT.UE-28        | EXT. UE         | TOTAL            |
|----------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|------------------|
| ROSALES              | 6142           | 96579          | 432             | 89697          | 385028           | 39579           | 424607           |
| CLAVEL               | 45643          | 775618         | 10395503        | 259437         | 18033390         | 16252           | 18049642         |
| <b>ROSA</b>          |                | 2311           |                 | 974390         | 976701           | 22529           | <b>999230</b>    |
| TOTAL FLOR           | 45643          | 777929         | 10395503        | 1233827        | 19010091         | 38781           | 31789538         |
| <b>TOTAL</b>         | <b>2,5E+07</b> | <b>7,7E+07</b> | <b>39658670</b> | <b>2,1E+07</b> | <b>218479883</b> | <b>62599203</b> | <b>281079086</b> |
| <b>IMPORTACIONES</b> | ALEMANIA       | FRANCIA        | PPBB            | PORTUGAL       | TOT.UE-28        | EXT. UE         | TOTAL            |
| ROSALES              | 716074         | 61414          | 237875          | 372            | 1049571          | 36497           | 1086068          |
| CLAVEL               |                | 1699           | 86478           | 218665         | 309487           | 10212456        | 10521943         |
| <b>ROSA</b>          | 16134          | 38437          | 2601505         | 38178          | 2694280          | 29033773        | <b>31728053</b>  |
| TOTAL FLOR           | 16134          | 38437          | 2601505         | 38178          | 2694280          | 29033773        | 70243109         |
| <b>TOTAL</b>         | <b>7287121</b> | <b>7446829</b> | <b>62219917</b> | <b>5483249</b> | <b>102159652</b> | <b>67202694</b> | <b>169362346</b> |

(FEPEX, 2015)

**Tabla 3.2. ROSAS: Análisis provincial de superficie, rendimiento y producción en España, 2013.**

|               | Superficie (áreas) |               |               | Rendimiento (10 <sup>3</sup> docenas/área) |            | Producción (10 <sup>3</sup> Docenas) |
|---------------|--------------------|---------------|---------------|--|------------|--------------------------------------|
|               | Aire libre         | Protegido     | Total         | Aire libre                                 | Protegido  |                                      |
| CANARIAS      | -                  | 5.200         | 5.200         | -  | 800        | 4.159                                |
| MURCIA        | 700                | 1.700         | 2.400         | 875  | 1.025      | 2.355                                |
| C. VALENCIA   | -                  | 2.300         | 2.300         | -  | 626        | 1.440                                |
| BALEARES      | -                  | 780           | 780           | -  | 1.625      | 1.268                                |
| ANDALUCÍA     | -                  | 1.213         | 1.213         | -  | 868        | 1.053                                |
| Barcelona     | -                  | 200           | 200           | -  | 683        | 137                                  |
| CATALUÑA      | -                  | 200           | 200           | -  | 683        | 137                                  |
| <b>ESPAÑA</b> | <b>1.830</b>       | <b>13.113</b> | <b>15.043</b> | <b>572</b>                                 | <b>831</b> | <b>11.993</b>                        |

(MAGRAMA, 2015)



**Figura 3.5. Rosa (flor cortada): evolución de la superficie (áreas), producción (docenas x 1000) y rendimiento (docenas x 1000/área) en España del año 2003 al año 2013 (MAGRAMA, 2015).**

### 3.1.4. La rosa: flor cortada

La rosa como flor cortada consta de un tallo con hojas y espinas y una flor. Al no disponer de raíces ni de la aportación hormonal y materiales disueltos de éstas, pero sí de la transpiración, el agua sube y hace que el aire entre en el sistema vascular por el punto de corte y dificulta el aporte de agua a hojas y flores, los sumideros más importantes de la planta. Por esta razón la vida en vaso de la rosa dependerá principalmente del balance hídrico, a partir de la absorción de agua por la flor, el transporte de la misma por el tallo y la transpiración (Put y Clerkx, 2003).

Las características que se han de tener en cuenta a la hora de elegir una variedad de rosa para flor cortada son:

- El tamaño de la flor, las últimas tendencias van hacia tamaños de flor superior a 11 cm; por debajo de 9 cm tienen menos demanda
- La vida en vaso, puede ir desde un mínimo de 12 días hasta 21 días.
- La productividad, se sitúa entre unas 200 flores /m<sup>2</sup> para las flores grandes y las 300 flores /m<sup>2</sup> para las medianas.
- La presencia de espinas, debe ser reducida ya que rompe y rasga las hojas en el transporte.
- Longitud de vara floral, la demanda se sitúa a partir de los 50 cm como mínimo.
- Forma de la yema, se prefiere la de los híbridos de té, alta, cilíndrica y de apertura en espiral lenta, que dure varios días, pero que llegue a abrirse completamente (Nau, 2011).

Los factores que parecen tener más importancia en la postcosecha de la flor cortada y por tanto, en una vida en vaso del producto comercial más larga, son la variedad y la temperatura, pero es difícil hacer comparaciones porque los métodos de valoración suelen ser diferentes según los casos. Existen estudios de los factores que intervienen en la duración de la flor cortada, como la humedad relativa en cultivo o la temperatura en el momento de cosecha; al ser las rosas sensibles al etileno, también será importante que su almacenamiento se haga lejos

de otros productores de etileno (Serek et al, 2006). El grupo de factores ligados a la variedad de la vara floral tienen que ver con su estructura y morfología. Ya se ha visto en la morfología de los brotes que los puntos de mayor resistencia al flujo de agua son el de abscisión y la 'zona de seguridad' situada bajo el pedúnculo. En secciones transversales de los tallos florales se puede ver que hay numerosos vasos xilemáticos (más de 1000) con membranas medulares intervasales y orificios capilares demasiado pequeños para el paso de bacterias o de macromoléculas, que se acumulan al encontrar esta pseudobarrera (Put y Clerkx, 2003).

La duración en vaso de las flores cortadas es una de las características de calidad más valoradas en la floricultura ornamental. La rosa, a diferencia de otras flores cortadas como el clavel, es poco sensible al etileno, pero sí que lo es a la obstrucción vascular (embolia gaseosa o taponamiento bacteriano).

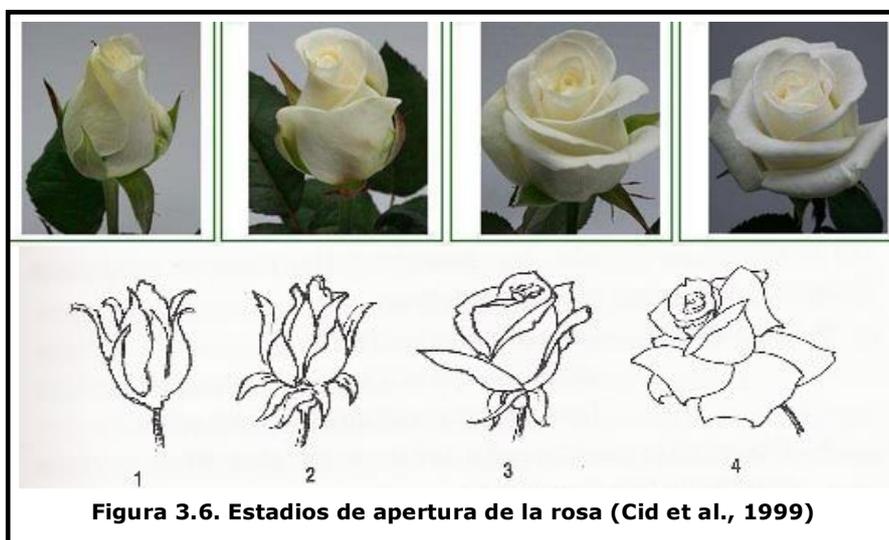


Figura 3.6. Estadios de apertura de la rosa (Cid et al., 1999)

### 3.1.5. Nutrición y respiración radicular en rosa

Las prácticas de fertilización en cultivo de rosa para flor cortada han estado relacionadas a aplicaciones tradicionalmente mucho más elevadas que en el resto de producciones. Así, un invernadero de rosa podía llegar a recibir cantidades de hasta 7000 kg/ha y año de N, de los que se ha comprobado que se perdían por lixiviación máximos de un 50 - 60%, correspondientes a 2000-3000 kg/ha de N anuales que se iban acumulando en el subsuelo del cultivo. Estos datos sugerían aplicaciones excesivas para las necesidades del cultivo. Estudios recientes de las necesidades del cultivo a partir del análisis de los tejidos del tallo floral situaban estas necesidades entre 1200 y 1700 kg/ha y año de N, mucho menores que algunas aportaciones tradicionales pero aún muy lejos de cualquier otro cultivo hortícola intensivo o forzado (Cabrera, 2003).

Un estudio detallado de las necesidades nutritivas de los rosales y los abortos florales no llega a mostrar la correlación entre factores de nutrición mineral y los abortos de los ápices florales, y otros estudios dan resultados contradictorios sobre estos dos aspectos del desarrollo de la planta (White, 1987), aunque algún microelemento como el boro sí se muestra causa del aborto de las yemas florales en rosa, los síntomas de su deficiencia no llegaron a ser consistentes.

Estudios sobre el efecto de la salinidad en cultivo de rosa mostraron que soluciones más salinas van unidas a una menor elongación de los tallos de rosa, sin llegar a causar toxicidades. También se reduce la absorción de nitrato, aunque el desarrollo de la flor sigue siendo normal, lo que sugiere una movilización de las reservas de tallo y hojas y la captación de N amoniacal no varía, supuestamente por su difusión a través de la membrana celular a bajas concentraciones (Lorenzo et al., 2000). Ninguno de los tratamientos afectó al contenido mineral de N, P o K en hoja, aunque sí al ratio K/Na, que aumentó con salinidad alta, señalando un posible almacenamiento de sodio en los tejidos.

Aunque en algunos cultivos sin suelo de especies hortícolas comestibles como pimiento, tomate, lechuga, pepino y melón se han mostrado los efectos favorables de la oxigenación del medio radicular en el rendimiento y en la calidad de las producciones obtenidas (Wagenvoort et al., 1985; Tachibana, 1988; Yoshida et al., 1996; Marfà y Guri, 1999; Guri, 2002) en especies para la producción de flor cortada, y más concretamente en rosal, la información sobre los efectos de la aireación del medio radicular es limitada. Algunos autores han mostrado los efectos favorables de una adecuada aireación en el enraizamiento y el crecimiento de esquejes de rosal (Gislerød et al., 1997) y los efectos perjudiciales de la deficiencia de oxígeno en la propagación vegetativa de dicha especie (Baas, et al. 1997). Estos resultados sugirieron que la hiperoxigenación mediante la técnica de la oxifertirrigación (Marfà et al, 2005) del medio de cultivo (sustrato) podía incrementar el rendimiento del rosal. Así, Guri y Marfà (2002) compararon la producción y la calidad de rosas obtenidas en parcelas no oxifertirrigadas (con una concentración media de oxígeno disuelto en el agua de riego de 4.4 ppm) frente a las obtenidas en parcelas oxifertirrigadas (concentración media de oxígeno del agua de riego de 16 ppm) y se registró un aumento significativo del 19% en el número de flores cosechadas durante un año en las parcelas oxifertirrigadas respecto de las que no lo fueron.

### **3.2. Objetivos**

La revisión de los estudios y las prácticas habituales de fertilización en rosa y del comportamiento prometedor del cultivo en condiciones de aireación radicular óptima nos lleva a plantearnos:

- Estudiar el efecto de la oxifertirrigación sobre la producción de un cultivo de rosal para flor cortada,

- Estudiar el efecto de la oxifertirrigación sobre la calidad de rosa para flor cortada y sobre su comportamiento en postcosecha.
- Estudiar los efectos de la oxifertirrigación sobre la conductividad hidráulica radicular, la absorción de nutrientes y el contenido mineral de diversas partes de la planta cultivada de rosal

### **3.3. Material y métodos**

#### **3.3.1. Localización e instalaciones**

##### **3.3.1.1. Invernadero**

El invernadero en el que se realizaron las experiencias es una nave de orientación N-S y con una superficie de 270 m<sup>2</sup> (30 m x 9 m), dividido en dos mitades transversales con separación ambiental opcional; la separación entre pilares es de 2 m, la altura de los mismos es de 2,8 m y la altura máxima del invernadero es de 4,5 m. La estructura de la nave es de hierro galvanizado de cubierta semicircular y con plástico de tipo polietileno térmico de larga duración de material de cubierta; dispone de acceso por los dos frontales de la nave mediante puertas correderas de 3 m de ancho.

El invernadero está dotado de control automático de las condiciones ambientales (temperatura aérea y del sustrato, ventilación, concentración ambiental de CO<sub>2</sub>). Su ventilación es lateral y está regulada por la consigna fijada de temperatura, generalmente 25°C para el cultivo de rosa, así como de un sistema doble de calefacción: el general de agua caliente distribuida mediante tubos corrugados a nivel del sustrato de cultivo y un calefactor de aire caliente de soporte térmico ambiental; el sistema se activa por debajo de 16°C y se desactiva al llegar a 20°C. El invernadero también dispone de una estación meteorológica interna para el registro de temperatura, radiación y humedad, así como de un tanque lisimétrico para el control de la tasa de drenaje, de quemadores de azufre para prevenir ataques de oídio y de un sistema automatizado de fertilización carbónica ambiental.

##### **3.3.1.2. Fertirrigación**

La fertirrigación se llevó a cabo con un equipo compuesto por (1) un autómatas de irrigación del tipo MCU FERTI<sup>®</sup> para el control de fertirrigación, recogida y desinfección de lixiviados y recomposición de soluciones nutritivas, (2) un cabezal para la preparación de la solución nutritiva y la reconstitución de la misma a partir de agua y de solución lixiviada previamente filtrada y desinfectada y (3) una red de riego por goteo. La desinfección de los lixiviados se realizó mediante radiación ultravioleta (dosis de radiación equivalente a 250 MJoules.m<sup>-2</sup>; Marfà

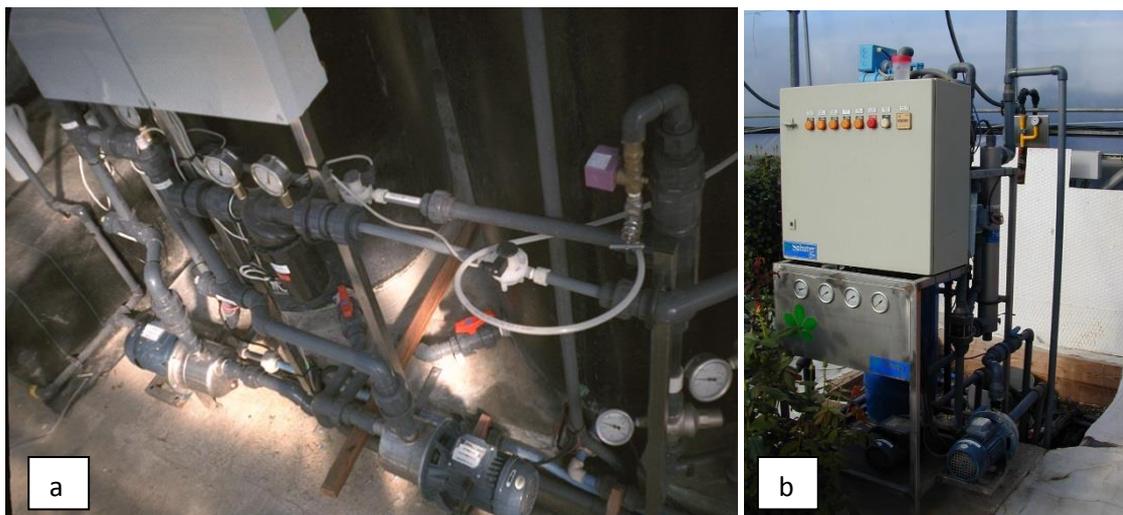
et al., 2000a) en un esterilizador REX de Sefiltra S.A. (Sociedad Española de Microfiltración) para su posterior reutilización. El control de posibles desequilibrios de la solución nutritiva se realizó mediante un sistema de sondas de CE y pH que realizaron las medidas de forma continuada. El arranque del riego se realizó de acuerdo con una consigna media de radiación solar global de  $300 \text{ W.h.m}^{-2}$  empleando una sonda solarimétrica situada sobre la cubierta vegetal; complementariamente, para el arranque del riego, se dispuso de una bandeja a la demanda o lisímetro de drenaje, que contenía 12 rosales. Las dosis fueron modificadas de forma automática con objeto de asegurar la tasa de drenaje deseada (alrededor del 20%). Se emplearon dos líneas portagoteros, con goteros antidrenantes y autocompensantes con un caudal nominal de  $2 \text{ L.h}^{-1}$  y a una distancia entre goteros de 25 cm.

La composición del agua de riego utilizada, mezcla de agua de lluvia y agua de pozo, y de la solución nutritiva inicial se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3. Media de la composición del agua de riego y composición inicial de la solución nutritiva**

| meq.L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | K <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | pH  | CE   |
|-----------------------|------------------------------|---|-------------------------------|----------------|-----------------|------------------|------------------|-----|------|
| Agua de riego         | 0.53                         | 0.07  | 1.19                          | 0.11           | 0.73            | 3.36             | 0.80             | 7.6 | 0.51 |
| Solución nutritiva    | 9                            | 1.5   | 2.82                          | 5              |                 | 6                | 3                | 5.8 | 2.0  |

La solución nutritiva (SN) se preparó a partir de cinco depósitos de 500 L de abonos concentrados y uno de ácido nítrico para el ajuste del pH. La cantidad inyectada de las soluciones concentradas se fijaron de acuerdo a la formulación de la SN y de su conductividad eléctrica (CE). El autómata reguló la cantidad de solución y de ácido a aplicar para alcanzar la CE y el pH fijados como óptimos. El agua de riego se mezcló con los lixiviados mediante una válvula de tres vías, con un valor consignado de CE de tal forma que la cantidad de lixiviados reutilizados fuera la producida al día para que la cantidad de lixiviados se mantuviera en los límites de capacidad de almacenamiento y no se perdiera. La SN se almacenaba en un depósito desde el que se abastecía la red de irrigación y llegaba a la planta, gracias al cabezal y la red de riego.

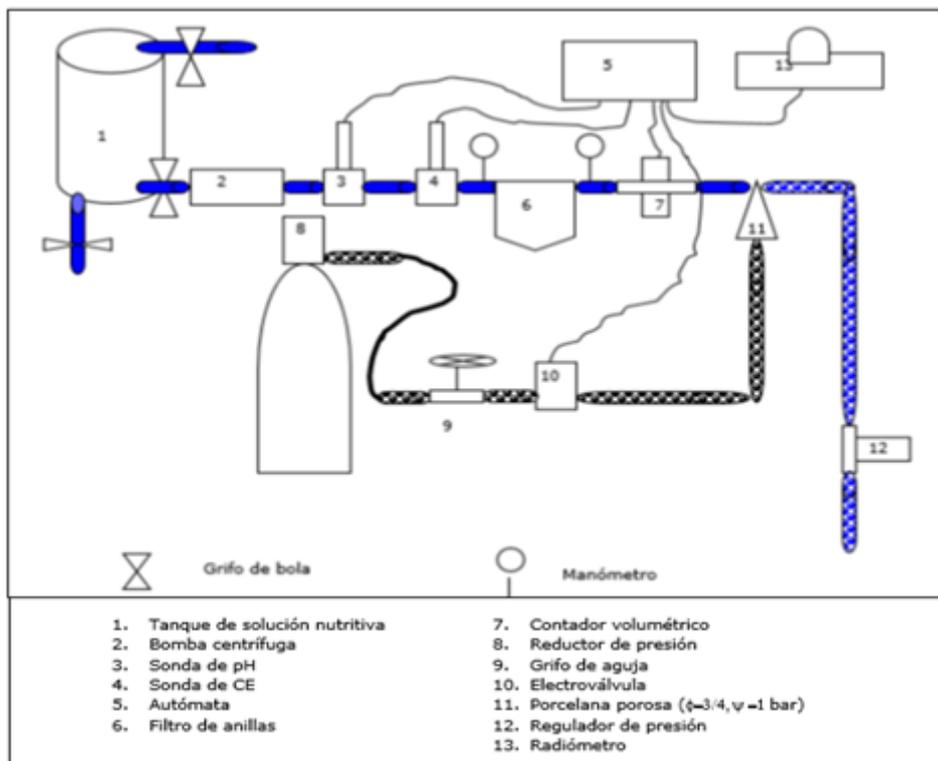


**Figura 3.7. Cabezal de riego (a) y equipo de desinfección de lixiviados (b)**

La programación del riego se realiza a partir de las medidas radiométricas y el tanque lisimétrico (o bandeja a la demanda) del invernadero simultáneamente. La sonda del radiómetro está ubicada en el centro del invernadero, por encima de la cubierta vegetal y mide la radiación solar global sobre la cubierta vegetal de forma que al alcanzar el valor fijado de radiación se activa el riego. Este sistema se complementa con la información registrada en el tanque lisimétrico para evitar los desequilibrios entre evapotranspiración del cultivo y su equivalente energético de agua evapotranspirada medido radiométricamente (menor al real) que se suelen dar en periodos cálidos de baja radiación o durante la noche. La bandeja a la demanda tiene unas dimensiones de 2.2 x 0.45 m y está colocada bajo una unidad de cultivo para permitir la recogida del drenaje. El sistema está compuesto de dos sondas, una que permanece continuamente bajo el agua y la otra que lo está sólo según el nivel de agua drenada; cuando la primera sonda deja de estar sumergida se activa el riego.

### **3.3.1.3. Técnicas de enriquecimiento de oxígeno**

**Oxifertirrigación.** La sobresaturación de oxígeno de la solución nutritiva utilizada se realizó siguiendo la metodología empleada en la técnica de oxifertirrigación (Marfà et al., 2005). Dicha técnica comprende un equipo de inyección de oxígeno a presión compuesto por una porcelana porosa situada en el interior de una cámara intercalada en la conducción primaria de riego. El oxígeno inyectado proviene de una bombona industrial de oxígeno gaseoso comprimido. La bombona de oxígeno dispone de un manoreductor para gases comprimidos que permite regular la presión del gas a la salida de la bombona y mediante una válvula se regula la inyección de oxígeno disuelto para alcanzar una concentración media de 16.5 ppm de O<sub>2</sub> disuelto en el agua de riego (Figura 3.8). Para asegurar la concentración sobresaturante que se desea aplicar se llevó a cabo un seguimiento de la concentración de oxígeno disuelto en el agua semanalmente.



**Figura 3.8. Componentes y esquema del cabezal de riego con oxifertirrigación**

La concentración de oxígeno disuelto se midió mediante un oxímetro equipado con un electrodo selectivo de oxígeno (Schoott Geräte®, mod. 9009/2®) y una consola para lecturas digitales (Design Instruments, mod. Consort Z621® DESIN). El intervalo de lectura del equipo es de 0-60 ( $\pm 0.1$ ) ppm  $O_2$  i de 0 a 40°C ( $\pm 0.1^\circ C$ ) para la temperatura. Las muestras de SN sobresaturada de  $O_2$  se tomaban "in situ", a la salida de los goteros, mediante unos viales de vidrio de 10 mL de volumen, reduciendo o aumentando el caudal de oxígeno mediante válvulas de aguja si la concentración de oxígeno no estaba comprendida entre 14 y 16 ppm.

Las oxifertirrigación se aplicó desde el inicio del cultivo y durante todo el período experimental a las plantas del tratamiento correspondiente y, en este caso, en todos los riegos la solución nutritiva contenía la concentración de oxígeno antes mencionada.

**Oxigenación nocturna.** La aportación de  $O_2$  durante la noche no se realizó mediante la instalación de riego sino que se aplicó directamente al sustrato mediante unos goteros enterrados a 15 cm de profundidad, conectados a las bombonas de oxígeno de gas comprimido. El control de la concentración en la solución del sustrato, se realizó siguiendo el mismo método descrito anteriormente.

#### 3.3.1.4. Cámara de postcosecha

Para el ensayo de postcosecha se utilizó una cámara con condiciones ambientales similares a las de una habitación doméstica: fotoperíodo: 12h luz/12h oscuridad, humedad relativa: 85%, temperatura: 20 °C, densidad de flujo fotónico fotosintético: 1  $\mu\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ . El control ambiental se realizó mediante bomba de calor, equipo de aire acondicionado, deshumidificador, sistema "fog" y un reloj que controlaba la duración del fotoperíodo.

#### 3.3.2. Cultivos y experimentos

La descripción de todos los experimentos en cultivo sin suelo de rosa para flor cortada está detallada en la Tabla 2.1.

##### 3.3.2.1. Cultivos en banqueta. Experimentos I.1, I.2 y I.3

###### **Experimentos I.1, I.2 y I.3**

El invernadero se dividió en dos módulos de 135 m<sup>2</sup> y 121,5 m<sup>2</sup> (101,24 m<sup>2</sup> y 95,42 m<sup>2</sup> útiles respectivamente). El cultivo se distribuyó en cinco banquetas de polipropileno blanco y sección rectangular, de 11.20 m y 11 m longitud (respectivamente para cada módulo), 0.35 m de anchura y 0.25 m de altura, separadas por pasillos de 1.35 m. Las banquetas disponían de un canal lateral para recogida de lixiviados. Dos banquetas de cada módulo fueron oxifertirrigadas y las tres restantes no; de forma que se dispuso para esta fuente de variación de cuatro parcelas oxifertirrigadas y seis sin oxifertirrigar.

**Cultivo 1.** Cada banqueta se dividió transversalmente en dos mitades, una para cada cultivar de rosa para flor cortada estudiado.

La plantación se realizó el 15 de febrero, empleando los dos cultivares de rosal Dallas® y Red Corvette®, injertados sobre *Rosa indica* L. Las plantas se dispusieron a 12 cm de distancia entre sí, en dos líneas longitudinales a lo largo de la banqueta, resultando una densidad de plantas de 6.5 m<sup>-2</sup>. Como sustrato se empleó en la mitad inferior de la banqueta perlita de granulometría gruesa (3-5 cm de diámetro de partículas, tipo A-13®) y en la mitad superior perlita de granulometría fina (0-3 mm de diámetro de partículas, tipo B-10®) de la empresa EUROPERLITA S.A. El cultivo se condujo empleando la técnica del arqueado (Gutiérrez, 2001). Después de cada flujo floral se procedió a una poda con objeto de homogeneizar y sincronizar el siguiente flujo floral. Se controlaron nueve flujos florales durante un periodo de 2 años (abril 2000 –junio 2002).

Los experimentos realizados en este cultivo fueron:

**Experimento I.1:** Efectos de la oxifertirrigación en la productividad y la calidad de la flor cortada de dos variedades de rosa para flor cortada

**Experimento I.2:** Efectos de la oxifertirrigación en la postcosecha de la flor cortada de dos variedades de rosa para flor cortada

**Cultivo 2.** La plantación se realizó en julio del 2003, en las mismas banquetas, e idéntica técnica de cultivo que en el cultivo 1. El cultivar utilizado fue Lovely Red® (var. Meiburu de la empresa Rosas Meilland), injertado sobre un pie de *Rosa indica* L. El cultivo se realizó en sistema cerrado, con recogida y recirculación de lixiviados y con abonado carbónico.

En el cultivo 2 se realizó el:

**Experimento I.3:** Efectos combinados de la oxifertirrigación y la aplicación de oxígeno nocturna en el contenido mineral de fracciones de flor cortada de rosa.

**Diseño experimental.** El diseño experimental fue un factorial con dos fuentes de variación (2x2); la primera referida a la oxifertirrigación que comprendió dos tratamientos (plantas oxifertirrigadas y plantas no oxifertirrigadas) y la segunda referida: en el cultivo 1, a los dos cultivares ensayados (Red Corvette® y Dallas®) y, en el cultivo 2, a los dos sustratos, perlita y fibra de coco.

### 3.3.2.2. Cultivos en contenedor. Experimentos I.4 y I.5

#### **Experimentos I.4 y I.5**

El cultivo se realizó en las condiciones generales del invernadero antes descrito, con calefacción basal ( $T^a < 16^{\circ}\text{C}$ ), fertirrigación, desinfección de los lixiviados y recomposición de la solución nutritiva a partir de los lixiviados; el riego y la fertilización se controló automáticamente.

En las dos experiencias se utilizaron plantas de rosal de uno y dos años (cv. Red Corvette®), injertadas sobre *Rosa indica major*. El cultivo se realizó en contenedores de 22 cm de diámetro con dos tipos de sustrato: perlita B6 (grado fino, de 0-3 mm) y perlita A13 (grano grueso, 3-5 mm) con y sin aportación diurna suplementaria de oxígeno en la solución nutritiva. El tratamiento con oxifertirrigación se realizó manteniendo la solución nutritiva con sobresaturación de oxígeno de forma continua siendo la concentración media de  $\text{O}_2$  disuelto de 16 ppm.

**Cultivo en contenedor 1.** En este cultivo se dispuso un diseño factorial (2 x 2) con las fuentes de variación sustrato (perlita B6 y perlita A13) y oxifertirrigación (sí/no), con 5 repeticiones.

En este cultivo se realizó el:

**Experimento I.4:** Efectos de la oxifertirrigación en la conductividad hidráulica radicular.

**Cultivo en contenedor 2.** En este cultivo se incorporó el factor de variación de aporte o no de oxígeno durante la noche, que se realizó mediante pulsaciones del mismo directamente en el interior del sustrato a través del contenedor, resultando un diseño 2x2x2 factorial (fuentes de variación: sustrato, oxifertirrigación y oxigenación nocturna) con 5 repeticiones para cada tratamiento.

En este cultivo se realizó el:

**Experimento I.5:** Efectos combinados de la oxifertirrigación y la aplicación de oxígeno nocturna en el contenido foliar de nutrientes.

### 3.3.3. Parámetros medidos

**Experimento I.1: Concentración de oxígeno, productividad y calidad de la flor**

**Concentración de oxígeno.** La concentración de oxígeno disuelto en la solución del medio radicular se controló diariamente. Las medidas se realizaron recogiendo la solución en tubos de ensayo de 10 mL (*Eijkelkamp, ref. 19.21.03*) con tapón de goma de cierre hermético, de dos muestras por tratamiento. Se tomaron muestras de la solución con sondas muestreadoras (*Rhizon Soil Moisture Sampler, ref. Eijkelkamp 19.21.01*) (Ver apartado 5, Figura 5.3 a) para extraer la solución del sustrato para cada unidad de muestra. La medida del oxígeno de las muestras se realizó lo más inmediatamente posible desde la toma de la muestra con un oxímetro DESIN (Mod. Consort Z 621) y electrodo de oxígeno Schott Geräte 9009/2 (Figura 5.3 b), con intervalo de lectura de 0 a 60 ppm de O<sub>2</sub> y precisión ±0.01/0.1 ppm, que permite medir el oxígeno en el agua, el porcentaje de saturación de oxígeno (precisión ±0.1%) y la temperatura del agua (precisión ±0.1°C).

Productividad y calidad de la flor. Con objeto de evaluar los efectos de la oxifertirrigación en la productividad de los rosales se registró, en cada flujo de floración del cultivo en banqueta 1 (Tabla 2.1) y para cada tratamiento, la producción de rosas. Por lo que se refiere a la calidad de las flores cosechadas se determinó la longitud de la vara floral desde el punto de inserción de la flor hasta el punto de corte y el peso fresco conjunto de la flor y de la vara floral. En cada flujo de floración analizado se evaluaron los mencionados parámetros de calidad en muestras de 30 flores escogidas al azar, correspondientes a cada tratamiento.

**Experimento I.2: Duración, estadio de apertura y peso relativo de agua**

En el experimento de post-cosecha del cultivo en banqueta 1 (Tabla 2.1) se seleccionaron 5 flores de cada cultivar y tratamiento en estadio de apertura 1 (Figura 3.6), recolectadas a la salida del sol y con una longitud igual o superior a 85 cm. Se igualaron las longitudes de todas las flores a 85 cm. Cada flor se colocó, inmediatamente después de cosechada, en un jarrón lleno con un 1L de agua de la red de agua potable, que se renovó cada dos días; la boca del jarrón se selló con film de plástico para evitar la evaporación de agua. Se controlaron los siguientes parámetros: peso fresco de la flor, consumo de agua contenida en el jarrón y estadio de apertura de la flor cortada (Cid et al., 1999), cada dos días durante los ocho primeros del ensayo y todos los días a partir del noveno. A partir de los dos primeros parámetros se calculó la media diaria de pérdida relativa de peso de la flor. Se consideró el final de la vida de la flor cuando los pétalos perdían la turgencia y se oscurecían o bien cuando la flor perdía la verticalidad.



**Figura 3.9. Ensayo de post-cosecha en la cámara de condiciones estándar.**

**Experimento I.3: Contenido mineral de fracciones de flor cortada de rosa**

Se evaluó el contenido mineral de diferentes partes y órganos de la flor cortada (sépalos, pétalos, tallo superior e inferior y hojas); la valoración se realizó sobre flores del cultivo en banqueta 2 (Tabla 2.1) recién cosechadas (estadio 2) y una vez finalizado el periodo de vida en vaso. La determinación de potasio se realizó por el método de fotometría de llama y para la determinación de calcio se utilizó espectroscopia atómica.

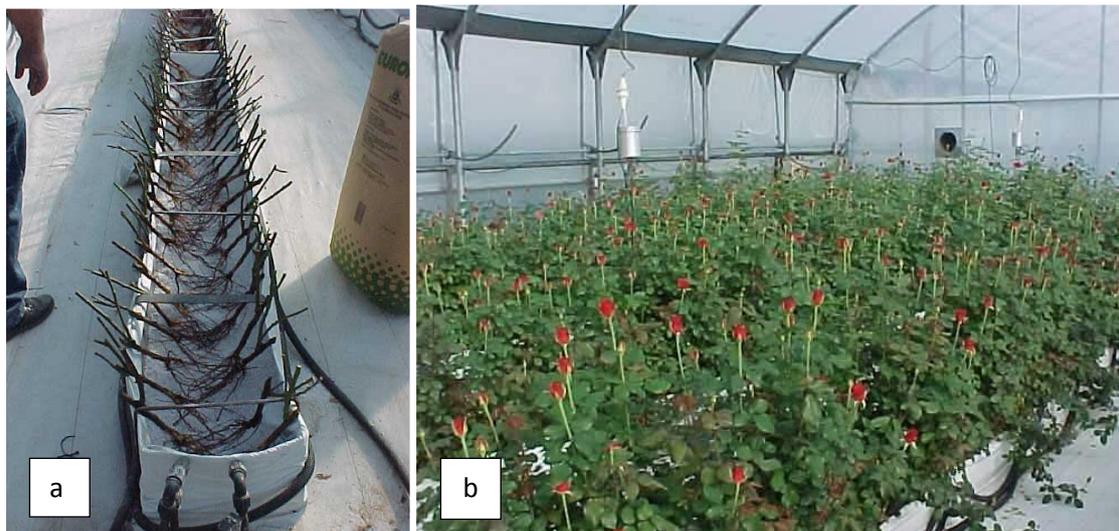


Figura 3.10. Vista de la plantación (a) y del cultivo avanzado (b).

#### Experimento I.4: Conductividad hidráulica radicular y parámetros biométricos

**Conductividad hidráulica radicular.** En plantas del cultivo en contenedor 1 se evaluó la conductividad hidráulica radicular ( $L_r$ ) mediante una bomba de presión tipo Schölander (Soilmoisture, USA), siguiendo la metodología de Ramos y Kaufmann (1979) y Chen y Barber (1990), con obtención de muestras de raíces jóvenes separadas del sistema radicular poco antes. Cada raíz elegida para la medición se sumergió en agua y se colocó en la bomba de presión. La parte basal de la raíz se introdujo en un pequeño recipiente flexible que contenía el agua de aplicación; ésta ejercía una presión constante (en general 0.5 MPa) sobre la raíz. La parte superior de la raíz se insertaba en un pequeño tubo de plástico flexible por el que se podía ver circular el agua al aplicar presión sobre la raíz. Mientras el agua circulaba, se medía el índice de flujo cada 30 segundos. El flujo de agua resultante se calculó a partir de:

$$J = (h \cdot (\pi \cdot r^2)) / t \text{ (cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

siendo:  $h$  = altura de agua en el tubo,  $r$  = radio del tubo,  $t$  = tiempo

La conductividad hidráulica ( $L_r$ ) se obtuvo de la aplicación de:

$$L_r = J / (P \cdot L) \text{ (cm}^2 \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

siendo:  $P$  = presión aplicada (MPa),  $L$  = longitud radicular (cm)

La longitud radicular se midió con un medidor de áreas o planímetro (ADC, AM100-001).

La conductividad hidráulica específica ( $L_{re}$ ) se calculó basándose en la conductividad hidráulica y el peso de de la raíz evaluada:

$$L_{re} = L_r / \text{peso seco de la raíz}$$

**Parámetros biométricos.** Se evaluó la biomasa aérea de cada planta del cultivo en contenedor 1 al final del primer flujo productivo, cuatro meses después de la plantación. Los tallos florales y los demás brotes de cada planta se cortaron por el punto de inserción. El área foliar del total de hojas de cada planta, previamente agrupadas, se midió con un planímetro (ADC, modelo AM100-001). Las hojas, tallos y flores se secaron en una estufa ventilada a 60°C hasta peso constante y posteriormente se pesaron las fracciones en una balanza de precisión (Scaltec, modelo SPB32).

**Experimento I.5: Contenido foliar de nutrientes**

Se determinó el contenido de nutrientes de hojas y peciolo de plantas del cultivo en contenedor 2 mediante un electrodo selectivo de iones para el nitrato, siguiendo el método colorimétrico de Bray-Kurtz seguido de espectrofotometría ( $\lambda=660\text{nm}$ ) para la determinación del fósforo, fotometría de llama para el potasio y espectroscopia atómica para el hierro, el calcio y el magnesio.

### 3.4. Resultados y discusión

#### 3.4.1. Concentración de oxígeno en la solución nutritiva

##### **Experimento I.1**

La concentración media de oxígeno en la solución nutritiva sobresaturada de O<sub>2</sub> fue de 15.15 ppm ( $\pm 0.2$ ) a una temperatura media de 22.4°C. Esta concentración se mantuvo durante todo el cultivo.

La concentración media de oxígeno en la solución nutritiva no sobresaturada fue de 7.03 ppm a una temperatura media de 22.4 °C.

#### 3.4.2. Productividad

##### **Experimento I.1**

El número de rosas por planta y flujo cosechadas del cv. Red Corvette® en el tratamiento con oxifertirrigación, al considerar todos los flujos productivos de un ciclo anual, fue significativamente mayor (+ 9.4%) al de las plantas no oxifertirrigadas (Tabla 3.4). En el caso del cultivar Dallas® no se detectaron diferencias significativas entre los dos tratamientos para el índice de cosecha antes mencionado, aunque la media del tratamiento con oxifertirrigación fue ligeramente mayor (2,6%) a la del no oxifertirrigado (Tabla 3.4). Si se comparan los resultados de cada flujo floral por separado, en el cv Dallas se aprecian medias ligeramente mayores en el tratamiento con oxifertirrigación en comparación al tratamiento no oxifertirrigado, aunque la separación estadística de las medias no detecta diferencias significativas (Tabla 3.5) (Figura 3.11). Los resultados ponen de manifiesto un comportamiento varietal diferencial, en relación a la oxifertirrigación.

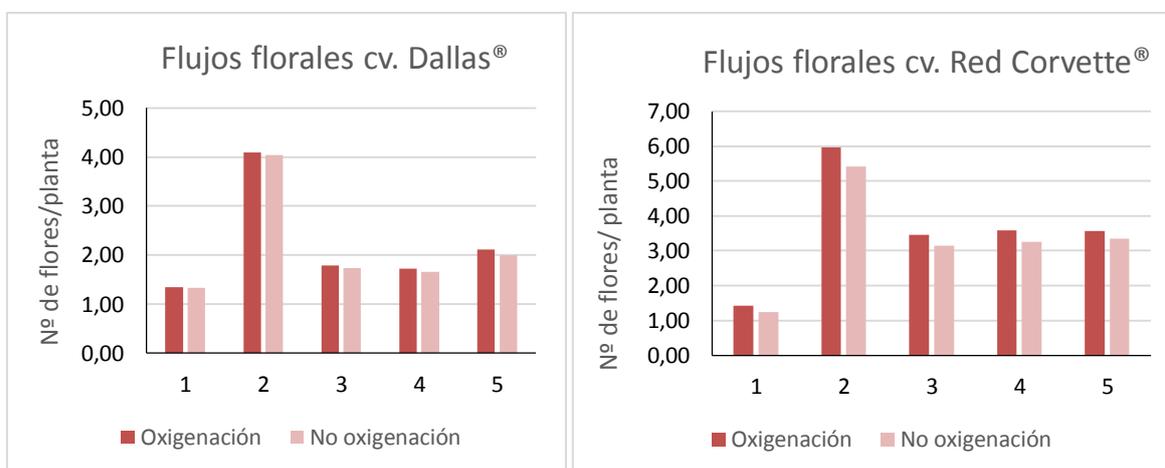
**Tabla 3.4. Número de rosas cortadas por planta y flujo productivo en un ciclo anual de la plantación (periodo anual abril - abril)**

|                   | <b>PRODUCCIÓN</b> (nº de flores por planta y flujo) |                       |
|-------------------|---|-----------------------|
|                   | Dallas®   | Red Corvette®         |
| O <sub>2</sub>    | 2.21 ( $\pm 0.22$ ) a                               | 3.60 ( $\pm 0.31$ ) a |
| No O <sub>2</sub> | 2.15 ( $\pm 0.18$ ) a                               | 3.26 ( $\pm 0.26$ ) b |

Separación de medias según el test de Tukey; error estándar de cada media entre paréntesis ( $\alpha = 0.05$ ; n=50)

**Tabla 3.5. Número acumulado de rosas cortadas por planta en cada uno de los flujos florales anuales de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en los tratamientos de oxigenación y no oxigenación de la solución nutritiva (periodo anual abril - abril)-**

| nº flores/planta |                   | <b>Flujo 1<br/>(abril)</b> | <b>Flujo 2<br/>(julio)</b> | <b>Flujo 3<br/>(oct)</b> | <b>Flujo 4<br/>(feb)</b> | <b>Flujo 5<br/>(abril)</b> |
|------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|
| Dallas®          | O <sub>2</sub>    | 1.35                       | 5.45                       | 7.24                     | 8.96                     | 11.08                      |
|                  | No O <sub>2</sub> | 1.33                       | 5.37                       | 7.11                     | 8.77                     | 10.76                      |
| Red Corvette®    | O <sub>2</sub>    | 1.43                       | 7.40                       | 10.85                    | 14.44                    | 18.00                      |
|                  | No O <sub>2</sub> | 1.25                       | 6.66                       | 9.80                     | 13.05                    | 16.40                      |



**Figura 3.11. Número de flores por planta en cada flujo floral anual de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en los tratamientos de oxigenación y no oxigenación de la solución nutritiva.**

Las diferencias detectadas en este experimento son del mismo signo que las referidas por Marfà y Guri (2001) en un cultivo comercial sin suelo de rosa para flor cortada del cultivar Lovely Red® aplicando o no oxifertirrigación. Los mencionados autores refieren un aumento del índice de cosecha del 19% cuando se emplea oxifertirrigación respecto a la producción obtenida sin oxifertirrigación. Estas diferencias son atribuibles a unas diferencias mayores de concentración de O<sub>2</sub> disuelto en la solución del medio radicular entre los tratamientos con o sin oxifertirrigación; en nuestro trabajo la solución no sobresaturada de O<sub>2</sub> presentaba una concentración de 7.05 ppm de O<sub>2</sub> disuelto y la sobresaturada de 15.15 ppm, en el estudio antes referido la concentración media de O<sub>2</sub> disuelto en la solución del sustrato en el tratamiento sin oxigenación suplementaria fue de 4.4 ppm -muy baja y cercana a las condiciones de hipoxia (Morgan, 2002)- frente a 13.8 ppm de O<sub>2</sub> disuelto en el tratamiento con oxigenación suplementaria.

En otros trabajos con otras especies cultivadas se ha mostrado que el uso continuado de soluciones nutritivas sobresaturadas en O<sub>2</sub> aumenta los rendimientos productivos. Así, en un

cultivo de pepino a escala comercial la oxifertirrigación dio lugar a un aumento del índice de cosecha de frutos de un 9.2% respecto al tratamiento no oxifertirrigado, siendo el número de frutos cosechados significativamente mayor con oxigenación suplementaria que sin ella (Marfà & Guri, 1999) y en un cultivo de melón el índice de cosecha fue significativamente mayor en el tratamiento de oxifertirrigación que en el no oxifertirrigado (Marfà y Guri, 2001). Sin embargo, algunos autores no detectan efectos significativos de la oxifertirrigación en otros cultivos, por ejemplo Vargas (2001) en un cultivo de sandía.

### 3.4.3. Calidad

#### **Experimento I.1**

La separación de medias referidas a los parámetros de calidad de la vara floral (peso fresco y longitud de la vara floral), muestran diferencias significativas entre los tratamientos con y sin oxifertirrigación en los controles realizados en los diferentes flujos florales que tuvieron lugar entre julio y abril del año siguiente (Tabla 3.6, Tabla 3.7). El peso fresco y la longitud de la vara floral en el cultivar Red Corvette® oxifertirrigado fueron un 5,6% y un 3,7% superiores respectivamente a los del cultivo no oxifertirrigado, mientras que en el cultivar Dallas® el peso fresco y la longitud de la vara floral fueron un 7.8 % y un 3.1% mayores en el tratamiento con oxifertirrigación que en el no oxifertirrigado. Se muestran (Fig. 3.12 y 3.13) los resultados relativos a los parámetros de calidad de la flor cortada correspondientes a cada flujo floral durante el período estudiado.

**Tabla 3.6. Peso fresco de flor cortada (g) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en el periodo julio-abril.**

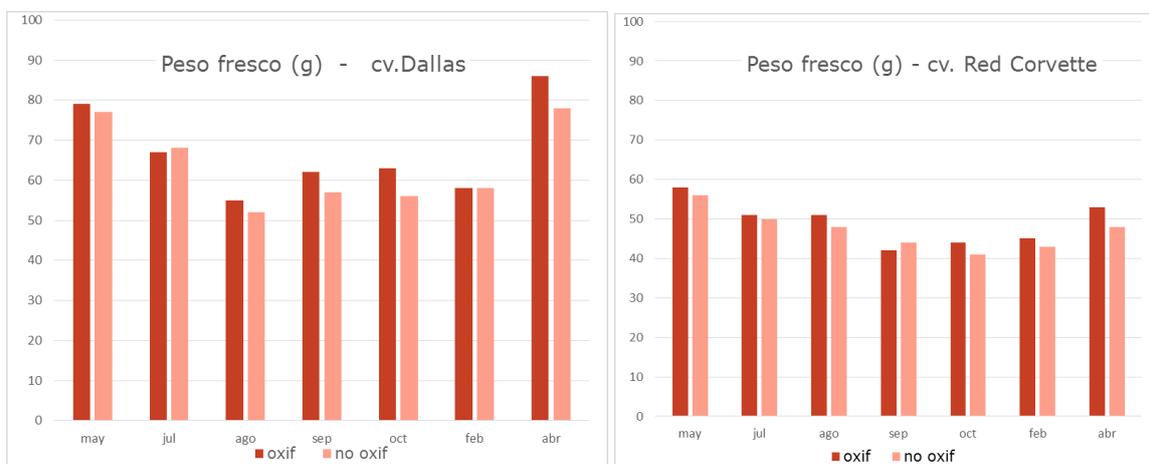
| PESO FRESCO (g)   |                 |                 |
|-------------------|-----------------|-----------------|
|                   | Dallas®         | Red Corvette®   |
| O <sub>2</sub>    | 68.39 (±1.04) a | 49.87 (±0.76) a |
| No O <sub>2</sub> | 63.03 (±1.00) b | 47.07 (±0.70) b |

Test de Tukey; error estándar de cada media entre paréntesis ( $\alpha = 0.05$ ; n=960)

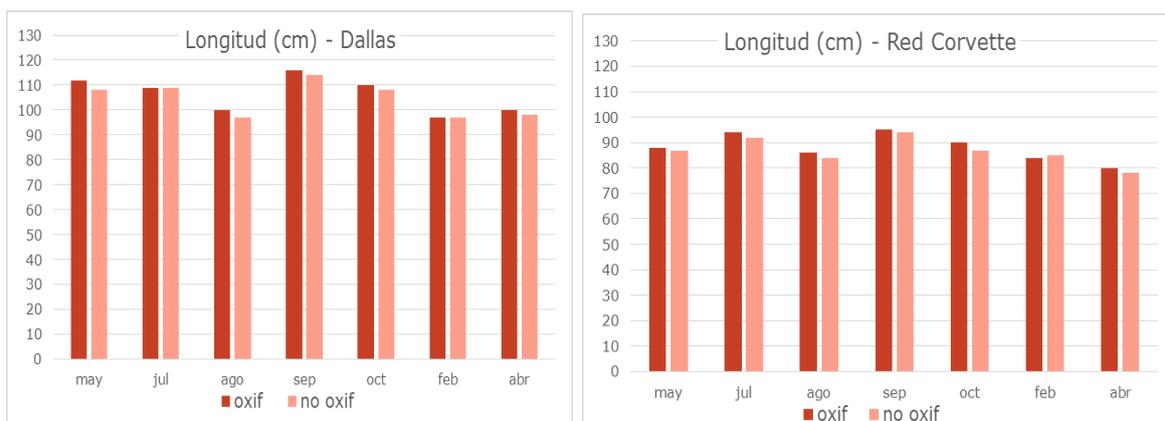
**Tabla 3.7. Longitud de vara floral (cm) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en el periodo julio-abril**

| LONGITUD (cm)     |                  |                 |
|-------------------|------------------|-----------------|
|                   | Dallas®          | Red Corvette®   |
| O <sub>2</sub>    | 106.89 (±0.69) a | 89.09 (±0.52) a |
| No O <sub>2</sub> | 103.53 (±0.68) b | 85.80 (±0.60) b |

Test de Tukey; error estándar de cada media entre paréntesis ( $\alpha = 0.05$ ; n=960)



**Figura 3.12. Peso fresco de flor cortada (g) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en cada flujo floral anual.**



**Figura 3.13. Longitud de vara floral de flor cortada (cm) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® en cada flujo floral anual.**

Los resultados obtenidos coinciden con los obtenidos en un cultivo de rosa para flor cortada, cv. Lovely Red®, en una explotación comercial en Vilassar de Mar (comarca del Maresme, Cataluña), en el que la oxifertirrigación mejoró la calidad de la flor al aumentar la longitud de la vara floral significativamente (Marfà y Guri, 2001).

La oxifertirrigación de cultivos sin suelo también mejora la calidad de la producción en otro tipo de cultivos y parámetros en otros estudios. Es el caso de un cultivo de pepino en el que se obtuvieron mayor número de frutos de categoría A y menos de las categorías inferiores o en un cultivo de pimiento (cv. Vidiâ®) en el que la oxifertirrigación dio lugar a un incremento del índice de cosecha en términos del peso de los frutos cosechados en comparación con el cultivo no

oxifertirrigado o el de un cultivo de lechuga con un mayor índice de cosecha en el tratamiento con oxifertirrigación que en el no oxifertirrigado (Marfà y Guri, 1999).

La bibliografía también refiere algún caso en el que el tratamiento con oxifertirrigación no dio lugar a mejoras. Por ejemplo en un cultivo sin suelo de melón en Almería en el que no se detectaron diferencias significativas en el peso total de frutos entre tratamientos con o sin oxifertirrigación (Marfà et al., 1999) y el peso medio de los frutos en un cultivo de sandía con o sin oxigenación suplementaria en el que tampoco se detectaron diferencias significativas (Vargas, 2001).

#### 3.4.4. Postcosecha

##### **Experimento I.2**

Se muestran los efectos en el comportamiento en vaso de las flores que provienen de plantas que han sido sometidas al tratamiento de oxifertirrigación o no. Las flores cortadas procedentes de plantas oxifertirrigadas mostraron para todos los parámetros relativos al comportamiento de la flor en vaso diferencias significativas en comparación a las flores procedentes de plantas no oxifertirrigadas. Así, en cuanto al peso relativo de agua (PRA, en %) la oxifertirrigación dio lugar a un aumento del 20% en el cv. Dallas® y un 23.6% en el cv Red Corvette, un peso relativo de agua en el séptimo día de la flor cortada (PRA7, en %) un 31,5% mayor en Dallas® y un 24.4% en Red Corvette®, un número de días de duración de la flor cortada (DIAS) un 11.4% mayor en Dallas® y un 12.9% en Red Corvette® y un estadio de apertura de la flor el día de la senescencia un 6.8% mayor en Dallas® y un 5.6% en Red Corvette® (Tabla 3.8).

**Tabla 3.8. Parámetros peso relativo de agua (PRA, %, peso relativo de agua en el séptimo día de la flor cortada (PRA7, %), días de duración (DIAS, número) y estadio de apertura (ESTADIO de flor cortada, 1-5) de los cultivares Dallas® y Red Corvette® con y sin tratamiento de oxifertirrigación en el periodo julio-abril.**

|               |                   | PRA            | PRA7            | DIAS            | ESTADIO        |
|---------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| Dallas®       | O <sub>2</sub>    | 0.70 (±0.03) a | 12.37 (±0.44) a | 13.66 (±0.19) a | 3.68 (±0.03) a |
|               | No O <sub>2</sub> | 0.56 (±0.03) b | 8.47 (±0.45) b  | 12.10 (±0.21) b | 3.43 (±0.03) b |
| Red Corvette® | O <sub>2</sub>    | 0.72 (±0.04) a | 12.86 (±0.62) a | 13.58 (±0.19) a | 3.93 (±0.03) a |
|               | No O <sub>2</sub> | 0.55 (±0.04) b | 9.72 (±0.63) b  | 12.30 (±0.20) b | 3.71 (±0.03) b |

Test de Tukey; error estándar de cada media entre paréntesis ( $\alpha = 0.05$ ; n=60)

El aumento de días de duración de la flor cortada puede atribuirse a la formación de tejidos más lignificados y resistentes por su mayor contenido en calcio (Torre et al., 2001) tal como se muestra posteriormente (ver apartado 3.4.5). También podrían deberse los resultados alcanzados a una mayor estabilidad y funcionalidad de los vasos conductores del tallo floral como consecuencia de la oxigenación (Marfà et al. 2014).

La bibliografía refiere factores que influyen en el comportamiento en postcosecha de flor cortada y concretamente de rosas (Zieslin, N., 1992; Clark; D.G. et al., 1993; Bolívar et al., 1999; Torre et al., 2001; Pettersen et al., 2007), pero no estudios específicos sobre los efectos de la oxifertirrigación en postcosecha de rosa.

### **3.4.5. Contenido de nutrientes en fracciones de flor cortada**

#### ***Experimento I.3***

Los resultados del contenido de nutrientes en fracciones de flor cortada no muestran diferencias significativas dependiendo del tratamiento con o sin oxigenación suplementaria excepto para el calcio y el potasio.

La oxifertirrigación promovió un mayor contenido de calcio en general en las diferentes partes del tallo floral en el momento de la cosecha (Figura 3.14). El tratamiento de oxifertirrigación favoreció un mayor contenido de calcio al inicio de la vida en vaso de la flor cortada, tanto en tallo superior, como en los pétalos y en los sépalos. Esto sugiere una mayor traslocación del calcio desde las hojas hasta la parte superior de la vara floral y este mayor contenido de calcio se mantuvo en tallo (superior y también inferior) hasta el final de la vida en vaso (Tablas 3.9 y 3.10; Figura 3.14). Las aportaciones nocturnas de oxígeno también favorecieron un mayor contenido en calcio en sépalos y tallo superior en el momento de cosecha, mientras que en el momento final de la vida en vaso el mayor contenido en calcio se daba en casi todas las partes analizadas. Asimismo hay alguna diferencia significativa en el contenido de potasio en el inicio, aunque son cuantitativamente de menor cuantía: sépalos y hojas contienen más potasio en las flores de plantas a las que se aplicó oxígeno durante la noche mientras que al final de la vida de la flor en vaso los contenidos de potasio se han movilizado mejor en las flores con oxifertirrigación o con oxigenación nocturna, disminuyendo en tallos y sépalos (Tablas 3.9 y 3.10 y Figura 3.15).

Tanto la oxifertirrigación diurna como la aportación nocturna de oxígeno han dado lugar a mayores contenidos de calcio en las fracciones de la parte aérea de la planta en las que se analizó al inicio de la cosecha de la flor, lo cual puede haber contribuido a aumentar la duración de la flor cortada en vaso.

**Tabla 3.9. Contenido en calcio y potasio (% sobre materia seca) en fracciones de flor cortada de rosa (cv. Lovely Red), al inicio y final del período de postcosecha. Cultivo con/sin aplicación de oxifertirrigación (OxF).**

|                  | oxF | Ca     |   | Ca    |   | K      |   | K     |   |
|------------------|-----|--------|---|-------|---|--------|---|-------|---|
|                  |     | inicio |   | final |   | inicio |   | final |   |
| <b>sépalos</b>   | si  | 0,633  | a | 0,643 | a | 2.763  | a | 3.034 | b |
|                  | no  | 0,536  | b | 0,686 | a | 2.933  | a | 3.158 | a |
| <b>pétalos</b>   | si  | 0,200  | a | 0,180 | a | 1.857  | a | 2.678 | a |
|                  | no  | 0,119  | b | 0,139 | a | 2.091  | a | 2.562 | a |
| <b>tallo sup</b> | si  | 0,569  | a | 0,566 | a | 1.851  | a | 1.868 | a |
|                  | no  | 0,264  | b | 0,318 | b | 1.623  | a | 1.747 | a |
| <b>tallo inf</b> | si  | 0,249  | a | 0,479 | a | 0.928  | a | 0.466 | b |
|                  | no  | 0,286  | a | 0,277 | b | 0.930  | a | 0.698 | a |
| <b>hojas</b>     | si  | 0,953  | b | 1,223 | b | 2.092  | a | 2.327 | a |
|                  | no  | 1,031  | a | 1,539 | a | 2.213  | a | 2.092 | a |

\*Separación de medias según el test de Tuckey (P=0.05)

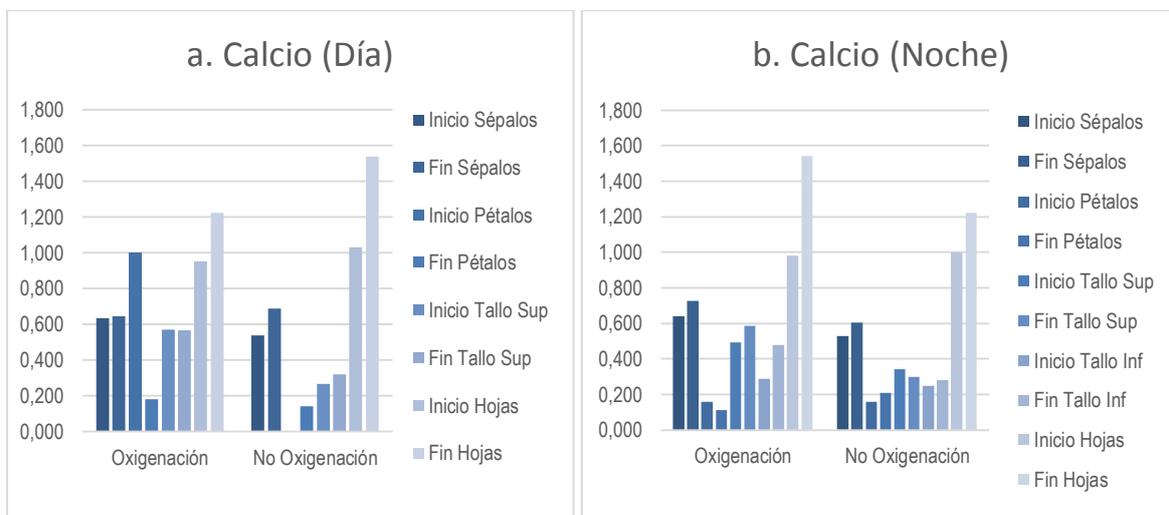
**Tabla 3.10. Contenido en calcio y potasio (% sobre materia seca) en fracciones de flor cortada de rosa (cv. Lovely Red), al inicio y final del período de postcosecha. Cultivo con/sin aplicación de oxígeno nocturno (OxN).**

|                  | oxN | Ca     |   | Ca    |   | K      |   | K     |   |
|------------------|-----|--------|---|-------|---|--------|---|-------|---|
|                  |     | inicio |   | final |   | inicio |   | final |   |
| <b>sépalos</b>   | si  | 0.640  | a | 0.725 | a | 3.073  | a | 2.802 | b |
|                  | no  | 0.529  | b | 0.604 | b | 2.623  | b | 3.390 | a |
| <b>pétalos</b>   | si  | 0.160  | a | 0.111 | a | 2.093  | a | 2.561 | a |
|                  | no  | 0.160  | a | 0.208 | a | 1.856  | a | 2.679 | a |
| <b>tallo sup</b> | si  | 0.493  | a | 0.587 | a | 1.631  | a | 1.745 | b |
|                  | no  | 0.340  | b | 0.297 | b | 1.843  | a | 1.770 | a |
| <b>tallo inf</b> | si  | 0.288  | a | 0.478 | a | 0.930  | a | 0.466 | b |
|                  | no  | 0.247  | a | 0.279 | b | 0.928  | a | 0.698 | a |
| <b>hojas</b>     | si  | 0.983  | a | 1.541 | a | 2.328  | a | 2.092 | a |
|                  | no  | 1.001  | a | 1.222 | b | 1.977  | b | 2.327 | a |

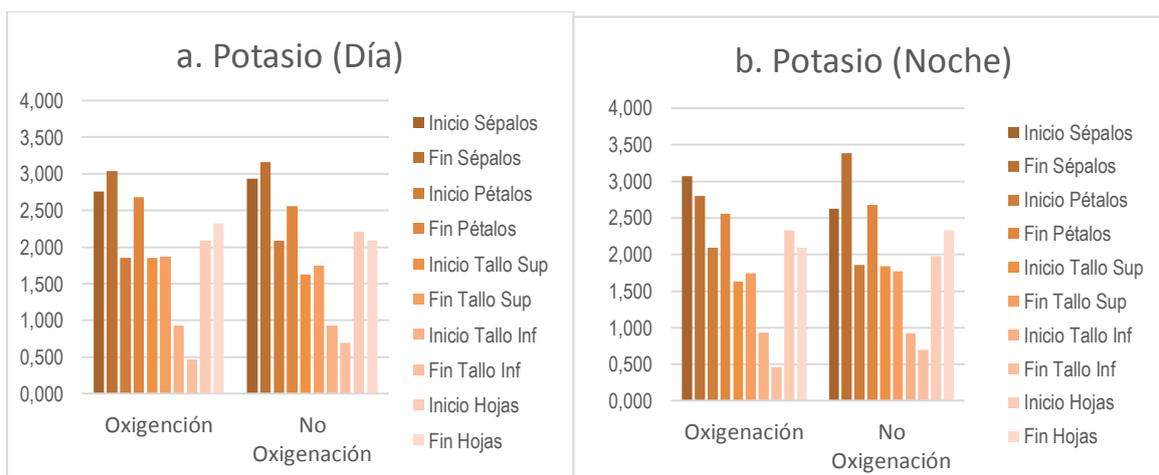
\*Separación de medias según el test de Tuckey (P=0.05)

Aunque con otros cultivares, Bolívar et al., (1999) citan que un pretratamiento con quelatos de calcio poco antes de la cosecha promueve la disminución de los procesos de senescencia de la flor cortada influyendo especialmente en la pérdida de materia seca en la zona del pedúnculo

floral, siendo esto crucial para evitar la formación del "bent neck" o cuello de pato de la fracción superior del tallo floral. Es sabido que un contenido bajo de calcio en las hojas acelera la senescencia y aumenta la degradación de la clorofila (Poovaiah y Leopold, 1973) resultando un tejido necrótico, de la misma manera que en los pétalos pueden aparecer manchas necróticas. Esto no sucede en el caso estudiado ya que, independientemente de la forma de aplicación del oxígeno, la concentración de calcio detectada se sitúa en valores considerados normales (Requena, 1990). Asimismo, otros autores relacionan un mayor contenido de calcio en los órganos florales de rosa con una menor susceptibilidad a Botrytis. (Bar-Tal, 2001).



**Figura 3.14. Contenido en calcio (% sobre materia seca) en fracciones de rosa para flor cortada en los tratamientos con y sin oxigenación diurna (a) y nocturna (b) en inicio y final de su periodo de postcosecha.**



**Figura 3.15. Contenido en potasio (% sobre materia seca) en fracciones rosa para flor cortada en los tratamientos con y sin oxigenación diurna (a) y nocturna (b) en inicio y final de su periodo de postcosecha.**

### 3.4.6. Conductividad hidráulica radicular

#### **Experimento I.4**

Los resultados obtenidos de  $L_r$  y  $L_{re}$  en las rosas cultivadas mostraron una gran variabilidad (Tabla 3.11), posiblemente debido a la influencia del estado de la planta en el momento de plantación y la dificultad de conseguir una homogeneidad alta en las raíces medidas, aunque dentro del orden de valores de  $L_r$  obtenidos en otras plantas leñosas (Steudle y Peterson, 1998; Basile et al., 2003) o incluso de arroz (Miyamoto, 2001).

Esta dispersión de valores hace difícil detectar cómo afectan los tratamientos relativos a la oxigenación a la  $L_r$ , pero sí que se puede apreciar que los valores de  $L_r$  fueron significativamente mayores en las plantas cultivadas en perlita B6 que en las cultivadas en perlita A13, como ocurre en otros estudios en los que valores mayores de  $L_r$  van asociados a sustratos con partícula más fina; la distribución de los tamaños de las partículas del sustrato puede haber afectado a la capilaridad, la frecuencia y el tamaño de los poros en el seno del sustrato y por consiguiente, la extensión, la conductividad hidráulica del sustrato y el contacto entre raíces y solución del medio radicular (Motisi y Gullo, 2002).

El aumento de  $L_r$  y  $L_{re}$  en los tratamientos con oxifertirrigación (32% y 41% respectivamente, con un nivel de significación del 7% al 9%) indica que la mayor disponibilidad de oxígeno afecta al comportamiento del sistema radicular, hecho que, en ciertas condiciones como una alta ocupación radicular del contenedor o condiciones de cultivo de clima mediterráneo implicaría una mayor captación de agua y nutrientes. Estos resultados concuerdan con la mejor producción obtenida en otros estudios (Gislerød et al., 1997; Vargas, 2001; Guri, 2002; Marfà et al., 2005). Algunos autores relacionan estos mejores resultados con la mayor absorción de agua y nutrientes, especialmente calcio (Morgan, 2002) como resultado de una mejor oxigenación del medio radicular. Además, el contenido de calcio puede estar relacionado con la regulación del flujo de agua a través de la raíz y este efecto en la raíz podría explicarse por el papel en el flujo hídrico de la conductividad hidráulica radicular (Quintero et al., 1999).

Por tanto, los tratamientos de oxifertirrigación pueden ser muy útiles e incluso necesarios en general y en algunas situaciones específicas en las que existe riesgo de hipoxia (sustratos muy finos o degradados por el desarrollo del cultivo o la reutilización en cultivos sucesivos, altas ocupaciones radiculares, agua con concentraciones bajas de oxígeno, temperaturas altas y/o salinidad en el medio radicular, etc). También en los que el desarrollo y la producción podrían ser mayores si los parámetros anatómicos se mejoraran (Huang and Eissenstat, 1999) o donde parámetros fisiológicos como la  $L_r$  tuvieran el efecto previsto en el metabolismo de la planta (Motisi and Gullo, 2002; Marfà et al., 2005).

**Tabla 3.11. Conductividad hidráulica radicular (Lr) ( $\text{cm}^2\cdot\text{MPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y conductividad hidráulica radicular específica (Lre) ( $\text{cm}^2\cdot\text{MPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ) en cultivo de rosa en perlita A13 o perlita B6, con o sin oxigenación complementaria.**

|                           | <b>Lr <math>10^{-6}</math></b>                      | <b>Lre <math>10^{-5}</math></b>                                       |
|---------------------------|---|---|
| <b>Factor Oxigenación</b> | $\text{cm}^2\cdot\text{Mpa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ | $\text{cm}^2\cdot\text{Mpa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ |
| <b>O2</b>                 | 8,43260 a   | 3,88438 a   |
| <b>No O2</b>              | 5,72549 a   | 3,04937 a   |
| <b>Factor Substrato</b>   |   |   |
| <b>A13</b>                | 5,00278 b   | 2,54258 a   |
| <b>B6</b>                 | 10,7117 a   | 5,28451 a   |
| <b>Tratamientos</b>       | <b>Lr <math>10^{-6}</math></b>                      | <b>Lre <math>10^{-5}</math></b>                                       |
| <b>O2 + A13</b>           | 4,76141 a   | 2,10337 a   |
| <b>No O2 + A13</b>        | 5,26992 a   | 3,06605 a   |
| <b>O2 + B6</b>            | 13,68283 a  | 7,23446 a   |
| <b>No O2 + B6</b>         | 6,26728 a   | 2,97098 a   |

\*Separación de medias según el test de Tuckey (P=0.05)

### 3.4.7. Contenido mineral: Contenido foliar de nutrientes

#### **Experimento I.5**

El contenido foliar de nutrientes en los tratamientos con oxifertirrigación mostró diferencias significativas en potasio y calcio (Tabla 3.12), con valores mayores en las plantas tratadas con oxifertirrigación diurna. No aparecieron diferencias en el contenido foliar para el resto de elementos estudiados. Tampoco se mostraron diferentes los contenidos minerales en plantas con o sin oxigenación nocturna. El contenido foliar de calcio aumentó en todos los tratamientos de oxifertirrigación diurna, para cualquiera de los tratamientos nocturnos. Aunque el tratamiento de oxigenación suplementaria nocturna no da lugar a diferencias significativas en el caso que nos ocupa, hay estudios en cultivo de rosa que muestran una mejor captación de Ca con mayor irrigación nocturna, aún sin oxigenación complementaria (Bar-Tal et al., 2001).

Los resultados alcanzados confirman la existencia de una mayor absorción de calcio en sistemas radiculares mejor aireados como refieren otros autores (Morgan, 2002, Tachibana, 1988, Tanaka, 2001). El calcio se absorbe principalmente por las partes más jóvenes de las raíces y éstas necesitan una mayor oxigenación para mantener su actividad y desarrollo. Así, un aporte de solución sobresaturada en oxígeno conduciría a una alta captación de calcio y también a otros efectos asociados, como un posible aumento de la conductividad hidráulica y la conductividad hidráulica específica radicular (Carazo et al., 2008). Esto llevaría a una mayor absorción de potasio y un mayor contenido de potasio en savia debido a su alta solubilidad, baja

afinidad a las cadenas orgánicas y fácil intercambio de ellas trasladándose a la planta y teniendo la difusión como el principal mecanismo de movimiento hacia las raíces (Marschner, 2011).

**Tabla 3.12. Efecto de diferentes tratamientos en el contenido foliar de nutrientes en un cultivo de rosa para flor cortada (%N %P %K %Ca %Mg ppm Fe).**

|                      | %N     | %P     | %K     | %Ca    | %Mg    | ppm Fe   |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Noviembre            | 3.58 a | 1.56 b | 2.97 b | 0.86 b | 0.26 a | 238.03 a |
| Febrero              | 3.28 b | 2.46 a | 3.08 a | 1.02 a | 0.13 b | 123.6 b  |
| Oxifertirrigación SI | 3.42 a | 2.05 a | 3.09 a | 0.97 a | 0.20 a | 179.36 a |
| Oxifertirrigación NO | 3.44 a | 1.98 a | 2.96 b | 0.91 b | 0.20 a | 180.26 a |
| Oxigenación noct SI  | 3.41 a | 2.13 a | 3.03 a | 0.93 a | 0.19 a | 181.88 a |
| Oxigenación noct NO  | 3.45 a | 2.03 a | 3.01 a | 0.95 a | 0.20 a | 177.74 a |

\*Separación de medias según el test de Tuckey (P=0.05)

También se observaron diferencias en contenidos minerales entre los dos flujos productivos, (Tabla 3.9). El contenido foliar de fósforo, potasio y calcio fue mayor en el segundo flujo productivo, pero las diferencias en las condiciones ambientales fueron tan importantes como las de fase de desarrollo, enmascarando las causas de los diferentes contenidos.

### 3.5. Conclusiones

Las conclusiones que resultan de los resultados alcanzados en las condiciones de los experimentos realizados son:

- La oxifertirrigación de cultivos sin suelo con recirculación de rosa aumenta significativamente la producción del rosal en una de los cultivares utilizados (cv. Red Corvette®).
- La oxifertirrigación de cultivos de rosa para flor cortada (cv. Dallas® y cv. Red Corvette®) mejora la calidad de la flor cortada, aumentando significativamente el peso fresco de la flor y la longitud de la vara floral.
- La oxifertirrigación de cultivos de rosa para flor cortada (cv. Dallas® y cv. Red Corvette®) mejora significativamente la duración en vaso de las flores una vez cortadas, así como su estadio de apertura el día de senescencia de la flor.
- La aplicación de oxifertirrigación favorece en términos generales un mayor contenido de calcio en la vara floral en el momento de la cosecha, más concretamente en pétalos, sépalos y parte superior del tallo.
- La aplicación nocturna de oxígeno da lugar al aumento de la captación del calcio y a un incremento de dicho elemento en la fracción superior del tallo y los sépalos de la vara floral.
- La oxifertirrigación favorece un mayor contenido foliar de calcio y potasio (porcentaje sobre materia seca).



**4. Oxifertirrigación en esqueje y plántula enraizada de rosa. Efectos en el desarrollo y la respiración radicular**



## **4. Oxifertirrigación en esqueje y plántula enraizada de rosa. Efectos en el desarrollo y la respiración radicular.**

### **4.1. Introducción**

En rosal, la información acerca de los efectos de la hiperoxigenación de la rizosfera en el desarrollo de las raíces durante el período de enraizamiento de esquejes y de los efectos de la misma en la raíz y en la parte aérea durante el crecimiento de plantas recién enraizadas es limitada. Algunos autores han mostrado los efectos favorables de una aireación adecuada en el enraizamiento y el crecimiento de esquejes de rosal (Gislerød, 1983; Gislerød et al., 1997), aunque no se incluya en las especies más exigentes en cuanto a la aireación radicular (Gislerød, 1983), también se han documentado los efectos perjudiciales de la deficiencia de oxígeno en la propagación vegetativa de dicha especie (Baas et al., 1997).

El oxígeno disuelto en el agua es esencial para la supervivencia de los ápices radiculares activos (Armstrong y Drew, 2002) y para la formación y el desarrollo de las raíces, que serán proporcionales a la disponibilidad del mismo (Soffer y Burger, 1988); este oxígeno disuelto no puede en modo alguno asociarse a los efectos negativos que se dan por un exceso de espacio poroso lleno de aire, por tanto con abundante oxígeno no disuelto en la solución del medio de cultivo, condiciones que pueden dar lugar a estrés hídrico por falta de agua disponible para las raíces (Aminah, 1995).

La revisión de la información bibliográfica comentada sugirió que la hiperoxigenación, mediante la técnica de la oxifertirrigación del medio de cultivo (Marfà et al, 2005), puede incrementar el rendimiento del enraizamiento de esquejes de rosal así como su desarrollo posterior, de forma similar al mejor desarrollo de la parte aérea obtenido en experimentos previos (Guri y Marfà, 2002; Marfà et al., 2005).

## **4.2. Objetivos y experimentos**

El objetivo general de los experimentos que se plantean en este apartado es estudiar y avanzar en el conocimiento de los efectos de la hiperoxigenación del medio radicular en los primeros estadios de crecimiento de plantas de rosal. Para ello se llevaron a cabo tres experimentos con los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar los efectos de la hiperoxigenación radicular en el enraizamiento de esquejes de rosal,
- Estudiar los efectos de la oxifertirrigación en el crecimiento y en la composición mineral de las raíces de plantas jóvenes de rosal,
- Estudiar los efectos de la oxifertirrigación en la conductividad hidráulica y la respiración de raíces escindidas de plantas jóvenes de rosal y por último,
- Estudiar los efectos de la oxifertirrigación en la respiración radicular de plantas jóvenes de rosal, medida en planta entera y en continuo.

### 4.3. Material y métodos

#### 4.3.1. Material vegetal, instalaciones y condiciones de cultivo

**Material vegetal.** En los tres experimentos se utilizaron esquejes homogéneos de rosal de 1 cm de diámetro y 20 cm de longitud obtenidos de plantas adultas de rosal (*Rosa hybrida* L.) cv. Lovely Red®. En el primer experimento los esquejes se enraizaron directamente en una cámara de crecimiento de condiciones controladas, donde se llevaron a cabo el resto de experimentos, cuyas características se describen a continuación. En el segundo y tercer experimento los esquejes utilizados como material vegetal se enraizaron -previamente a su paso a la cámara de condiciones controladas- en un invernadero equipado con cama caliente y 'fog-system', utilizando perlita como medio de enraizamiento.

**Cámara de crecimiento.** La cámara de crecimiento en condiciones controladas utilizada para los ensayos (Marca Koxca, modelo IM/365/IA) de 3,10m longitud, 2,72 m ancho y 2.25 m alto, disponía de control de temperatura mediante aire acondicionado y control de humedad. La cámara también disponía de iluminación artificial, suministrada por lámparas fluorescentes e incandescentes (16 lámparas fluorescentes marca Sylvania, modelo F72T12/CW/VHO, de 160 W y 16 lámparas incandescentes de 60 W, Osram Clear bulbs), encendida desde las 9h a.m. hasta las 9h p.m.

La iluminación medida en la cámara dio una media de densidad del flujo fotónico fotosintético de  $247 (\pm 5) \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; el fotoperiodo aplicado fue de 12h, las temperaturas que se mantuvieron fueron 20°C de día y 16°C de noche ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ) y la humedad relativa fue del 90% ( $\pm 5\%$ ) de día y del 95% ( $\pm 5\%$ ) de noche en el primer ensayo y del 70% ( $\pm 5\%$ ) de día y 85% ( $\pm 5\%$ ) de noche en el segundo y tercer ensayos.

**Condiciones de cultivo.** Las plantas se cultivaron durante 8 semanas en la cámara de crecimiento en contenedores cilíndricos de 6 cm de diámetro y 20 cm de altura (Figura 4.1). Estos contenedores se rellenaron con sustrato inerte de dos tipos granulométricos: perlita expandida de granulometría de grano fino B6 (PF; diámetro de partícula entre 0 y 1,5 mm) y perlita de grano grueso A13 (PG; diámetro de partícula de 3 a 5 mm) de características físicas e hidrofísicas referidas en la bibliografía (Tabla 4.1) (Orozco y Marfà, 1995).

**Tabla 4.1. Propiedades físicas de los sustratos B6® y A13®; Dr: densidad real, Da: densidad aparente, EPT: espacio poroso total, CA: capacidad de aireación, AFD: agua fácilmente disponible, AR: agua de reserva y ADD: agua difícilmente disponible (Orozco & Marfà, 1995).**

| Sustrato    | Dr<br>g.cm <sup>-3</sup> | Da<br>g.cm <sup>-3</sup> | EPT<br>% | CA<br>% | AFD<br>% | AR<br>% | ADD<br>% |
|-------------|--------------------------|--------------------------|----------|---------|----------|---------|----------|
| <b>B6®</b>  | 2,37                     | 0,062                    | 97,4     | 24,38   | 36,62    | 8,42    | 27,76    |
| <b>A13®</b> | 2,60                     | 0,127                    | 87,0     | 58,1    | 6,9      | 2,7     | 19,3     |

Las plantas se fertirrigaron con solución nutritiva cuatro veces al día; se utilizó un gotero por planta, de 2L.h<sup>-1</sup>. La composición de la solución nutritiva fue de 8.89 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> mmol.L<sup>-1</sup>, 1.43 H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup> mmol.L<sup>-1</sup>, 2.12 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> mmol.L<sup>-1</sup>, 5.67 K<sup>+</sup> mmol.L<sup>-1</sup>, 2.75 Ca<sup>2+</sup> mmol.L<sup>-1</sup>, 1.10 Mg<sup>2+</sup> mmol.L<sup>-1</sup> y 0.90 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> mmol.L<sup>-1</sup> y el pH se ajustó a 5,6 con la adición de ácido nítrico; la conductividad eléctrica de la solución nutritiva fue 1.80 dS.m<sup>-1</sup>.



**Figura 4.1. Cámara de crecimiento y detalle de plantas jóvenes de rosal**

#### 4.3.2. Técnica de oxifertirrigación

La sobresaturación de oxígeno de la solución nutritiva utilizada se consiguió mediante la metodología empleada en la técnica de oxifertirrigación descrita por Marfà et al. (2005). Dicha técnica comprende un equipo de inyección de oxígeno a presión compuesto por una porcelana porosa situada en el interior de una cámara intercalada en la conducción primaria de riego, tal como se explica en el Apartado 3.3.1. Mediante una válvula de aguja se regula la inyección de

oxígeno disuelto para alcanzar y mantener una concentración sobresaturante media de 16.5 ppm de O<sub>2</sub> disuelto en el agua de riego (Figura 3.8). Las plantas con tratamiento de oxifertirrigación estuvieron sometidas al mismo durante todo el período experimental y en este caso la solución nutritiva contenía la concentración de oxígeno antes mencionada en todos los riegos.

La concentración de oxígeno disuelto se midió mediante un oxímetro equipado con un electrodo selectivo de oxígeno (Schott Gerate, mod. 9009/2) y una consola para lecturas digitales (Desin Instruments, mod. Consort Z621). El intervalo de lectura del equipo es de 0-60 ( $\pm 0.1$ ) ppm O<sub>2</sub>.

#### **4.3.3. Parámetros biométricos**

La descripción de todos los experimentos en cultivo de esqueje y plántula enraizada de rosa está detallada en la Tabla 2.2.

##### ***Experimento II.1***

Después de 8 semanas de cultivo con o sin oxifertirrigación, se secaron los esquejes (fraccionados en raíces, brotes y hojas) en estufa ventilada durante 48 h a 60°C, hasta alcanzar peso constante para, a continuación, determinar su peso seco. También se determinó el área radicular y la longitud radicular con un equipo de análisis de imagen DIAS, modelo Delta-T Devies® (Cambridge, UK).

#### **4.3.4. Parámetros biométricos y contenido mineral**

##### ***Experimento II.2***

Después de las 8 semanas de cultivo de los esquejes enraizados en la cámara de condiciones controladas se determinó la biomasa de hojas y tallos (peso fresco) de 5 esquejes por tratamiento con una balanza de precisión y el área foliar con un equipo de análisis de imagen DIAS, modelo Delta-T Devies® (Cambridge, UK). También se determinó la transpiración de planta entera mediante pesadas sucesivas del conjunto planta-contenedor, cada hora durante el periodo luminoso de un día. El contenedor se había tapado previamente para evitar la evaporación del sustrato.

Se desecaron las raíces de 3 esquejes por tratamiento en estufa ventilada durante 48 h a 60°C, hasta alcanzar peso constante para, a continuación, determinar el contenido mineral radicular en P, K, Ca, y Mg mediante el método colorimétrico de Bray-Kurtz seguido de espectrofotometría ( $\lambda=660\text{nm}$ ) en el caso del fósforo, fotometría de llama en el del potasio y análisis de espectroscopia atómica en el caso del calcio y del magnesio.

Se determinó la biomasa de brotes y tallos (peso seco) de 5 plantas jóvenes de rosal por tratamiento con una balanza de precisión; el contenido de nitrógeno y carbono de las hojas y las raíces de las plantas estudiadas -y previamente desecadas- se determinó después de moler las muestras y someterlas a combustión a 1000°C, mediante cromatografía de gases con detector de conductividad térmica que permite la medida del contenido de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> y la posterior valoración del contenido de N y C de la muestra.

#### **4.3.5. Conductividad hidráulica radicular**

##### ***Experimento II.2***

Se evaluó la conductividad hidráulica radicular ( $L_r$ ) y la conductividad hidráulica específica ( $L_{re}$ ) de 7 plantas jóvenes de rosal por tratamiento, mediante una cámara de presión tipo Schölander (Soilmoisture, Riverside, CA, USA), siguiendo la metodología de Ramos y Kaufmann (1979) y Chen y Barber (1990), con obtención de muestras de raíces jóvenes separadas del sistema radicular y pesadas poco antes de la medida en la cámara de presión (ver apartado 3.3.3, experimento I.4).

#### **4.3.6. Respirometría de raíces escindidas**

##### ***Experimento II.2***

Las medidas se realizaron en los laboratorios de los campos experimentales de la Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona. Se midió el índice de respiración de fragmentos radiculares con un electrodo de oxígeno en fase líquida de Clark. Para ello se cortaron fragmentos homogéneos de raíz de unos 10-12 mg de peso seco de la mitad terminal (no apical) de la raíz de las plantas de rosa estudiadas, durante el periodo luminoso, y se colocaron a continuación en el interior de la cubeta de fase líquida con la solución de medida a temperatura estable (tampón TES 10mM, pH 6,8, CaCl<sub>2</sub> 0,2 mM) (20 Diciembre- 25 Enero) (Figura 4.2). Se tapó con papel de aluminio la cámara para que el consumo de oxígeno reflejado por el trazo recto de pendiente descendiente representara la tasa de respiración del tejido vegetal (Lambers y Azcón-Bieto, 1983; Azcón-Bieto, 2005).



Figura 4.2. Medidas de respiración (Facultad de Biología de la Universidad de Barcelona)

#### 4.3.7. Respirometría de planta entera de rosal

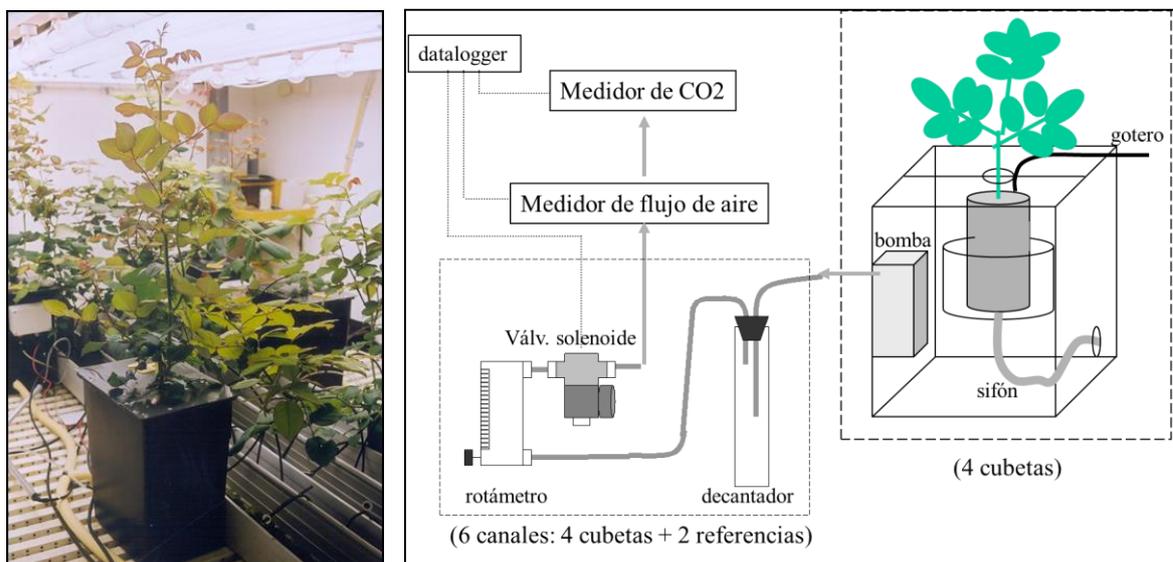
##### **Experimento II.3**

Se monitorizó la dinámica de la producción de CO<sub>2</sub> por el conjunto raíz-sustrato mediante un conjunto de 4 cámaras –cada una de ellas con una planta - conectadas a un analizador de CO<sub>2</sub> y un medidor de flujo en un circuito abierto (Casadesús et al., 2007). Las plantas se cultivaron en contenedores cilíndricos rellenos de perlita fina (PF) como sustrato de cultivo; cada cámara respirométrica contuvo el contenedor con el medio de cultivo y el sistema radicular de una única planta y se dejó fuera la parte aérea de la planta correspondiente. Cada cámara consistía en una caja de polietileno opaco de 10 L con un ventilador que removía el aire de alrededor del medio de cultivo y una bomba que mantenía el aire con un flujo constante alrededor de 0.013 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. La entrada de la cámara era un tubo hueco de 4 mm de diámetro interno y 20 cm de longitud que comunicaba la cámara con el aire del ambiente y una unidad de análisis recibía del exterior de cada cámara una muestra del aire ambiente (Figura 4.3). Un sistema de válvulas solenoides

conectaba secuencialmente cada una de estas muestras de aire a un analizador de gases por infrarrojo, ADC WA 470 (ADC Ltd, Hoddesdon, England) y un sensor de masa de flujo de aire de micropuente AWM3300V (Honeywell Inc., Freeport, IL, USA). La frecuencia de medida en cada cámara fue de 10 minutos. El índice de respiración por planta se calculaba:

$$\text{Resp.} = (\text{Cout} - \text{Cin}) \cdot F \cdot 10^{-6} \text{ (}\mu\text{moles CO}_2 \text{ s}^{-1}\text{)}, \text{ donde,}$$

Cout y Cin eran las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la entrada y la salida de la cámara respectivamente (ppm) y F era la masa de flujo a través de la cámara en moles de aire por segundo. Las plantas se sustituyeron cada semana, muestreándose a continuación para determinar la biomasa.



**Figura 4.3. (a) Planta entera de rosal monitorizada para la caracterización de los efectos de la oxifertirrigación en planta joven de rosal; (b) esquema de la cámara de respirometría de planta entera.**

Los datos analizados corresponden a registros de la evolución diaria de la producción de CO<sub>2</sub> como los mostrados en la Figura 4.6 en la que se observa el curso temporal de la temperatura del sustrato que permite identificar los momentos de inicio de cada riego. En las plantas oxifertirrigadas el riego tenía lugar 30 minutos antes que las plantas no oxifertirrigadas.

## 4.4. Resultados y discusión

### 4.4.1. Parámetros biométricos

#### **Experimento II.1**

Los tratamientos de oxifertirrigación se mostraron claramente eficaces en relación a la formación de raíces en esqueje de rosal (Tabla 4.2). Tanto la longitud radicular como el área radicular fueron significativamente mayores en las plantas de los tratamientos con oxifertirrigación. Aunque el peso seco radicular fue mayor en las plantas con oxifertirrigación, también la relación área/peso seco de las raíces de estas plantas fue significativamente mayor que en las no tratadas, lo que indica un mayor desarrollo en ambos parámetros pero aún más marcado en cuanto al área específica de dichas raíces; por ello las raíces de plantas oxifertirrigadas tendrán un mayor superficie de contacto con la matriz porosa y la solución del sustrato de la rizosfera y por tanto mayor potencial de captación de nutrientes, tal como se documenta para otras especies (Drew, 1988). Además de las diferencias en los valores cuantitativos, se apreció una mejor calidad de raíces (Figura 4.5), más blancas, menos necrosadas y potencialmente más activas en las plantas oxifertirrigadas, tal como documenta Armstrong (2002) que se da en raíces con mayor disponibilidad de oxígeno, con ápices más activos y más tolerantes a posibles fitotoxinas.

**Tabla 4.2. Efecto de la oxifertirrigación en el desarrollo radicular de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de crecimiento, bajo tratamiento continuo de oxifertirrigación o no (oxifert., no oxifert.)(n=12).**

|             | Peso seco<br>(g) | Longitud radicular<br>(cm) | Área radicular<br>(cm <sup>2</sup> ) | Área/peso seco<br>(cm <sup>2</sup> . g <sup>-1</sup> ) |
|-------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| Oxifert.    | 0,1751 a         | 488,95 a                   | 54,64 a                              | 300,9 a  |
| No oxifert. | 0,1321 b         | 411,04 b                   | 35,53 b                              | 283,9 b  |

\*Separación de medias según el test de Tukey (P<0.05)

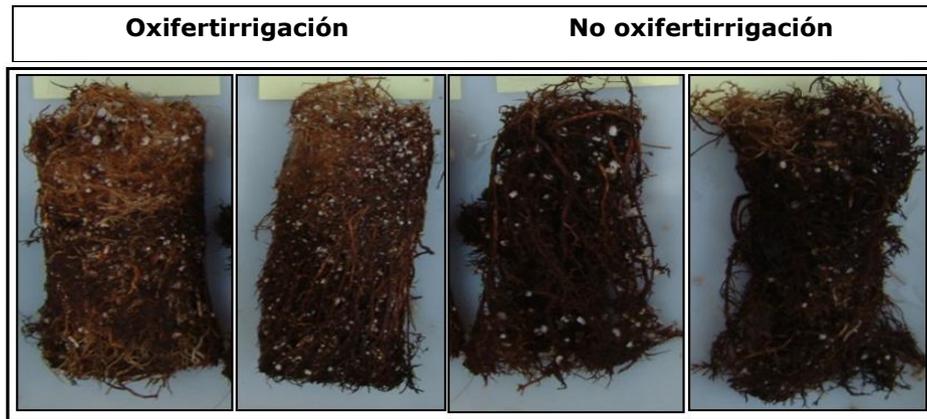


Figura 4.5. Sistema radicular de esquejes enraizados cultivados con y sin oxifertirrigación

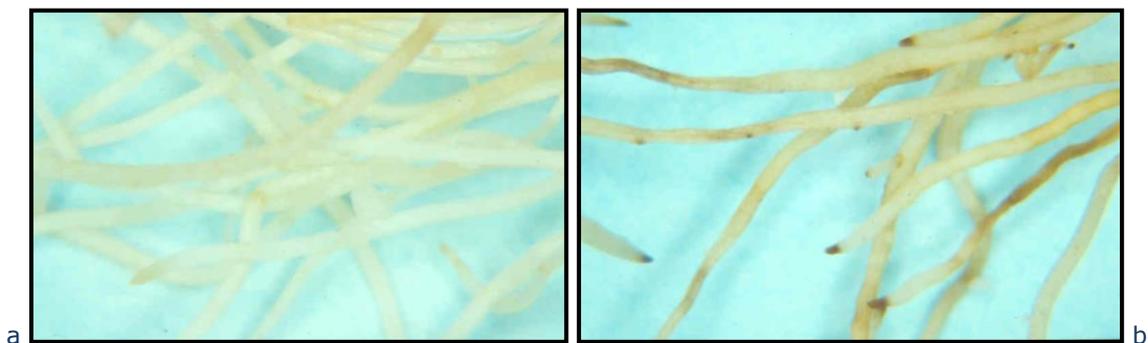


Figura 4.6. Detalle del sistema radicular de esquejes enraizados cultivados con (a) y sin (b) oxifertirrigación.

#### 4.4.2. Parámetros biométricos y contenido mineral

##### **Experimento II.2**

Las plantas cultivadas con tratamiento de oxifertirrigación no mostraron diferencias significativas con las no oxifertirrigadas respecto a los parámetros de biomasa (aérea), biomasa foliar y tasa de transpiración. Sí que se encontraron diferencias con un elevado nivel de significación entre el área foliar de plantas oxifertirrigadas y las no oxifertirrigadas (Tabla 4.3), tanto en las plantas cultivadas en perlita fina como en las cultivadas en perlita gruesa. El área foliar específica también mostró diferencias significativas entre los tratamientos de oxifertirrigación y no oxifertirrigación en las plantas cultivadas en perlita fina, en las que la oxifertirrigación se mostró especialmente eficaz, con una separación de medias de dos niveles, pero no se llegaron a apreciar diferencias significativas en perlita gruesa. El mejor comportamiento de las plantas oxifertirrigadas en desarrollo de área foliar concuerda con el mejor desarrollo radicular en las mismas (Tabla 4.2);

ambos factores tienen una relación directa, documentada por Costa (2002) y Costa et al. (2001, 2007), vinculada a la necesidad de carbohidratos para la formación inicial de callo y posterior de raíces, la formación de éstos con un buen nivel de fotosíntesis y la mayor absorción de oxígeno de los ápices radiculares con una mayor presencia de carbohidratos (Svenson, 1995).

**Tabla 4.3. Biomasa aérea de neoformación (tallos y hojas): área foliar, área específica y tasa transpiratoria de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de crecimiento, bajo tratamiento continuo de oxifertirrigación o no (oxifert., no oxifert.) y con dos tipos granulométricos de perlita, fina (PF) y gruesa (PG) (n=5)\***

|                    | <b>Biomasa<br/>(hojas+ tallos)</b> | <b>Biomasa<br/>foliar</b> | <b>Área<br/>foliar</b> | <b>Àrea<br/>específica</b>       | <b>Tasa<br/>transpiratoria</b>       |
|--------------------|------------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|
|                    | g (m.s.)                           | g (m.s.)                  | cm <sup>2</sup>        | cm <sup>2</sup> .g <sup>-1</sup> | mg.cm <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> |
| Oxifert /<br>PF    | 11.49                              | 8.61                      | 1668 A                 | 193.7 A                          | 21.17                                |
| No oxifert /<br>PF | 9.11                               | 7.84                      | 863 BC                 | 110.1 C                          | 22.22                                |
| Oxifert /<br>PG    | 11.31                              | 7.60                      | 1199 B                 | 157.8 B                          | 21.89                                |
| No oxifert /<br>PG | 8.69                               | 6.16                      | 784 C                  | 127.3 BC                         | 22.32                                |
| Probabilidad       | n.s.                               | n.s.                      | 0.0008                 | 0.0025                           | n.s.                                 |

\* Separación de medias según el test de Tukey; n.s.: no significativo.

El contenido de fósforo, magnesio, calcio y potasio, en raíces de plantas de rosal cultivadas con oxifertirrigación, fue significativamente mayor al del contenido correspondiente de las plantas no oxifertirrigadas, tanto en las plantas cultivadas en perlita fina como en las cultivadas en perlita gruesa, excepto en el caso del calcio en plantas cultivadas en perlita fina que no llegó a mostrar diferencias significativas (Tabla 4.4). Estas diferencias tan marcadas entre el contenido mineral de raíces oxifertirrigadas y no oxifertirrigadas sugieren un funcionamiento más activo de las raíces oxifertirrigadas, sin restricción en la absorción de nutrientes debida a la baja presencia de oxígeno (Drew, 1988; Armstrong y Maynard, 2002), de acuerdo con otras referencias que muestran aumento de contenidos foliares de calcio y su relación con mayores resistencias a enfermedades fúngicas (Tachibana, 1988; Bar-Tal, A. et al., 2001) así como con los resultados del apartado 3.4.5 y 3.4.6.

**Tabla 4.4. Contenido mineral en raíces de plantas de rosal cultivadas en cámara de condiciones controladas en perlita gruesa (PG) o fina (PF), tratadas o no mediante oxifertirrigación (% m.s.= % materia seca) (n = 3)\***

|                             | <b>Fósforo</b><br>% m.s. | <b>Magnesio</b><br>% s.m.s. | <b>Calcio</b><br>% s.m.s. | <b>Potasio</b><br>% s.m.s. |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Oxifertirrigación/<br>PF    | 0.630 A                  | 0.391 A                     | 1.265 B                   | 2.448 A                    |
| No oxifertirrigación/<br>PF | 0.389 B                  | 0.309 B                     | 1.099 B                   | 1.664 C                    |
| Oxifertirrigación/<br>PG    | 0.647 A                  | 0.364 A                     | 1.756 A                   | 2.392 A                    |
| No oxifertirrigación/<br>PG | 0.429 B                  | 0.297 B                     | 1.326 B                   | 2.069 B                    |
| Probabilidad                | 0.0093                   | 0.0020                      | 0.0055                    | 0.0014                     |

\*Separación de medias según el test de Tuckey

#### 4.4.3. Conductividad hidráulica

##### **Experimento II.2**

La separación de medias de la conductividad hidráulica radicular de plantas con y sin tratamiento de oxifertirrigación en dos granulometrías diferentes de perlita (fina=PF, gruesa=PG) no llegó a mostrar diferencias significativas entre tratamientos, ni entre sustratos ni para el tratamiento de oxifertirrigación (Tabla 4.5) (Figura 4.7), igual que encontramos con raíces de rosa cultivada para flor cortada (apartado 3.4.5) y a diferencia de lo obtenido en el experimento de pimiento (apartado 5.4.4.1). La gran diversidad de estructuras en raíces y las variaciones en las demandas de oxígeno se da a nivel de género, especie, pero también entre raíces de una misma planta (Luxmoore, 1970; Armstrong, 2002) lo que concuerda con la variabilidad en tasas de respiración y conductividad (Luxmoore, 1972).

**Tabla 4.5. Conductividad/resistencia hidráulica de esquejes enraizados de rosal cultivados en cámara de condiciones controladas, con o sin oxifertirrigación, en perlita fina (B-10, PF) y perlita gruesa (A-13, PG) (n=39).**

|    | <b>ch (cm<sup>2</sup>/MPa.s)</b> |   |         | <b>ch (cm<sup>2</sup>/MPa.s)</b> |   |  |
|----|----------------------------------|---|---------|----------------------------------|---|--|
| PF | 1.5088. 10 <sup>-6</sup>         | a | Oxif    | 1.4666. 10 <sup>-6</sup>         | a |  |
| PG | 1.5524. 10 <sup>-6</sup>         | a | No oxif | 1.6072. 10 <sup>-6</sup>         | a |  |

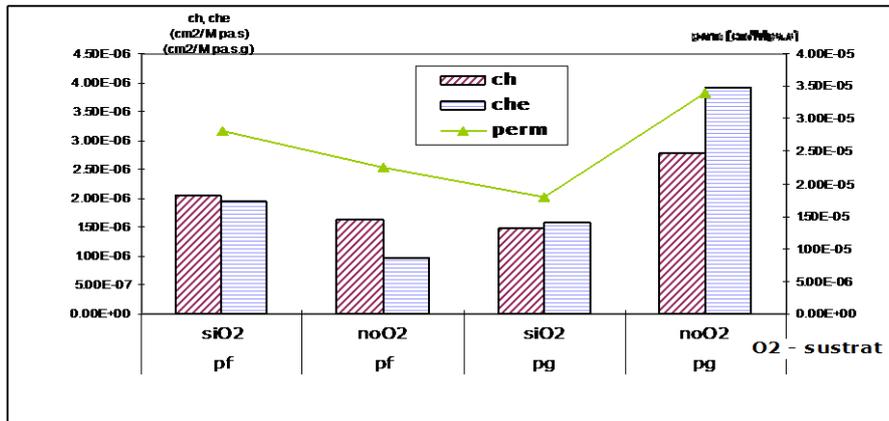


Figura 4.7. Conductividad hidráulica, Conductividad hidráulica específica y permeabilidad en esqueje enraizado de rosa, con y sin oxifertirrigación (sí O<sub>2</sub>, no O<sub>2</sub>) y cultivadas en perlita fina (B-10) y perlita gruesa (A-13)

#### 4.4.4. Respirometría de raíces escindidas

##### Experimento II.2

Los resultados de las medidas de respiración de los fragmentos de raíces escindidas de las plantas jóvenes de rosal cultivadas en la cámara de crecimiento muestran una tasa respiratoria significativamente mayor en las plantas cultivadas con oxifertirrigación (+43%) que en las no oxifertirrigadas (Tabla 4.6).

Al comparar estos resultados con los obtenidos en las medidas de respirometría de planta entera, se observa cómo el efecto sobre raíces individualizadas del mismo tipo es claro, aunque sobre planta entera puede haber quedado enmascarado por la variabilidad del conjunto (Luxmoore, 1970; Mu et al. 2006).

También se observa que el contenido en nitrógeno es significativamente mayor en las plantas oxifertirrigadas, tanto en raíz como en hoja (Tabla 4.5), mostrando uno de los factores que promueve el mejor desarrollo aéreo y radicular visto en el apartado 4.4.1 y 4.4.2 (Scagel, 2004; Druge 2000, 2007).

**Tabla 4.6. Tasa respiratoria, contenido de nitrógeno (N) y de carbono (C) de fragmentos escindidos de raíces y de hojas de plantas de rosa sometidas o no a oxifertirrigación (cámara condiciones controladas). Biomasa aérea y radicular (peso seco, PS; materia seca, m.s.) de las plantas de las que proceden los fragmentos de raíces (n=10)\***

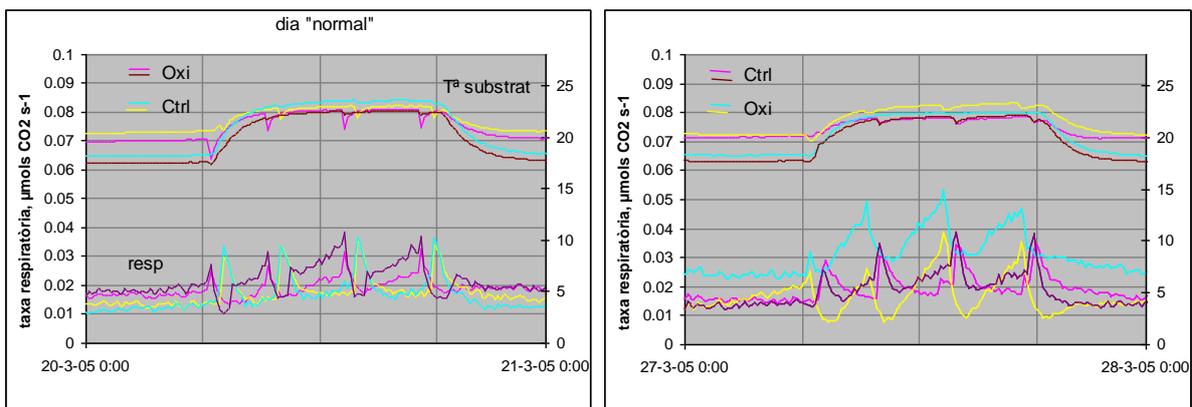
|             | Tasa de respiración radicular                                | N en raíz                | C en raíz                 | N en hojas               | C en hojas                | PS raíces                | PS brotes                | PS raíces+ brotes | Ratio PS Raíces /brotes                         |
|-------------|--|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|---|
|             | $\mu\text{mol O}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ | % m.s.                   | % m.s.                    | % m.s.                   | % m.s.                    | g (m.s.)                 | g (m.s.)                 | g (m.s.)          | $\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 100$ (m.s.) |
| Oxifert.    | 70.95A<br>( $\pm 5.61$ )                                     | 3.41 a<br>( $\pm 0.10$ ) | 34.95 a<br>( $\pm 0.51$ ) | 4.49 a<br>( $\pm 0.07$ ) | 45.43 a<br>( $\pm 0.14$ ) | 0.30 a<br>( $\pm 0.06$ ) | 1.29 a<br>( $\pm 0.27$ ) | 1.59 a            | 18.69 a   |
| No oxifert. | 49.56B<br>( $\pm 4.35$ )                                     | 2.98 b<br>( $\pm 0.11$ ) | 35.04 a<br>( $\pm 1.01$ ) | 4.13 b<br>( $\pm 0.10$ ) | 45.06 b<br>( $\pm 0.19$ ) | 0.27 a<br>( $\pm 0.04$ ) | 1.19 a<br>( $\pm 0.18$ ) | 1.46 a            | 18.45 a   |
| Probab.     | 0.0001   | 0.0098                   | n. s.                     | 0.0012                   | 0.0012                    | n.s.                     | n.s.                     | n.s.              | n.s.  |

\*separación de medias según el test de Tukey ( $P < 0.05$ ) (n.s.=no significativo)

#### 4.4.5. Respirometría de planta entera de rosal

##### Experimento II.3

El flujo de  $\text{CO}_2$  desde el sistema sustrato-raíz dependió del peso seco de cada planta, pero también siguió un modelo diario asociado a los momentos de riego (Figura 4.8), tal como describe Casadesús et al. (2007). En concreto, cada riego produjo un pico del flujo de  $\text{CO}_2$  evidente e inmediato, que se podría explicar por el desplazamiento del aire enriquecido en  $\text{CO}_2$  de los poros del sustrato por el agua de riego. Se determinaron algunos parámetros de las plantas con o sin tratamiento de oxifertirrigación para comparar ambos modelos respiratorios (Tabla 4.7).



**Figura 4.8. Modelo diario de flujo de  $\text{CO}_2$  en el sistema sustrato-sistema radicular: Taxa respiratoria (resp,  $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) y temperatura de sustrato de cultivo ( $^{\circ}\text{C}$ ) en plantas con oxifertirrigación (Oxi) y sin (Ctrl).**

**Tabla 4.7. Parámetros descriptivos de los modelos diarios de respiración sobre plantas de rosal cultivadas en cámara de condiciones controladas en plantas jóvenes de rosal con o sin oxifertirrigación.**

|  |   | No oxifertirrigadas |        | Oxifertirrigadas |        | ANOVA (Signific) |   |
|--|---|---------------------|--------|------------------|--------|------------------|---|
|  |   | avg                 | StdErr | avg              | StdErr | Probabilidad     |   |
| Respiración diaria por planta                | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ día}^{-1}$ | 1560.6              | 60.1   | 2047.5           | 428.7  | 0.0659           |   |
| Máximo diario de respiración por planta      | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$   | 0.0351              | 0.0018 | 0.0428           | 0.0057 | 0.0670           |   |
| Respiración basal por planta                 | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$   | 0.0174              | 0.0011 | 0.0214           | 0.0045 | 0.0268           | * |
| Media de picos de respiración por planta     | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ planta}^{-1} \text{ s}^{-1}$   | 0.0339              | 0.0019 | 0.0372           | 0.0052 | 0.1050           |   |
| Respiración por planta antes del pico        | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ planta}$                       | 0.0202              | 0.0035 | 0.0306           | 0.0055 | 0.0004           | * |
| Peso seco de raíz                            | g   | 0.6136              | 0.0527 | 0.7781           | 0.2458 | 0.2745           |   |
| Prod. diaria CO <sub>2</sub> por g de raíz   | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ gPS}^{-1} \text{ día}^{-1}$    | 0.0298              | 0.0023 | 0.0344           | 0.0111 | 0.5387           |   |
| Índice máximo de respiración (por g de raíz) | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ gPS}^{-1} \text{ s}^{-1}$      | 0.0581              | 0.0071 | 0.0635           | 0.0231 | 0.7149           |   |
| Respiración basal por g de raíz              | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ gPS}^{-1} \text{ s}^{-1}$      | 0.0411              | 0.0200 | 0.0293           | 0.0037 | 0.0998           |   |
| Media de pico de respiración por g de raíz   | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ gPS}^{-1} \text{ s}^{-1}$      | 0.0769              | 0.0326 | 0.0523           | 0.0086 | 0.0388           | * |
| Respiración por g de raíz antes de los picos | $\mu\text{moles CO}_2 \text{ gPS}^{-1} \text{ s}^{-1}$      | 0.0484              | 0.0260 | 0.0425           | 0.0076 | 0.5129           |   |

La mayoría de los parámetros analizados para la descripción de los modelos diarios de respiración dieron valores más elevados en las plantas oxifertirrigadas que en las plantas del tratamiento control, más concretamente la ANOVA indica diferencias significativas en la respiración por planta antes de los picos ligados a los riegos. Sin embargo, el rango de variación entre plantas fue amplio y esto hizo difícil la valoración de las diferencias significativas en la mayor parte de los otros parámetros descriptivos de los modelos de respiración diarios. Así, la respiración total diaria por planta fue casi un 33% más alta en las plantas con oxifertirrigación que en las plantas control,

pero la variabilidad entre plantas hace que la significación de la ANOVA no llegue al 0.05. En cuanto a la respiración basal, los resultados también dan valores mayores, significativos, en las plantas tratadas, pero en este caso no hubo homogeneidad en las varianzas, siendo mayor la varianza de las plantas tratadas. El peso seco radicular muestra la tendencia a ser superior en las plantas oxifertirrigadas que en las que no se oxifertirrigaron, aunque no llega a ser estadísticamente significativo, significación que sí se da en el ensayo anterior (Tabla 4.2).

Cuando la tasa de respiración se expresa por unidad de peso seco de raíz, las diferencias entre los dos grupos son poco apreciables.

La gama de valores de la tasa de respiración radicular registrados por este equipo fue comparable a los de otros estudios como el de Poorter et al. (1991). Sin embargo, el rango de medidas fue bastante amplio, principalmente a causa de los diferentes calibres de las plantas y también por las marcadas variaciones observadas en los modelos diarios.

Parte de las variaciones diarias observadas pueden ser explicadas por las fluctuaciones térmicas entre el día y la noche, ya que la temperatura es un factor decisivo en la respiración radicular y del sustrato (Lloyd y Taylor, 1994); también se ha estudiado y se conoce que la actividad fotosintética de los brotes afecta a la respiración radicular (Högberg et al. 2001). En nuestro caso tanto el efecto térmico como el fotosintético pueden considerarse prácticamente constantes durante la mayor parte de la fase luminosa del día, dadas las condiciones ambientales constantes en la cámara de condiciones controladas.

En relación a los efectos de los riegos sobre el flujo de CO<sub>2</sub> desde el sistema sustrato-raíz, algún autor ha observado la estimulación de la actividad radicular, tal como la absorción de nutrientes, por los eventos de riego, especialmente a bajas concentraciones de nutrientes (Silber et al. 2003). En nuestro estudio, el flujo de CO<sub>2</sub> se desencadenó inmediatamente después del inicio de la irrigación y no se encontró ninguna relación entre el número de riegos y la cantidad total de CO<sub>2</sub> liberada durante el día. Por lo tanto, el efecto a corto plazo de los riegos sobre el flujo de CO<sub>2</sub> sería debido principalmente a los cambios en los procesos de transporte de CO<sub>2</sub> a través del sustrato, mientras que la principal fuente de CO<sub>2</sub>, la respiración radicular, permanecería más estable a lo largo de los ciclos de riego.

En general, las medidas continuas de la respiración radicular parecen indicar una mayor respiración por planta en las plantas oxifertirrigadas, cosa que puede estar parcialmente asociada a sistemas radiculares mayores y en parte a una ligera estimulación de la respiración por unidad de peso seco de raíz. Sin embargo, el efecto puede no darse siempre, dado que en un sistema radicular hay fracciones de raíces muy diferentes de otras en edad y funcionalidad y al referir la producción de CO<sub>2</sub> al peso seco total de raíces quizás queda enmascarado algún efecto en alguna fracción de raíces más específica (Mu et al. 2006) y esto reduce la significación de estas observaciones.

## 4.5. Conclusiones

En las condiciones controladas en las que se realizaron los cultivos de esqueje y planta joven de rosal se llega a concluir que:

### Experimento II.1:

- Las raíces de neoformación de plantas oxifertirrigadas presentan mayor peso, longitud, área y ratio área/peso seco que las no oxifertirrigadas

### Experimento II.2:

- El contenido mineral de las raíces de plantas jóvenes de rosal oxifertirrigadas es mayor en cuanto al fósforo, el magnesio y el potasio tanto cuando el sustrato es de partícula fina como gruesa, y en calcio sólo cuando es de partícula gruesa
- En los esquejes de plantas oxifertirrigadas cultivados en cámara de condiciones controladas, el área foliar -empleando tanto perlita fina como gruesa- y el área específica sólo cuando se cultivan en perlita fina, es significativamente mayor que los respectivos parámetros medidos en plantas no oxifertirrigadas
- El contenido en nitrógeno radicular de materia seca es mayor en las plantas oxifertirrigadas que en las plantas no oxifertirrigadas
- El contenido de nitrógeno por materia seca de hojas es superior en plantas oxifertirrigadas que en plantas no oxifertirrigadas.
- El contenido en carbono de materia seca de hojas de plantas oxifertirrigadas es ligeramente superior que en plantas no oxifertirrigadas.
- La tasa respiratoria de raíces escindidas es mayor en plantas oxifertirrigadas que en plantas no oxifertirrigadas
- No se detectan diferencias significativas de la conductividad hidráulica radicular entre plantas que fueron oxifertirrigadas o no oxifertirrigadas.

**Experimento II.3:**

- Las medidas continuas de la respiración radicular muestran la respiración basal y la respiración por planta antes de los riegos significativamente mayor en las plantas oxifertirrigadas que en las no oxifertirrigadas. Los resultados obtenidos también sugieren una mayor respiración por planta en las plantas oxifertirrigadas respecto de las no oxifertirrigadas, asociada parcialmente a una ligera estimulación de la respiración por unidad de peso seco de raíz, aunque la variabilidad de los registros no permite confirmar la significación estadística.

**5. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de  
pimiento (Capsicum annuum L.).  
Efectos sobre su desarrollo y productividad**



## **5. Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de pimiento (*Capsicum annuum* L.). Efectos sobre su desarrollo y productividad.**

### **5.1. Introducción**

Los estudios sobre pimiento que tratan de la optimización de los recursos (agua, fertilizantes y otros) y de la mejora del rendimiento del cultivo son numerosos (Fernández et al., 2005; González et al., 2007; Aladenola & Madramootoo, 2014). Además, el pimiento es un cultivo sensible al estrés hídrico, especialmente en el período de la floración por la incidencia que dicho estrés tiene en el número de frutos (Bruce et al., 1980; Ismail, 2012; Aladenola & Madramootoo, 2012); otros autores muestran la importancia que tiene en dicho cultivo equilibrar la disponibilidad de agua en la rizosfera con la aireación, por su incidencia en el desarrollo de las raíces, en la calidad del fruto, en la sensibilidad a enfermedades fúngicas, o en la eficiencia en el uso de agua (Dalla Costa & Gianquinto, 2002; Sezen et al., 2006).

Los resultados de algunas experiencias con cultivos de hortalizas muestran un efecto estimulante significativo del uso de soluciones nutritivas sobresaturadas de oxígeno sobre algunos parámetros biométricos (Wagenvoort et al., 1985; Tachibana, 1988; Yoshida et al., 1996; Marfà y Guri, 1999; Guri, 2002, Bhattarai et al., 2004, 2006). La causa de dichos efectos

podría tener su origen en compensar condiciones transitorias de hipoxia. Estas condiciones se dan cuando en el medio radicular disminuye la disponibilidad de  $O_2$ ; esta situación se da en sustratos con una baja capacidad de aireación, inferior al 10% y suele corresponder al estadio de humectación del sustrato en el cual el espacio poroso lleno de agua es el de los poros de tamaño inferior a  $30 \mu m$ ; en estas condiciones la renovación del oxígeno en el espacio poroso del entorno radicular puede ser limitado por el exceso de agua en la matriz porosa y facilita condiciones más o menos acusadas, localizadas o transitorias de hipoxia, (Allaire et al. 1996). Se ha estudiado la evolución del oxígeno en la solución del sustrato y, así como en ciertas condiciones la aireación puede ser suficiente, en otras, como cuando la radiación lumínica es elevada, resulta deficitaria (Rivière et al., 1993). También hay estudios que muestran cómo la frecuencia del riego puede optimizar la cantidad de oxígeno disuelto en la solución del sustrato (González et al., 2007; Gercek, 2009). Sin embargo, hay poca información acerca de los efectos en los cultivos del uso de soluciones nutritivas o agua de riego sobresaturada en oxígeno.

### 5.1.1. El pimiento

**Origen y expansión.** El cultivo del pimiento está muy extendido en muchos países. La planta pertenece al género *Capsicum* y la especie cultivada mayoritariamente en España y en general en Europa es *Capsicum annuum*, de la familia de *Solanaceae*, aunque otras especies como *Capsicum baccatum* (ají escabeche), *Capsicum chinense* (habanero), *Capsicum frutescens* (ojo de pájaro, tabasco según alguna fuente) o *Capsicum pubescens* (rocoto sudamericano) también se cultivan en diferentes países americanos.

El pimiento fue de las primeras especies cultivadas traídas desde América. La expansión actual tanto a nivel mundial (Tabla 5.1) como a nivel del estado español (Tabla 5.2) es muy remarcable.

**Tabla 5. 1. Países con mayor producción de pimiento (situación en 2013).**

| 'País'                    | Producción de Frutos (toneladas) |
|---------------------------|----------------------------------|
| China. Continental        | 15.800.000.00                    |
| México                    | 2,294,400.00                     |
| Turquía                   | 2,159,348.00                     |
| Indonesia                 | 1.726.382.00                     |
| España                    | 999,600.00                       |
| Estados Unidos de América | 889,269.00                       |
| Egipto                    | 655,442.00                       |
| Nigeria                   | 510.000.00                       |
| Arqelia                   | 482,471.00                       |
| Etiopía                   | 400,000.00                       |
| Países Bajos              | 325,000.00                       |

(FAOSTAT, 2015)

Tabla 5.2. Distribución del cultivo de pimiento y de la producción en España (situación en 2013).

|                           | Superficie |            |           |            | Producción de fruto<br>(toneladas) |
|---------------------------|------------|------------|-----------|------------|------------------------------------|
|                           | secano     | Aire libre | Protegido | Total (ha) |                                    |
| <b>GALICIA</b>            | 38         | 535        | 615       | 1.188      | 67.275                             |
| <b>NAVARRA</b>            | -          | 722        | 7         | 729        | 18.553                             |
| <b>CATALUÑA</b>           | 4          | 298        | 30        | 332        | 7.983                              |
| <b>CASTILLA-LA MANCHA</b> | 5          | 1.310      | -         | 1.315      | 54.210                             |
| <b>C. VALENCIANA</b>      | -          | 142        | 524       | 666        | 47.190                             |
| <b>R. DE MURCIA</b>       | -          | 218        | 1.015     | 1.233      | 107.250                            |
| <b>EXTREMADURA</b>        | -          | 438        | 24        | 462        | 19.971                             |
| <b>Almería</b>            | -          | 55         | 8.406     | 8.461      | 541.869                            |
| <b>ANDALUCÍA</b>          | 15         | 1.786      | 9.312     | 11.113     | 662.304                            |
| <b>CANARIAS</b>           | 16         | 61         | 158       | 236        | 15.409                             |
| <b>ESPAÑA</b>             | 220        | 6.082      | 11.805    | 18.108     | 1.016.811                          |

(MAGRAMA, 2015)

**La planta y el cultivo.** La planta de pimiento se cultiva como una planta herbácea anual en climas templados, aunque en sus zonas de origen puede desarrollarse y seguir produciendo durante varios años (Wien, 1997). En general el pimiento es exigente tanto agrónomica como climáticamente, aunque tiene algunos tipos de fruto pequeño muy rústicos; es sensible a la humedad del suelo y prefiere suelos profundos, ligeros, ricos en materia orgánica y bien aireados y permeables (Erard, 2002). Los pimientos se aprovechan como fruto en diferentes puntos de madurez para ensaladas, verdura fresca o cocinada, como colorante extraído de los frutos secos, y como fuente de capsicina, una de las especias más importantes en el mundo (Andrews, 1984).

El pimiento consta de una raíz pivotante de la que parten raíces laterales; el conjunto profundiza de 30 hasta más de 1 m en el suelo, con una parte importante de la cabellera radicular superficial y una amplitud de unos 30 a 50 cm alrededor de la raíz principal, siempre que ésta no se pierda por cultivo en contenedor o cultivo sin suelo, en cuyo caso se desarrollan nuevas raíces laterales a partir de la raíz primaria. En los cultivares modernos la masa radicular es relativamente pequeña en comparación con la parte aérea, del orden del 10% del peso total de una planta adulta; el ratio raíz: parte aérea es superior en plantas jóvenes (Somos, 1984). A diferencia que el tomate, el pimiento presenta raramente raíces adventicias (Bosland y Votava, 2000). Aunque la raíz de pimiento no sufre de especiales modificaciones para convertirse en órgano de reserva, en las células parenquimáticas del córtex se almacena almidón y otras

sustancias de reserva; esto ocurre en las porciones maduras de la raíz, con crecimiento secundario en grosor (Nuez et al. 1996).

Katerji et al. (1993) mostraron que el pimiento es bastante sensible al estrés hídrico, especialmente durante la floración y el cuajado del fruto; esto hace que la práctica del regadío sea generalizada en su cultivo. Los descensos de productividad pueden ser importantes también debido a excesos de humedad ambiental, que será un riesgo por la incidencia de ataques importantes de *Botrytis*. Otra sensibilidad importante del cultivo del pimiento es a la necrosis apical ('blossom end rot', BER), fisiopatía frecuente ligada a deficiencias de calcio en fruto durante su desarrollo, ya sea debido a suelos pobres en calcio o también por variaciones importantes de la humedad del suelo (Nuez, 1996). La fisiopatía puede afectar no sólo a la parte terminal del fruto sino también a la lateral; esta alteración tiene características similares a la análoga en tomate; en tomate esta fisiopatía ha sido muy estudiada y está relacionada directamente con una deficiencia de calcio localizada en el fruto que tiene su origen en la dificultad de traslocación del calcio y que da lugar a concentraciones de calcio bajas en los frutos incluso en condiciones de cultivo sin limitaciones aparentes (Bangerth, 1979; Marti y Mills, 1991).

El pimiento tiene además una clara sensibilidad a la asfixia por anegamiento o en general a las condiciones de hipoxia radicular (Marfà, 1994; Orozco, 1995). Algún estudio reciente ha puesto de manifiesto la disminución del contenido de pigmentos fotosintéticos y de la fotosíntesis y la disminución de la eficiencia en el uso de agua en pimiento en condiciones de deficiencia de oxígeno, aunque se dan variaciones entre especies diferentes de *Capsicum* (Ou, 2011)

## 5.2. Objetivos

El objetivo general de este capítulo, es:

- Estudiar los efectos combinados de la oxifertirrigación, la gestión del riego (frecuencia) y las características del sustrato (en concreto, las propiedades hidrofísicas y su relación con la capacidad intrínseca de aireación) en el comportamiento agronómico y en algunos parámetros radiculares en un cultivo de pimiento (*Capsicum annuum* L).

Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Cuantificar las condiciones de oxigenación en la rizosfera de un cultivo sin suelo de pimiento sometido a condiciones diferentes de oxigenación, tipo de sustrato y frecuencias del riego,
- Evaluar los efectos principales y las interacciones de los diferentes tratamientos experimentales sobre el índice de cosecha, la calidad de la misma y algunos parámetros biométricos.
- Estudiar los efectos de la oxifertirrigación y las otras fuentes de variación experimentales -tipo de sustrato y frecuencia de riego-, sobre parámetros del sistema radicular como la resistencia hidráulica y la respiración.
- Evaluar el efecto de las fuentes de variación experimentales -oxigenación del medio radicular, tipo de sustrato y frecuencia de riego - en el consumo de agua del cultivo y en la eficiencia en el uso del agua del cultivo de pimiento.

## 5.3. Material y métodos

### 5.3.1. Localización, instalaciones y diseño experimental

**Localización. Invernadero.** Las experiencias se llevaron a cabo en un invernadero de la Finca Santa Creu del Centro del I.R.T.A. de Cabrils (comarca del Maresme, Barcelona, Cataluña). El invernadero tiene orientación N-S, estructura de acero galvanizado, ventilación cenital y lateral y cubierta de vidrio. Dispone de seis banquetas levantadas unos 30 cm del nivel del suelo. El cultivo se inició el 27 de abril y acabó el 30 de octubre, y por tanto se corresponde con un ciclo de primavera-verano.

**Equipo de fertirrigación.** Se disponía de equipo completo de fertirrigación, un autómata para la gestión de la misma (Mod. GP Hydro de la firma Van Vliet) y un radiómetro global situado sobre la cubierta vegetal, para establecer la cuota de radiación acumulada sobre la cubierta vegetal en orden a establecer, según un umbral de radiación acumulada, la frecuencia de riego en los diferentes tratamientos experimentales. Para la adición de oxígeno en solución en el tratamiento de oxifertirrigación se contó con oxígeno comprimido a 200 Kp.cm<sup>-2</sup>, reductor de presión, reguladores de presión (1 Kg.cm<sup>-2</sup> durante los riegos), ramales laterales de 3/4" y 1/2" de diámetro, goteros Netafim® de 4 L.h<sup>-1</sup> de caudal y autocompensantes i antidrenantes .

El sistema de riego utilizado constaba de dos circuitos independientes: uno para los tratamientos con oxifertirrigación y el otro para los tratamientos sin oxifertirrigación, (Figura 5.2).

La frecuencia de riego se estableció en base a la radiación solar acumulada sobre la cubierta vegetal y la dosis teniendo en cuenta la tasa de drenaje lo más ajustada posible al 25%. Se establecía un umbral de energía solar acumulada para el arranque del riego de 150 J.m<sup>-2</sup> para los tratamientos con frecuencia elevada y 300 J.m<sup>-2</sup> en los tratamientos de frecuencia baja. El autómata programaba los riegos tras procesar estos valores y los datos transmitidos por el radiómetro situado en el interior del invernadero y justo encima de la cubierta vegetal. Los riegos se organizaron en cuatro grupos de fertirrigación,; así los grupos 1 y 2 correspondían a los tratamientos con oxifertirrigación, el 1 con frecuencia elevada (O2 FE) y el 2 con frecuencia baja (O2 FB) y los grupos 3 y 4 a los tratamientos sin oxigenación complementaria, el 3 con frecuencia elevada (no O2 FE) y el 4 con frecuencia baja (no O2 FB).

Se recogieron los lixiviados correspondientes en una unidad muestral (cuatro plantas) de cada tratamiento en un colector (Figura 5.1).

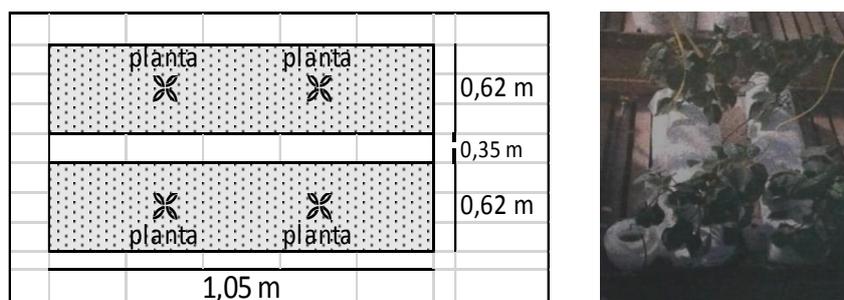
**Diseño experimental.** El diseño del ensayo correspondió a un modelo factorial aleatorizado con dos bloques, correspondientes a una banqueta de cultivo cada uno, complementado con una tercera banqueta de cultivo en el lado sur para reducir el efecto borde (Figura 5.2).

El experimento comprendió tres fuentes de variación:

- Tipo de sustrato en relación a sus características hidrofísicas: Dos tratamientos correspondientes a dos tipos diferenciados de sustrato a base de perlita de dos tipos granulométricos: perlita expandida tipo B6 (tamaño de partícula entre 0 y 1,5 mm) y perlita expandida tipo B12 (entre 0 y 5 mm) (Orozco, 1995).
- Oxigenación del medio radicular: Dos concentraciones de oxígeno: O<sub>2</sub> y no O<sub>2</sub>. La concentración O<sub>2</sub> corresponde a una solución sobresaturada de oxígeno con 14-16 ppm de O<sub>2</sub> disuelto en la solución nutritiva aplicada al cultivo; la concentración no O<sub>2</sub> corresponde a la de la solución nutritiva sin aportación de oxígeno suplementario.
- Frecuencia de riego: Dos frecuencias de riego; la frecuencia elevada, FE, que se corresponde con una radiación global acumulada umbral para el arranque de riego de 150 J.cm<sup>-2</sup>, y frecuencia baja, FB, con un valor umbral de 300 J.cm<sup>-2</sup> de radiación acumulada para el inicio del riego.

Así pues, la experiencia constó de 8 tratamientos diferentes (2 x 2 x 2), con dos repeticiones por bloque y tratamiento. La unidad muestral (parcela elemental), comprendía cuatro plantas de pimiento distribuidas en dos sacos de cultivo (2 plantas por saco) (Figura 5.1). Se dispuso de 32 unidades muestrales y 128 plantas de pimiento (Figura 5.2). La banqueta complementaria que se dispuso para atenuar el efecto borde se cultivó con sacos de perlita B6 y FE, la mitad con oxifertirrigación y la otra mitad sin oxifertirrigación.

El tratamiento estadístico de los datos se realizó con el programa SAS/STAT<sup>®</sup> de SAS Institute Inc., Cary, NC USA, versión 6.12 y se utilizó el test de Tukey para la separación de medias de los tratamientos.



**Figura 5.1. Esquema e imagen de plantación de la parcela elemental de la plantación del ensayo.**

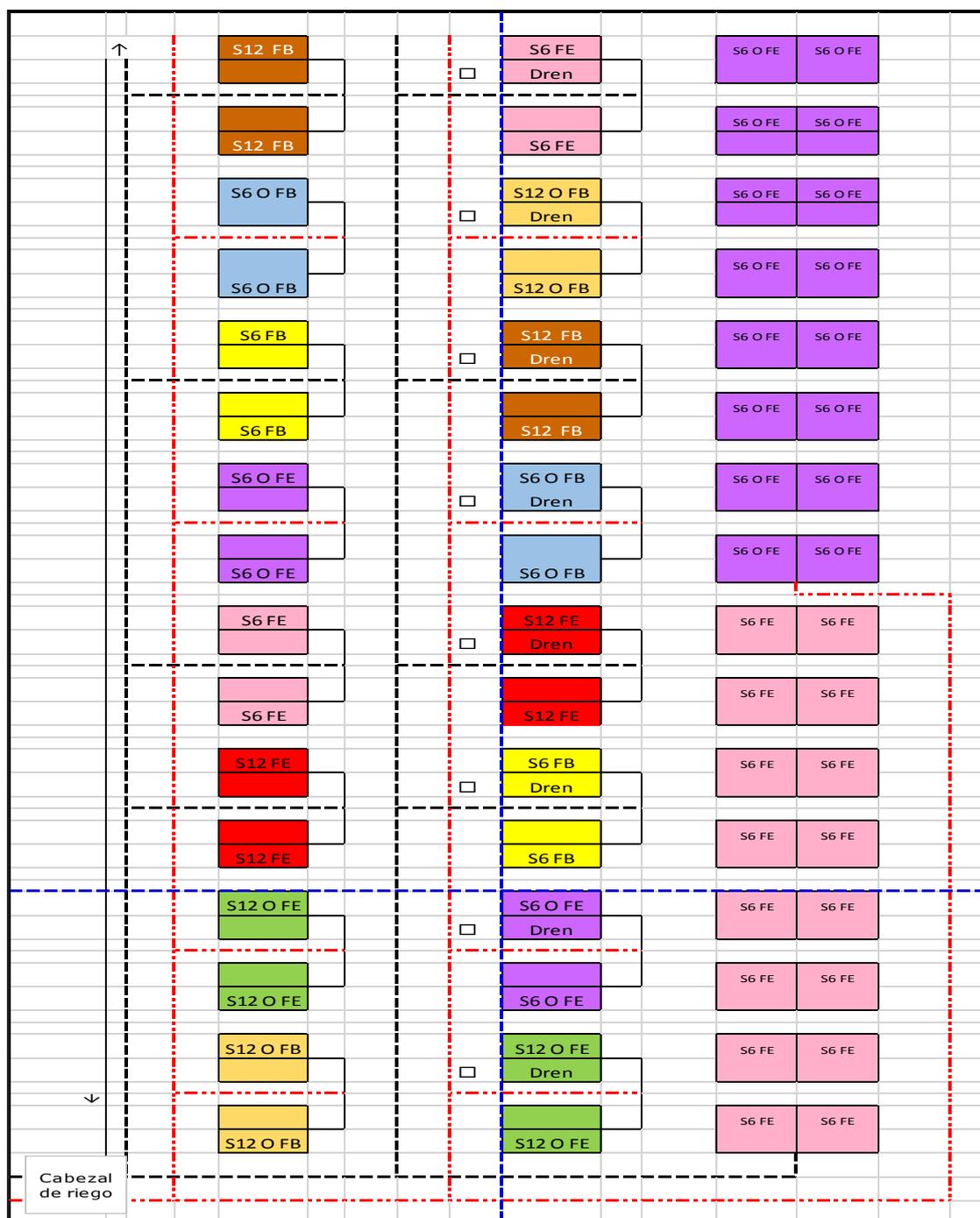


Figura 5.2. Esquema de plantación del ensayo, con las diferentes unidades de los tratamientos: control (-) y oxifertirrigación (O), frecuencia de riego alta (FE) y baja (FB) y perlita B12 (S12) y B6 (S6); □ recogida de drenaje; ----- sin O<sub>2</sub>, - - - - - con O<sub>2</sub>.

### 5.3.2. Material vegetal y técnicas culturales

**Material vegetal.** El material vegetal utilizado fueron plántulas de pimiento, *Capsicum annuum*, cv. Vidi<sup>®</sup>, (híbrido F1 de la empresa Vilmorin) en el estadio de 3-4 hojas verdaderas, cultivadas en taco de turba de 33 x 33 mm.

**Técnicas culturales.** Se utilizaron sacos de cultivo sin suelo de 105 cm de largo y 21 cm de diámetro, 30 L de volumen por unidad que corresponden a 15 L por planta. La mitad de los sacos del ensayo fueron de perlita B6 (fina, tamaño gránulo ente 0 y 1,5 mm) y la otra mitad de perlita B12 (gruesa, tamaño del gránulo entre 0 y 5 mm)), además de los de la banqueta complementaria en la que todos los sacos fueron de perlita B6. Las propiedades físicas de los dos sustratos son las que muestra la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3. Propiedades físicas de los sustratos B6<sup>®</sup> y B12<sup>®</sup>; Dr: densidad real, Da: densidad aparente, EPT: espacio poroso total, CA: capacidad de aireación, AFD: agua fácilmente disponible, AR: agua de reserva, ADD: agua difícilmente disponible y Ksat: conductividad hidráulica saturada (Orozco, 1995).**

|                        | <b>Dr</b>          | <b>Da</b>          | <b>EPT</b> | <b>CA</b> | <b>AFD</b> | <b>AR</b> | <b>ADD</b> | <b>Ksat</b>          |
|------------------------|--------------------|--------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|----------------------|
| <b>Sustrato</b>        | g.cm <sup>-3</sup> | g.cm <sup>-3</sup> | %          | %         | %          | %         | %          | cm.min <sup>-1</sup> |
| <b>B6<sup>®</sup></b>  | 2,37               | 0,062              | 97,4       | 24,38     | 36,62      | 8,42      | 27,76      | 0,6778               |
| <b>B12<sup>®</sup></b> | 2,37               | 0,155              | 93,5       | 29,14     | 24,58      | 6,98      | 25,2       | 0,8113               |

La plantación se realizó el 27 de abril y previamente se realizó la humectación de los sacos aplicando riegos con solución nutritiva de 2 minutos cada hora a lo largo de dos días; después de esto se practicaron orificios en la base del saco, de 1 cm de diámetro (5 por saco) para asegurar el drenaje y dos orificios de 5 cm de diámetro en la parte superior para la plantación.

El tipo de pinzado de las plantas fue el denominado holandés, dejando dos tallos principales a partir de la cruz y eliminando los brotes axilares, tipo de conducción de planta para potenciar un mayor calibre de los frutos. Estos tallos se tutoraron sostenidos por una estructura metálica sobrepuesta en las banquetas. Se realizó un sombreado con malla las semanas de mayor radiación solar para evitar excesos de temperaturas y de radiación directa sobre el cultivo.



**Figura 5.3. Planta de pimiento y vista general de la plantación del ensayo**

La solución nutritiva que se formuló inicialmente para el ensayo se basó en la recomendada por Sonneveld y Straver (1994) para cultivo en sustrato inerte de pimiento; a partir de ésta y de la composición del agua de riego disponible se formularon las soluciones nutritivas que se utilizaron en los diferentes estadios del cultivo, según las necesidades del mismo (Tabla 5.4). La formulación de las diferentes soluciones se ajustó utilizando el programa Prosfert® (Cunill y Marfà, 1988). La formulación de la solución nutritiva 1 se realizó a partir del agua de red 1 y las soluciones 2, 3 y 4 a partir del agua de red 2. La solución nutritiva 1 (SN 1) se utilizó desde la plantación hasta el 2 de julio, la SN 2 desde el 3 de julio al 31 de julio, la SN 3 desde el 1 de agosto al 25 de agosto y la SN 4 correspondió al periodo del 26 de agosto hasta el 19 de octubre, final del ensayo.

**Tabla 5.4. Composición de las aguas de riego y las soluciones nutritivas utilizadas. SN 0: Solución recomendada por Sonneveld y Straver (1994); RED 1, 2: agua de red 1, 2. SN1 – 4: soluciones nutritivas 1 a 4. (\*, \*\*, \*\*\*, ajuste de las soluciones por necesidades del cultivo).**

|              | $\text{NO}_3^-$ | $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ | $\text{SO}_4^{2-}$ | $\text{K}^+$ | $\text{Ca}^{++}$ | $\text{Mg}^{++}$ | $\text{NH}_4$ | pH   | CE   |
|--------------|-----------------|---------------------------|--------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|------|------|
|              | meq/L           | meq/L                     | meq/L              | meq/L        | meq/L            | meq/L            | meq/L         |      | dS/m |
| <b>SN 0</b>  | 15,5            | 1,25                      | 1,75               | 6,5          | 4,75             | 1,5              | 1,25          |      | 2,2  |
| <b>RED 1</b> | 0,88            | 0                         | 4,61               | 0            | 8,96             | 1,84             | 0             | 7,43 | 0,9  |
| <b>SN 1</b>  | 10,9            | 1,25                      | 4,61               | 5,42         | 8,96             | 1,84             | 1,25          | 5,8  | 1,8  |
| <b>RED 2</b> | 0,76            | 0                         | 3,61               | 0            | 9,25             | 1,93             | 0             | 7,34 | 1,02 |
| <b>SN 2</b>  | 12,7            | 1,5                       | 3,61               | 6,5          | 9,25             | 3,5 *            | 0,3           | ,5   | 1,78 |
| <b>SN 3</b>  | 12,7            | 1,5                       | 5,1                | 6,5          | 9,25             | 5 **             | 0,3           | 5,5  | 1,87 |
| <b>SN 4</b>  | 10,89           | 1,5                       | 5,1                | 4,99***      | 9,25             | 5                | 0             | 5,5  | 1,89 |

Durante el ensayo se realizaron ajustes en la composición de la solución nutritiva debido a tres circunstancias diferentes. A lo largo del mes de julio se observaron síntomas de deficiencia de magnesio en hoja, carencia habitual en pimiento (Nuez, F., 1996), por lo que se enriqueció la solución nutritiva 2. Al persistir los síntomas de carencia de magnesio se aumentó hasta 5 meq.L<sup>-1</sup> la concentración de dicho macroelemento en la solución nutritiva 3. Desde finales de agosto se disminuyó la concentración de potasio para favorecer indirectamente el control de necrosis apical (BER); la concentración de magnesio se mantuvo, dado que ya no había síntomas de carencia del elemento (\*, \*\*, \*\*\*, en Tabla 5.2). La aplicación de microelementos se llevó a cabo aplicando 5,4 mg.L<sup>-1</sup> de la mezcla de un 33% del preparado a base de quelato de hierro Fetrilon®13 (13% de hierro en forma de quelato, Fe-EDTA) y un 67% de Hortrilon®, compuesto de diversos microelementos detallados en la Tabla 5.5, y la corrección del pH con ácido nítrico del 40% de riqueza). La fertirrigación fue en circuito abierto, sin recirculación de lixiviados.

**Tabla 5.5. Composición elemental (%p/p) del producto comercial Hortrilon®.**

| Elemento | B   | Cu-EDTA | Fe-EDTA | Mn-EDTA | Mo  | Zn-EDTA | Mg |
|----------|-----|---------|---------|---------|-----|---------|----|
| %        | 0,5 | 2,5     | 5       | 2,5     | 0,5 | 0,5     | 3  |

### 5.3.3. Control de la concentración de oxígeno

La medida de la concentración de oxígeno disuelto en la solución se realizó justo a la salida del agua de los goteros, recogiendo la solución en tubos de ensayo de 10 mL, de dos muestras por tratamiento y 10 días durante el cultivo. También se midió la concentración de oxígeno en la solución del sustrato a primera hora de la mañana en días diferentes a lo largo del periodo de cultivo y en una tercera tanda de medidas en la solución del sustrato a diferentes horas, desde primera hora de la mañana hasta primera hora de la tarde, durante dos días. Para la obtención in situ de la solución del sustrato se emplearon sondas de extracción inseridas en el sustrato y a un tubo de ensayo de 10 mL de capacidad, al que previamente se le había realizado el vacío, y provisto de un tapón de goma de autosellado una vez retirada la aguja hipodérmica conectada a la sonda de extracción e inserida en el tubo de ensayo.

Como se ha dicho antes, se tomaron muestras de la solución con las sondas muestreadoras (*Rhizon Soil Moisture Sampler, ref. Eijkelkamp 19.21.01*) (Figura 5.3) para extraer la solución del sustrato para cada unidad de muestra. Esta sonda está formada por un tubo de 10 cm de largo y 2,3 mm de diámetro, de polímero hidrofílico y poroso, conectado a otro tubo, de P.V.C. de 10 cm de largo que finaliza en un conector de rosca donde se acopla una aguja hipodérmica; esta aguja, de 40 mm de largo y 0.8 mm de diámetro (*Eijkelkamp, ref. 19.21.02*) se introducía en el tubo. La depresión provocaba un desplazamiento de la solución del sustrato hacia el interior del

tubo, atravesando la sonda. Se realizaron extracciones entre las 9 y las 11 de la mañana en cinco días repartidos a lo largo del periodo del ensayo (cada 3-4 semanas) y otra en la que se midió la concentración de oxígeno disuelto de la solución extraída a diferentes horas (9.00 h, 11.00 h y 14.00 h) en dos días diferentes (20/07 y 18/09) para el análisis de la variación del oxígeno en la rizosfera a lo largo del periodo estival y desde primera hora de la mañana hasta el mediodía solar. La medida del oxígeno de las muestras se realizó lo más inmediatamente posible desde la toma de la muestra con un oxímetro DESIN (Mod. Consort Z 621) y electrodo de oxígeno Schott Geräte 9009/2 (Figura 5.3), con intervalo de lectura de 0 a 60 ppm de O<sub>2</sub> y precisión  $\pm 0.01/0.1$  ppm, que permite medir el oxígeno en el agua, el porcentaje de saturación de oxígeno (precisión  $\pm 0.1\%$ ) y la temperatura del agua (precisión  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ ).



Figura 5.4. Detalle de (a) la sonda utilizada para la toma de muestras

#### 5.3.4. Biomasa y rendimiento agronómico

**Biometría.** Los parámetros biométricos medidos fueron los siguientes: altura de planta, peso seco del tallo, peso específico foliar y contenido relativo de clorofila (mediante Medidor Minolta Spad 502 plus). Las medidas se realizaron entre el 25 de agosto y el 8 de septiembre.

**Rendimiento agronómico.** Los parámetros de rendimiento de la cosecha de los frutos de pimiento que se valoraron fueron: productividad (peso fresco y número de frutos), calidad, precocidad, diámetro y longitud de los frutos y presencia o no de necrosis apical (*Blossom end rot*); se valoró la afectación de los distintos tratamientos del cultivo debida a necrosis apical (*blossom end rot*, BER), fisiopatía frecuente en cultivos de pimiento, asociada a deficiencias de calcio en el fruto durante su periodo de desarrollo; se contaron los frutos afectados en cada

unidad de muestra y a continuación se calculó un índice de afectación por BER, tomando como referencia el tratamiento con menos frutos afectados.

### 5.3.5. Efectos en el sistema radicular

#### 5.3.5.1. Resistencia hidráulica radicular

La determinación de la resistencia hidráulica de las raíces se realizó a partir de tres muestreos. Las medidas se realizaron con una bomba tipo Schölander, modelo Soilmoisture (Santa Barbara, California, USA). Las determinaciones se hicieron en raíces obtenidas in situ utilizando la metodología descrita por Ramos y Kaufman (1979). Se obtuvieron fragmentos de raíz, limpiándolas cuidadosamente para no romper las más finas. Se sumergió la raíz en agua dentro de un recipiente plástico flexible y se colocó dentro de la bomba de presión. Se conectó un tubo de 1 mm de diámetro a la sección de la raíz para recoger el exudado obtenido al aplicar la presión en la cámara de presión antes referida y medir la cantidad que fluye por unidad de tiempo. La presión dentro de la cámara se mantuvo constante (0,5 MPa). El flujo del agua se obtiene a partir de:

$$\text{Flujo} = J = (h * (\pi * r^2)) / t = \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Para la determinación de la longitud de la raíz se utiliza el mismo procedimiento que en el apartado 3 y se calcula la resistencia hidráulica a partir de:

$$R_h = (P * L) / J$$

$$R_h = \text{resistencia hidráulica (MPa} * \text{s} * \text{cm}^{-2}\text{)}$$

$$P = \text{presión aplicada (MPa)} \quad L = \text{Longitud de raíz (cm)} \quad J = \text{Flujo (cm}^3 * \text{cm}^{-2} * \text{s}^{-1}\text{)}$$

#### 5.3.5.2. Respiración radicular

Para medir la respiración radicular se tomaron 0.1 g de peso fresco de fragmentos de raíz, lo más homogéneas posibles en morfología y situación en el sustrato de cultivo. Las raíces se colocaron en una cubeta con una solución tampón. La cubeta tiene una doble cámara por donde circula el agua procedente de un recipiente provisto de una resistencia y un termostato para el control de la temperatura. Se tomaron dos muestras por tratamiento. La temperatura a la que se realizaba la medida fue de 25°C. Por otra parte se determinó la respiración en cuatro tratamientos de frecuencia elevada, dos con aplicación de oxigenación y dos sin, dos con perlita B6 y dos con perlita B12. Las raíces correspondientes a estos tratamientos, con dos repeticiones, se sometieron a diferentes temperaturas (5, 15, 25 y 35 °C) para medir la tasa

respiratoria a diferentes temperaturas. Una vez separadas las raíces de la planta, se conservaban unos minutos en agua a la temperatura correspondiente a la medida. Las raíces se introducían en la cubeta con 4 ml de una solución acuosa tampón de MES 20 mM (ácido 2-(N-Morpholino) etanosulfónico) y  $\text{CaCl}_2$  0.2 mM a pH=6.2, agitada por un imán (Lambers, 1985; Poorter et al., 1991; Walker y Leegood, 1993). La variación de la concentración de oxígeno en la cubeta se registraba cada minuto durante 8-10 minutos mediante un electrodo de oxígeno tipo Clark (Rank Brothers, Cambridge, Inglaterra). Una vez acabada la medida, se extraían las raíces, se secaban con papel de filtro y se pesaban en fresco; a continuación se pasaban a la estufa para obtener su peso seco. La tasa de respiración es la pendiente de la recta de disminución de la concentración de oxígeno en el tiempo. Los resultados se expresan respecto a peso seco. El aparato de medida utilizado fue un Tectron modelo 3000543 de la firma P Selecta.

### **5.3.6. Consumo de agua**

Para el cálculo de los parámetros del uso y eficiencia del agua se midieron las aportaciones y la lixiviación, de lo que se dedujo el consumo de agua por la planta, considerando despreciable la evaporación debido a que el cultivo se realizó en sacos y por tanto con una mínima superficie expuesta a la demanda evaporativa ambiental, y se calculó la relación entre el déficit de evapotranspiración y el déficit de producción, así como la eficiencia en el uso del agua.

#### **5.3.6.1. Balance hídrico**

Las aportaciones de solución nutritiva al cultivo se midieron mediante un gotero complementario en cada unidad muestral (2 sacos de cultivo, cuatro plantas), acumulando la solución en un recipiente para así medir el volumen diario de solución nutritiva aportada. Por otra parte, se recogió la solución lixiviada de una unidad (saco de cultivo) de cada tratamiento, a partir de la cual se calculó la lixiviación por cada planta. A partir de estos datos se calculó el consumo de agua diario por planta y la correspondiente tasa de drenaje, que se mantuvo entre un 20 y un 30% del volumen aplicado, ajustando periódicamente la dosis aplicada en cada tratamiento.

El consumo de agua se consideró como transpiración de la planta ya que la evaporación en las condiciones de cultivo utilizadas se considera despreciable como antes se ha indicado y la variación de humedad de cada saco se pueden considerar también despreciable, dado que se consideraron periodos de 7 días para el cómputo del balance hídrico y el régimen de riego es de alta frecuencia, como es propio en el manejo del riego en los cultivos sin suelo.

#### **5.3.6.2. Relación entre el déficit de evapotranspiración y el déficit de producción**

El cálculo de la relación entre el déficit de evapotranspiración y el déficit de producción se realizó a partir de los consumos de agua o transpiraciones acumuladas hasta el final de cultivo por cada tratamiento. Se calculó considerando la cosecha como peso fresco de los frutos

cosechados. Se identificó el valor máximo de transpiración que correspondía a uno de los tratamientos experimentales y por otra el valor máximo de rendimiento. Para el resto de tratamientos se calcularon los respectivos déficits de transpiración y de rendimiento de cosecha:

$$(1 - ET_i/ET_m) \qquad (1 - Y_i/Y_m)$$

ET<sub>i</sub>: transpiración (L.m<sup>-2</sup>)      ET<sub>m</sub>: transpiración máxima (L.m<sup>-2</sup>)  
 Y<sub>i</sub>: cosecha de frutos (g.m<sup>-2</sup>)      Y<sub>m</sub>: cosecha máxima de frutos (g.m<sup>-2</sup>)

### 5.3.6.3. Eficiencia en el uso del agua

La eficiencia en el uso del agua se expresa como la relación entre el peso (fresco o seco) de los frutos por unidad de agua evapotranspirada. En el experimento se expresa como peso fresco de los frutos cosechados por unidad de volumen de agua transpirada.

## 5.4. Resultados y discusión

Los resultados se presentan distribuidos en tres partes, correspondientes a los tres grupos de parámetros medidos (Tabla 2.2).

### 5.4.1. Concentración de oxígeno en la solución nutritiva

#### **Parte III.1.**

El control de la concentración de oxígeno en la salida de los goteros muestra valores medios en el tratamiento sin oxifertirrigación (6,88 ppm) cercanos a los de saturación para una temperatura de 25-30°C, común en el período de cultivo y casi el doble (13,28 ppm) en la solución oxifertirrigada (Tabla 5.6).

**Tabla 5.6. Concentración media de oxígeno en la solución de riego a la salida de los goteros, con y sin aplicación de oxígeno complementario (n=4; error estándar entre paréntesis)**

|                   | ppm (media)   |
|-------------------|---------------|
| O <sub>2</sub>    | 13,28 (±0,35) |
| no O <sub>2</sub> | 6,88 (±0,25)  |

La concentración de oxígeno a la salida del gotero disminuye de manera más o menos notable según los tratamientos al llegar la solución al sustrato, llegando a alcanzar valores muy bajos. Los resultados de las medidas de concentración de oxígeno de la solución del sustrato en la zona media del saco muestran concentraciones significativamente menores en los tratamientos sin oxifertirrigación, frecuencia baja de riego y sustrato de partícula gruesa B12 (Tabla 5.7); también se puede ver la evolución a lo largo del ciclo desde valores de 3,52 ppm el 12 de junio hasta los últimos días de septiembre (v.g. 4,94 ppm el 18 de septiembre), significativamente mayores a los de junio y julio. Este descenso probablemente esté relacionado con la disipación del oxígeno de la solución, la adsorción del mismo en la superficie de las partículas del sustrato, y la respiración de las raíces (Rivière et al., 1993). La mayor frecuencia de riego comporta una mayor concentración de oxígeno disuelto, por una mayor frecuencia de las secuencias riego-drenaje, que favorece la penetración de aire en el espacio poroso del sustrato, tal como sugiere Morard (1995), o por el contacto gota-aire breve pero de relación superficie-volumen favorable a la redisolución del oxígeno cuando los riegos son más frecuentes (Urban, 1997). La mayor concentración de oxígeno en el sustrato B6, con abundancia de partículas de pequeño tamaño, estaría relacionada con la mayor superficie específica de este sustrato de partícula menor que el B12, y que favorecería una mayor adsorción del oxígeno en la superficie de los gránulos de perlita expandida (Burés et al., 1997).

**Tabla 5.7. Concentración media de oxígeno en la solución del sustrato medido a media altura del saco de cultivo en los diferentes tratamientos experimentales (con y sin oxifertirrigación, frecuencia alta y baja de riego, sustrato de grado fino y de grado grueso) y en 5 días del período de cultivo.**

|                   |         | [O <sub>2</sub> ] ppm |     |
|-------------------|---------|-----------------------|-----|
| <b>oxígeno</b>    | si      | 4.53 a                |     |
|                   | no      | 4.04 b                | *** |
| <b>frecuencia</b> | alta    | 4.45 a                |     |
|                   | baja    | 4.11 b                | *   |
| <b>sustrato</b>   | B6      | 4.66 a                |     |
|                   | B12     | 3.88 b                | *** |
| <b>día</b>        | 12 jun  | 3,52 b                |     |
|                   | 20 jul  | 3,61 b                |     |
|                   | 4 ago   | 4.49 a                |     |
|                   | 2 sept  | 4,59 a                |     |
|                   | 18 sept | 4.94 a                | *** |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

Los resultados de las medidas de concentración de oxígeno en la zona media del saco en los diferentes tratamientos muestran una concentración significativamente menor que en los demás casos en el tratamiento no oxifertirrigado y siendo el sustrato B12, de granulometría gruesa. También la frecuencia baja de riego en el sustrato B12 da lugar a una menor concentración de

oxígeno (Tabla 5.8), en ambos casos la suma de las condiciones menos favorables de ausencia de oxígeno adicional, aplicado mediante oxifertirrigación y frecuencia de riego menor con un sustrato con menor abundancia de microporos (caso de la perlita B12) (de Pascale, 2001) conllevan un contenido significativamente menor de oxígeno. En cuanto a las medidas de la concentración de oxígeno a diferentes horas y en diferentes momentos se observa una concentración algo mayor en las medidas de final de verano, con tendencia a ser algo menores en las horas con menor temperatura ambiente pero sin mostrar diferencias estadísticamente significativas, posiblemente por unas condiciones ambientales menos extremas, habituales en esta época. En el mediodía del 20 de julio, en plena canícula anual, la concentración de oxígeno sí que llega a ser significativamente menor que a primeras horas de la mañana del mismo día, con unas concentraciones por debajo de 3 ppm, cercanas a las consideradas como favorecedoras de hipoxia (Rivière, 1993).

**Tabla 5.8. Concentraciones medias de oxígeno (n=4) en la solución del sustrato a media altura del saco de cultivo en dos días de muestreo.**

|                   |            | [O <sub>2</sub> ] ppm | 20 julio | [O <sub>2</sub> ] ppm | 18 sept |
|-------------------|------------|-----------------------|----------|-----------------------|---------|
| <b>oxígeno</b>    | si         | 3,72 a                |          | 5,04 a                |         |
|                   | no         | 3,05 b                | *        | 3,98 b                | *       |
| <b>frecuencia</b> | alta       | 3,62 a                |          | 5,17 a                |         |
|                   | baja       | 3,14 a                | NS       | 3,84 b                | **      |
| <b>sustrato</b>   | B6         | 3,98 a                |          | 5,2 a                 |         |
|                   | B12        | 2,78 b                | ***      | 3,81 b                | **      |
| <b>hora</b>       | 9.00       | 3,82 a                |          | 4,88 a                |         |
|                   | 11.00      | 3,34 ab               |          | 4,36 a                |         |
|                   | 14.00      | 2,98 b                | *        | 4,29 a                | NS      |
| <b>oxi*sust</b>   | No oxi*B6  | 4,01 a                |          | -                     |         |
|                   | Oxi*B6     | 3,96 a                |          | -                     |         |
|                   | Oxi B12    | 3,47 a                |          | -                     |         |
|                   | No oxi*B12 | 2,08 b                | **       | -                     |         |
| <b>frec*sust</b>  | Fb* B6     | 4,01 a                |          | -                     |         |
|                   | Fa*B6      | 3,95 a                |          | -                     |         |
|                   | Fa*B12     | 3,29 a                |          | -                     |         |
|                   | Fb*B12     | 2,27 b                | *        | -                     |         |
| <b>oxi*frec</b>   | Oxi*Fa     | -                     |          | 4,88 a                |         |
|                   | Oxi *Fb    | -                     |          | 5,2 a                 |         |
|                   | No Oxi*Fa  | -                     |          | 5,47 a                |         |
|                   | No oxi* Fb | -                     |          | 2,48 b                | ***     |

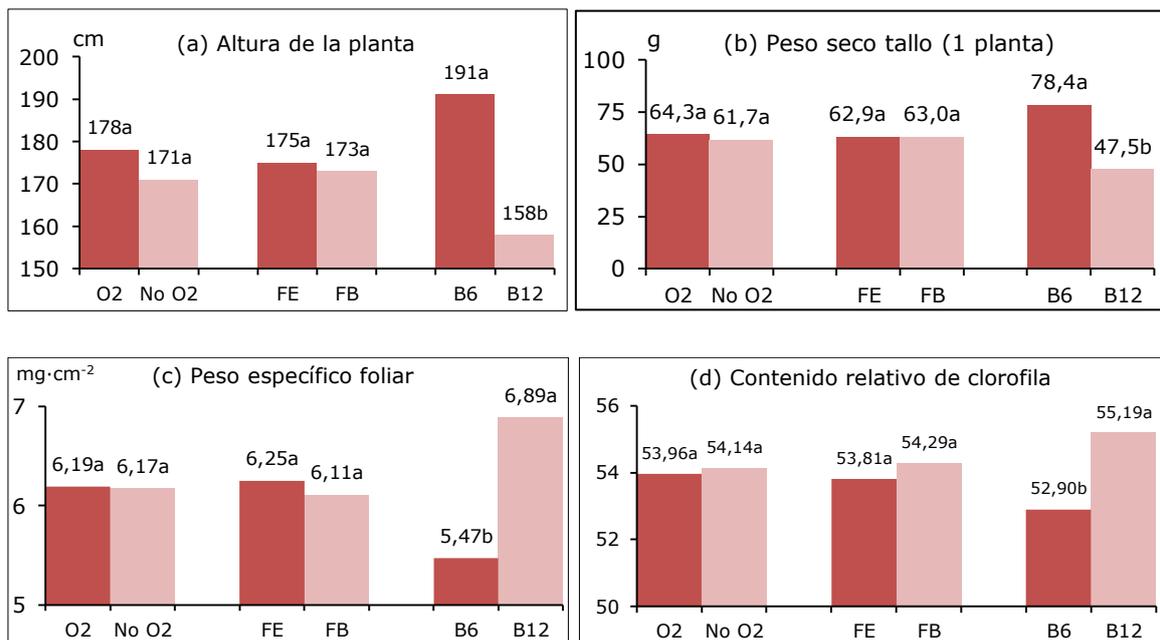
Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo,. \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

## 5.4.2. Biometría y rendimiento agronómico

### 5.4.2.1. Parámetros biométricos

Los resultados de las mediciones de parámetros biométricos se muestran en las Figuras 5.4 a, b, c y d. La evaluación de los efectos de los distintos tratamientos sobre los parámetros biométricos medidos sólo muestra diferencias significativas entre los dos sustratos empleados, siendo mayor la altura de la planta (Figura 5.4a) y el peso seco del tallo (Figura 5.4b) de las plantas cultivadas en perlita B6; los resultados muestran que las hojas de las plantas cultivadas en perlita B12 presentaron un peso específico foliar (Figura 5.4c) y un contenido relativo de clorofila (Figura 5.4d) significativamente mayores que las cultivadas en perlita B6.

Por otra parte, la altura de la planta no muestra diferencias significativas entre los tratamientos con y sin oxifertirrigación (Figura 5.4a). La oxifertirrigación no promueve diferencias significativas en comparación con el tratamiento sin oxifertirrigación para el resto de parámetros estudiados.



**Figura 5.5. Altura de planta, peso seco de tallo, peso específico foliar y contenido relativo de clorofila (tratamientos de oxifertirrigación o no, frecuencia de riego elevada o baja y dos tipos de sustrato, B6 y B12).**

### 5.4.2.2. Rendimiento agronómico

A continuación se comentan los resultados relativos a los siguientes parámetros relacionados con la cosecha de frutos: producción de peso fresco de los frutos referido a superficie cultivada y número de frutos por planta, en diferentes periodos y de forma acumulada.

**Producción (peso fresco de los frutos).** Se obtuvo una mayor producción (peso fresco de los frutos) en las plantas cultivadas con el sustrato de grado fino, B6, desde el principio, para cada uno de los cuatro meses del período de recolección (julio – octubre). También se registró una mayor producción en el tratamiento de oxifertirrigación, pero sólo se detectan diferencias estadísticamente significativas en la segunda mitad del periodo productivo (Tabla 5.6). La frecuencia de riego no dio lugar a diferencias significativas en producción. Se detecta una interacción estadísticamente débil entre oxigenación y frecuencia que no impide la afirmación de significación acerca de la fuente de variación relativa a la oxigenación (Tabla 5.9); la fuente de variación relativa a la oxigenación destaca por dar lugar a diferencias mayores si se compara con los efectos de las otras dos fuentes de variación – frecuencia de riego y tipo de sustrato-. Estas diferencias productivas en peso de frutos se mantienen al valorar globalmente todo el periodo de recolección (Figura 5.3) y se detectan ya desde el mes de agosto en los valores de producción acumulada (Tabla 5.10). El aumento de peso promovido por la perlita B6 o por la oxifertirrigación será interesante para el productor siempre que se mantenga el interés del consumidor, dependiendo de los efectos en los parámetros de calidad del fruto.

**Tabla 5.9. Peso fresco/m<sup>2</sup> de frutos en los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato y la combinación de oxigenación y frecuencia.**

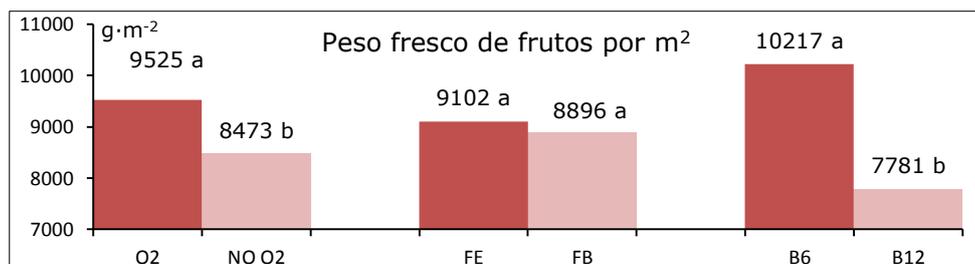
| Efectos            | Tratamiento                       | Pf frutos (Jul)<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | Pf frutos (Ago)<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | Pf frutos (Sept)<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | Pf frutos (Oct)<br>(g·m <sup>-2</sup> ) |
|--------------------|-----------------------------------|---|---|--|---|
| <b>Oxígeno</b>     | O <sub>2</sub>                    | 2221,9 a NS                             | 1831,3 a NS                             | 2894,9 a *                               | 2576,9 a *                              |
|                    | No O <sub>2</sub>                 | 2049,6 a                                | 1683,6 a                                | 2541,3 b                                 | 2198,4 b                                |
| <b>Frecuencia</b>  | Elevada                           | 2105,7 a NS                             | 1758,5 a NS                             | 2744,2 a NS                              | 2493,6 a NS                             |
|                    | Baja                              | 2165,8 a                                | 1756,4 a                                | 2692,1 a                                 | 2281,7 a                                |
| <b>Sustrato</b>    | B <sub>6</sub>                    | 2482,9 a ***                            | 1908,7 a *                              | 2896,6 a *                               | 2928,7 a ***                            |
|                    | B <sub>12</sub>                   | 1788,5 b                                | 1606,2 b                                | 2539,7 b                                 | 1846,6 b                                |
| <b>oxi*freq</b>    | O <sub>2</sub> *F <sub>E</sub>    | - NS                                    | - NS                                    | - NS                                     | 2858,7 a *                              |
|                    | O <sub>2</sub> *F <sub>B</sub>    | -                                       | -                                       | -  | 2295,0 b                                |
|                    | No O <sub>2</sub> *F <sub>E</sub> | -                                       | -                                       | -  | 2128,5 b                                |
|                    | No O <sub>2</sub> *F <sub>B</sub> | -                                       | -                                       | -  | 2268,4 b                                |
| <b>Interacción</b> | No O <sub>2</sub> *F <sub>B</sub> | -                                       | -                                       | -  | 2268,4 b                                |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

**Tabla 5.10. Peso fresco de frutos acumulado por unidad de superficie ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) en los meses de agosto, septiembre y octubre y peso fresco medio de fruto ( $\text{P}_{\text{f}_m}$ ), acumulado al final del cultivo, para los tratamientos de oxigenación ( $\text{O}_2$ , No  $\text{O}_2$ ), frecuencia de riego (Alta, Baja) y tipo de sustrato (perlita B6 y perlita B12).**

|                   |                 | Pf frutos Ago<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |  | Pf frutos Sept.<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |  | Pf frutos Oct<br>( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) |  | Pf <sub>m</sub> fruto<br>(g) |    |
|-------------------|-----------------|---|--|---|--|---|--|------------------------------|----|
| <b>Oxígeno</b>    | $\text{O}_2$    | 4053,4 a *  |  | 6948,1 a **   |  | 9525,2 a **                                       |  | 139,26 a                     | NS |
|                   | No $\text{O}_2$ | 3733,2 b  |  | 6274,4 b  |  | 8472,9 b  |  | 142,87 a                     |    |
| <b>Frecuencia</b> | Alta            | 3864,3 a  |  | 6608,3 a  |  | 9102,1 a  |  | 140,41 a                     | NS |
|                   | Baja            | 3922,3 a NS                                       |  | 6614,3 a NS   |  | 8895,9 a NS                                       |  | 141,72 a                     |    |
| <b>Sustrato</b>   | B <sub>6</sub>  | 4391,9 a ***                                      |  | 7288,2 a ***  |  | 10217,1 a ***                                     |  | 141,82 a                     | NS |
|                   | B <sub>12</sub> | 3394,7 b  |  | 5934,4 b  |  | 7781,0 b  |  | 140,32 a                     |    |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \* $P\leq 0.05$ , \*\* $P\leq 0.01$  \*\*\* $P\leq 0.001$



**Figura 5.6. Peso fresco de frutos por unidad de superficie cultivada ( $\text{g}/\text{m}^2$ ), recolectados en todo el periodo de cosecha, para los tratamientos de oxifertirrigación o no, frecuencia de riego elevada o baja y tipo de sustrato, B6 y B12.**



**Figura 5.7. Vista general de la plantación a la mitad del período de cultivo y en una fase avanzada del mismo**

**Número de frutos.** Respecto al número de frutos por unidad de superficie (Tabla 5.11) no se detectan diferencias estadísticas para ninguno de los factores estudiados, ni sus combinaciones en los meses de agosto y septiembre, pero en el mes de julio y en el de octubre la oxifertirrigación y la perlita B6 dan lugar a un número de frutos significativamente mayor al obtenido sin oxifertirrigación y empleando el sustrato B12 respectivamente. También se aprecia una interacción estadísticamente débil, en los valores del mes de octubre, entre oxigenación y frecuencia, y sustrato y frecuencia; interacción que no impide la diferenciación estadística entre los dos tratamientos referidos a la oxigenación y entre los dos referidos a los sustratos.

**Tabla 5.11. Número de frutos por unidad de superficie recolectados en los meses de agosto, septiembre y octubre para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato y las combinaciones de los dos sustratos con los tratamientos de oxigenación y frecuencia.**

| Efectos            | Tratamiento                       | Nº frutos Jul<br>(fr·m <sup>-2</sup> ) | Nº frutos Ago<br>(fr·m <sup>-2</sup> ) | Nº frutos Sept.<br>(fr·m <sup>-2</sup> ) | Nº frutos Oct.<br>(fr·m <sup>-2</sup> ) |           |
|--------------------|-----------------------------------|--|--|--|---|-----------|
| <b>Oxígeno</b>     | O <sub>2</sub>                    | 17,72 a *                              | 12,99 a NS                             | 21,78 a NS                               | 16,16 a *                               |           |
|                    | No O <sub>2</sub>                 | 15,13 b                                | 11,61 a                                | 19,51 a                                  | 13,62 b                                 |           |
| <b>Frecuencia</b>  | Elevada                           | 15,94 a NS                             | 12,32 a NS                             | 21,21 a NS                               | 15,85 a NS                              |           |
|                    | Baja                              | 16,92 a                                | 12,28 a                                | 20,09 a                                  | 13,93 a                                 |           |
| <b>Sustrato</b>    | B <sub>6</sub>                    | 20,58 a ***                            | 12,99 a NS                             | 21,34 a NS                               | 17,59 a ***                             |           |
|                    | B <sub>12</sub>                   | 12,28 b                                | 11,61 a                                | 19,96 a                                  | 12,19 b                                 |           |
| <b>oxi*freq</b>    | O <sub>2</sub> *F <sub>E</sub>    | -                                      | NS                                     | -  | NS                                      | 18,21 a * |
|                    | O <sub>2</sub> *F <sub>B</sub>    | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 14,11 b   |
|                    | No O <sub>2</sub> *F <sub>E</sub> | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 13,48 b   |
|                    | No O <sub>2</sub> *F <sub>B</sub> | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 13,75 b   |
| <b>freq*subs</b>   | F <sub>E</sub> *B <sub>6</sub>    | -                                      | NS                                     | -  | NS                                      | 19,64 a * |
|                    | F <sub>B</sub> *B <sub>6</sub>    | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 15,54 b   |
|                    | F <sub>E</sub> *B <sub>12</sub>   | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 12,05 b   |
| <b>Interacción</b> | F <sub>B</sub> *B <sub>12</sub>   | -                                      | -                                      | -  | -                                       | 12,32 b   |

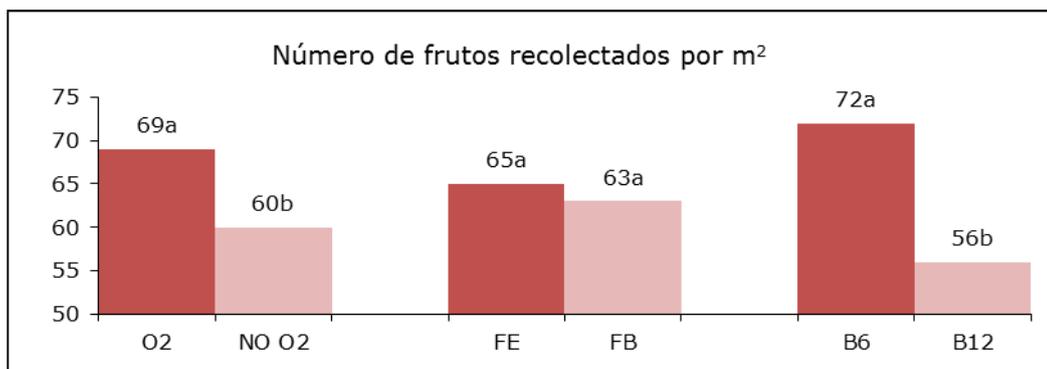
Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

En cuanto al número de frutos acumulado por unidad de superficie, la perlita B6 da lugar a mejores resultados en todos los controles realizados y la oxifertirrigación da lugar a diferencias significativas, crecientes, desde septiembre (Tabla 5.12). No se detectan interacciones estadísticamente significativas. La valoración global de medias para todo el periodo y cada uno de los tratamientos refleja las diferencias significativas entre los dos sustratos y la aplicación o no de oxifertirrigación (Figura 5.6).

**Tabla 5.12. Número de frutos por unidad de superficie acumulado en los meses de agosto, septiembre y octubre para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato.**

| Efectos           | Tratamiento       | Nº frutos ago<br>(nº·m <sup>-2</sup> ) |     | Nº frutos sept<br>(nº·m <sup>-2</sup> ) |    | Nº frutos oct<br>(nº·m <sup>-2</sup> ) |     |
|-------------------|-------------------|--|-----|---|----|--|-----|
| <b>Oxígeno</b>    | O <sub>2</sub>    | 30,71 a                                |     | 52,50 a                                 |    | 68,66 a                                |     |
|                   | No O <sub>2</sub> | 26,74 a                                | NS  | 46,29 b                                 | *  | 59,87 b                                | **  |
| <b>Frecuencia</b> | Alta              | 28,26 a                                |     | 49,51 a                                 |    | 65,31 a                                |     |
|                   | Baja              | 29,2 a                                 | NS  | 49,29 a                                 | NS | 63,21 a                                | NS  |
| <b>Sustrato</b>   | B <sub>6</sub>    | 33,57 a                                |     | 54,91 a                                 |    | 72,50 a                                |     |
|                   | B <sub>12</sub>   | 23,88 b                                | *** | 43,88 b                                 | ** | 56,03 b                                | *** |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01 \*\*\*P≤0.001

**Figura 5.8. Número de frutos/m<sup>2</sup> recolectados en todo el periodo de cosecha para los tratamientos de oxigenación complementaria o no, frecuencia de riego baja o elevada y en los dos sustratos de la experiencia, B6 y B12.**

### 5.4.3. Calidad

Los resultados relativos a los parámetros de precocidad se presentan en la Tabla 5.10 y la Figura 5.5. Las Figuras 5.6 a, b, c, d muestran los resultados relativos a los parámetros: diámetro de los frutos, longitud de los frutos, número de frutos de categoría GG e índice de necrosis apical, respectivamente.

**Precocidad.** El número de frutos de más de 1 cm de diámetro el día del control (6 de junio) es significativamente mayor en la perlita B12 que en la B6, mientras que para frecuencia y oxigenación no se observan diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 5.13). El efecto del sustrato sobre la mayor rapidez de cuajado de frutos puede relacionarse con un estrés

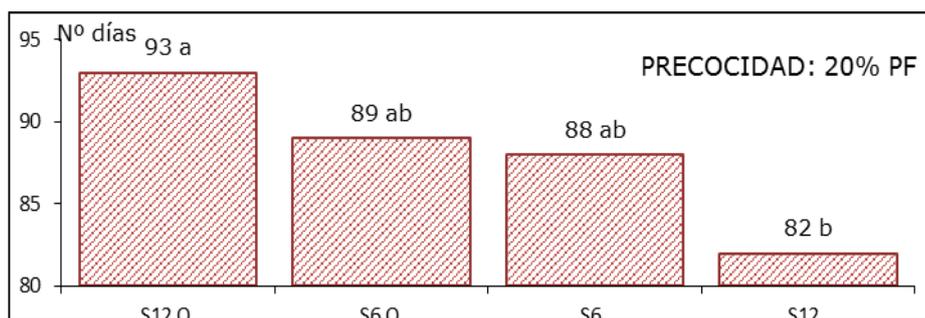
hídrico moderado que promueve una activación del metabolismo celular, que incide en la actividad fisiológica de la planta y acelera la producción (Villalobos, 2009), situación que puede darse en un sustrato de poro grueso, con una menor retención de agua que uno de grano fino y más aún en un ciclo de verano en el que la demanda evaporativa ambiental suele ser elevada en nuestras condiciones climáticas.

El número de días necesarios para alcanzar el 20% del peso fresco de los frutos recolectados es significativamente mayor en el tratamiento con oxifertirrigación que en el que no se oxifertirriga (Tabla 5.10, Figura 5.7).

**Tabla 5.13. Número de frutos de más de 1 cm de longitud por unidad de superficie medido el día 06/06 (Precocidad) y número de días necesarios para alcanzar el 20% del peso fresco total (Precocidad<sub>20%</sub>).**

| Efectos           | Tratamiento       | Precocidad <sub>6/06</sub> fr·m <sup>-2</sup> |     | Precocidad <sub>20%</sub> n° días |    |
|-------------------|-------------------|---|-----|-----------------------------------|----|
| <b>Oxígeno</b>    | O <sub>2</sub>    | 6,74 a  |     | 91,12 a                           |    |
|                   | No O <sub>2</sub> | 7,32 a  | NS  | 85,50 b                           | ** |
| <b>Frecuencia</b> | Elevada           | 7,05 a  |     | 89,12 a                           |    |
|                   | Baja              | 7,01 a  | NS  | 87,50 a                           | NS |
| <b>Sustrato</b>   | B <sub>12</sub>   | 8,62 a  |     | 87,69 a                           |    |
|                   | B <sub>6</sub>    | 5,45 b  | *** | 88,94 a                           | NS |

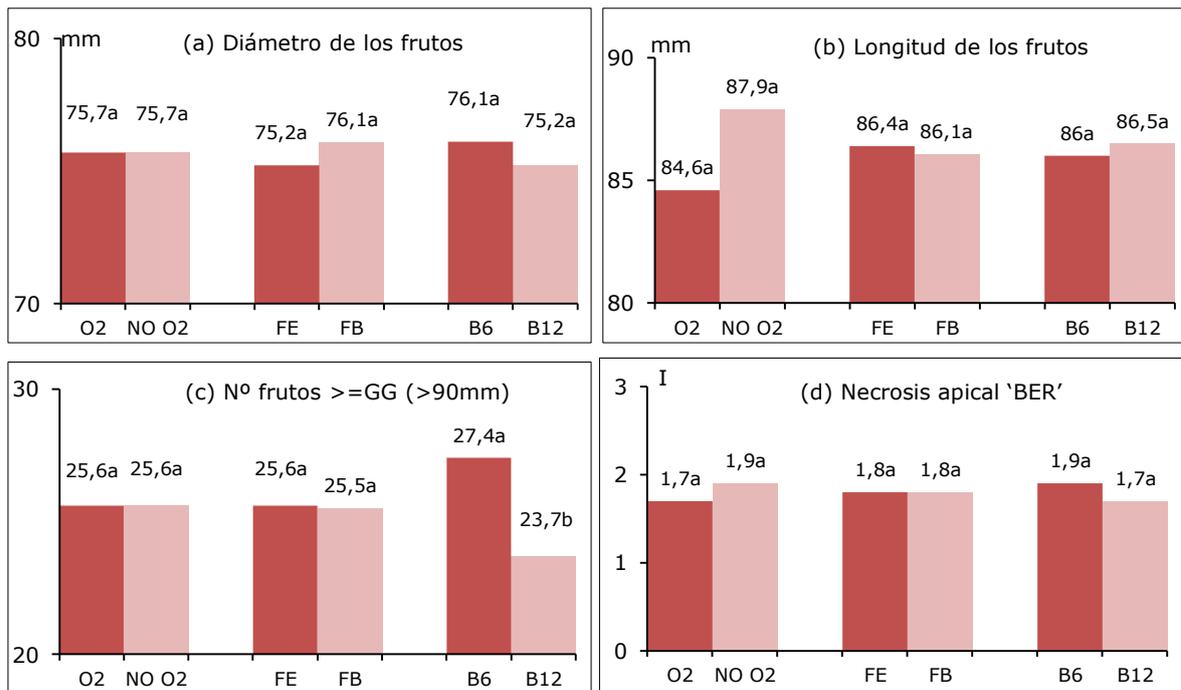
Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01 \*\*\*P≤0.001



**Figura 5.9. Número de días para alcanzar el 20% de la producción final para los tratamientos de oxigenación complementaria o no en los dos sustratos de la experiencia, B6 y B12.**

**Diámetro y longitud.** El diámetro y la longitud de los frutos no se vieron afectados de forma significativa por ninguno de los tres tratamientos estudiados, aunque la perlita de partícula fina (B6) sí mostró un número superior de frutos de calibre superior (GG) (Figura 5.8 c). Esta mayor

presencia de frutos de calibre superior es justificable por las características físicas del sustrato B6, que le confieren una menor capacidad de aireación y una mayor disponibilidad de agua en el sustrato que la de la perlita B12 (Burés et al., 1997) por lo que posiblemente la turgencia celular será mayor y ello puede repercutir en una mayor dimensión del fruto.



**Figura 5.10.** (a) Diámetro de los frutos (mm), (b) longitud de los frutos (mm), (c) número de frutos de categoría GG (>90 mm) y (d) índice de necrosis apical ('Blossom end rot', BER) referido al tratamiento con menos número relativo de frutos con BER, para los tratamientos de oxigenación, frecuencia y sustrato.

**Necrosis apical o 'blossom end rot' (BER).** El análisis estadístico relativo al índice que evalúa la incidencia de necrosis apical (BER) en los frutos no muestra diferencias significativas entre tratamientos (Figura 5.8 d); la observación de las medias sugiere una tendencia a una menor incidencia de BER cuando se emplea conjuntamente sustrato B12 y oxifertirrigación; este comportamiento concordaría con la mayor captación de calcio (Tablas 3.10, 3.11, 4.3) que se ha referido cuando el medio radicular está bien aireado (Bar-Tal, 2001) y por ende una menor incidencia de BER en las mencionadas condiciones, lo cual da lugar a mejores rendimientos comerciales (Rubio, 2009).

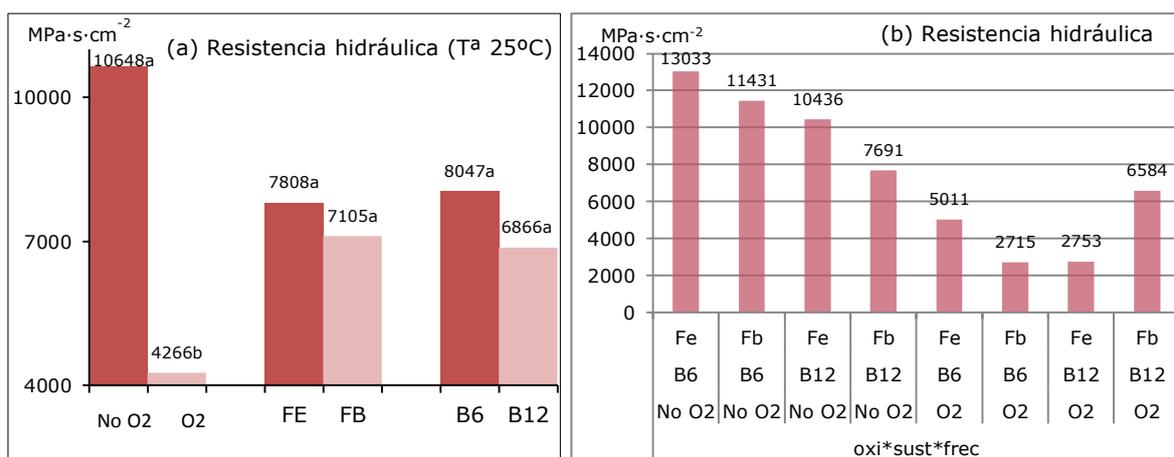
#### 5.4.4. Parámetros fisiológicos radiculares

##### Parte III.2.

##### 5.4.4.1. Resistencia hidráulica radicular

La media de la resistencia hidráulica de las raíces de las plantas oxifertirrigadas es estadísticamente mucho menor que la de las raíces de plantas no oxifertirrigadas, mientras que para las otras fuentes de variación no se detectan diferencias significativas (Figura 5.9). Estos resultados coinciden con los obtenidos empleando diferentes sustratos por Marfà y Orozco (1994). Se detecta una interacción estadísticamente débil pero significativa entre los factores oxigenación y tipo de sustrato, pero que no afecta a la diferenciación estadística relativa a los tratamientos de oxigenación; de forma que independientemente del tipo de sustrato empleado, la resistencia hidráulica de la raíz es menor en las plantas que han sido oxifertirrigadas que en las que no (Tabla 5.11).

La resistencia hidráulica de las raíces no oxifertirrigadas de plantas cultivadas en perlita B6 es significativamente mayor que la de las no oxifertirrigadas cultivadas en perlita B12. En la triple combinación de tratamientos también aparece una interacción significativa débil entre ellos y se mantiene el efecto principal de la oxigenación (Tabla 5.14, Figura 5.9b). En los tratamientos sin oxifertirrigación las raíces cultivadas en perlita B6 muestran mayor resistencia hidráulica que las cultivadas en perlita B12 y también en las regadas más frecuentemente en las que se acentúa esta tendencia; así, la resistencia hidráulica en el tratamiento sin oxigenación, B6 y frecuencia alta llega a ser significativamente mayor que en el tratamiento sin oxigenación, B12 y frecuencia baja.



**Figura 5.11. Resistencia hidráulica (a 25°C) de raíces escindidas al final de cultivo: con oxifertirrigación (O2) o sin (No O2), frecuencia elevada (FE) o baja (FB) y sustrato de cultivo perlita B6 o B12 (a) y las combinaciones triples de los 3 tratamientos (b) (n=4).**

**Tabla 5.14. Resistencia hidráulica (a 25°C) de raíces escindidas al final de cultivo: con oxifertirrigación (O2) o sin (No O2), frecuencia elevada (FE) o baja (FB) y sustrato de cultivo perlita B6 o B12, con las medias de las interacciones oxifertirrigación-sustrato y oxifertirrigación-sustrato-frecuencia (n=4).**

|               |              | <b>Rh<sub>25°C</sub> raíz (MPa·s·cm<sup>-2</sup>)</b> |    |     |
|---------------|--------------|---|----|-----|
| oxígeno       | O2           | 4266  | b  |     |
|               | no O2        | 10648   | a  | *** |
| frecuencia    | alta         | 7808  | a  |     |
|               | baja         | 7105  | a  | NS  |
| sustrato      | B6           | 8047  | a  |     |
|               | B12          | 6866  | a  | NS  |
| oxi * sust    | No O2*B6     | 12232   | a  |     |
|               | NoO2*B12     | 9064  | b  |     |
|               | O2*B6        | 3863  | c  |     |
|               | O2*B12       | 4669  | c  | *   |
| oxi*sust*frec | No O2*B6*Fe  | 13033   | a  |     |
|               | No O2*B6*Fb  | 11431   | ab |     |
|               | No O2*B12*Fe | 10436   | ab |     |
|               | No O2*B12*Fb | 7691  | bc |     |
|               | O2*B6*Fe     | 5011  | c  |     |
|               | O2*B6*Fb     | 2715  | c  |     |
|               | O2*B12*Fe    | 2753  | c  |     |
|               | O2*B12*Fb    | 6584  | bc | *   |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

Los resultados obtenidos sugieren que la mayor lignificación de las células corticales alrededor del cilindro vascular de las raíces en condiciones de menor disponibilidad de oxígeno (Yoshida et al., 1998) puede implicar una reducción en la absorción de agua por el aumento de la resistencia hidráulica de las raíces. Las resistencias del medio de cultivo y de la interfase sustrato-raíz no son importantes en sustrato muy hidratado, pero pasan a serlo en condiciones de menor disponibilidad de agua (Passioura, 1980). Como norma general, la deshidratación del sustrato y en consecuencia la disminución de la conductividad hidráulica del sustrato da lugar a un incremento de la resistencia hidráulica de las raíces. La reducción del flujo absorbente como consecuencia de la suberificación rizodérmica se ha atribuido a condiciones de estrés hídrico (Ramos y Kaufman, 1979). Los resultados obtenidos en relación a la oxigenación o no de la solución nutritiva pueden estar relacionados con condiciones de estrés hídrico asociado a la no oxigenación de la solución nutritiva.

#### 5.4.4.2. Respiración radicular

La respiración de las raíces en los tratamientos con frecuencia alta de riego a una temperatura de 25°C es significativamente superior a la de los tratamientos con riegos de menor frecuencia (Figura 5.10). No aparecen diferencias significativas ni entre los dos sustratos ni entre los tratamientos de oxigenación en cuanto a la respiración radicular.



**Figura 5.12.** Respiración radicular (a 25°C) con o sin oxifertirrigación (O2), frecuencia alta (FE) o baja (FB) de riego y sustrato perlita B6 y B12.

Al analizar los resultados relativos a la respiración a diferentes temperaturas se observa que a 5°C la respiración radicular es superior significativamente a la que se da a temperaturas de 15, 25 y 35°C. Aunque la ANOVA de la interacción oxigenación-sustrato detecta significación, el test de Tukey no es capaz de detectar diferencias significativas entre tratamientos. Sí se puede ver que sin oxifertirrigación la respiración radicular es sensiblemente superior en perlita B6 y con oxifertirrigación la raíz respira más en perlita B12, aunque la diferencia no es estadísticamente significativa (Tabla 5.15).

**Tabla 5.15.** Respiración radicular de raíces escindidas de plantas a diferentes temperaturas y con los diferentes tratamientos de oxigenación, sustrato y frecuencia elevada.

|                      |      | respiración radicular                                       |       |
|----------------------|------|---|-------|
|                      |      | mmol O <sub>2</sub> * g <sub>psec</sub> * min <sup>-1</sup> |       |
| <b>T<sup>a</sup></b> | 5°C  | 1,378   | a     |
|                      | 15°C | 0,45  | b     |
|                      | 25°C | 0,228   | b     |
|                      | 35°C | 0,539   | b *** |
| <b>No O2</b>         | B6   | 0,836   | a     |
|                      | B12  | 0,517   | a     |
| <b>O2</b>            | B6   | 0,545   | a     |
|                      | B12  | 0,696   | a *   |

Separación de medias según el test de Tukey (n=4). NS = no significativo, \*P≤0.05, \*\*P≤0.01\*\*\*P≤0.001

### 5.4.5. Consumo de agua

#### Parte III.3

##### 5.4.5.1. Balance hídrico

Los consumos de agua de las plantas cultivadas en perlita B6 fueron superiores a los correspondientes a perlita B12 y también fue significativamente mayor el consumo de agua en las plantas del tratamiento con frecuencia elevada de riego respecto a las del de frecuencia baja; los consumos del tratamiento de oxifertirrigación respecto al de no oxigenación no llegaron a mostrar diferencias significativas (Figura 5.11). Los mayores consumos se pueden atribuir a una mayor disponibilidad de agua, tanto en el caso de la perlita B6 respecto a la B12 (Burés et al., 1997; Marfà et al., 1999) como en el tratamiento de frecuencia elevada de riego respecto al de frecuencia baja, en el que la alternancia entre estado húmedo y seco del sustrato es más rápida, de menor duración, aunque las tasas de lixiviación se mantuvieron entre un 20% y un 30 % en todos los casos (Tabla 5.16).

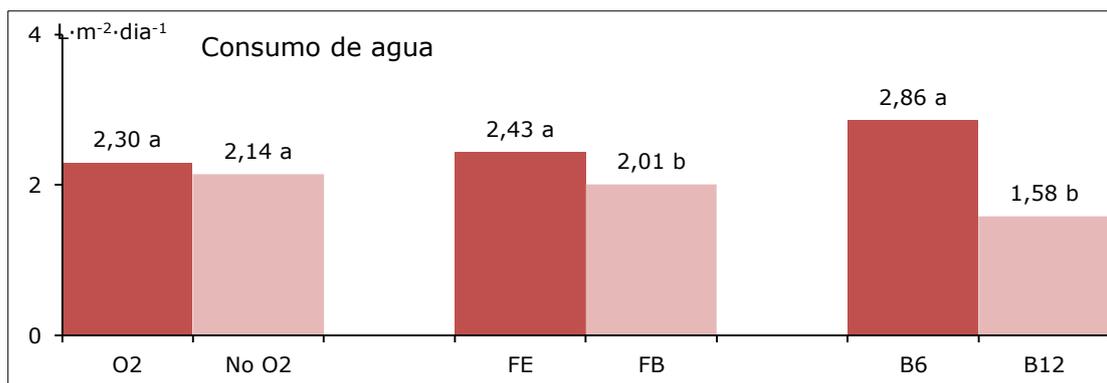


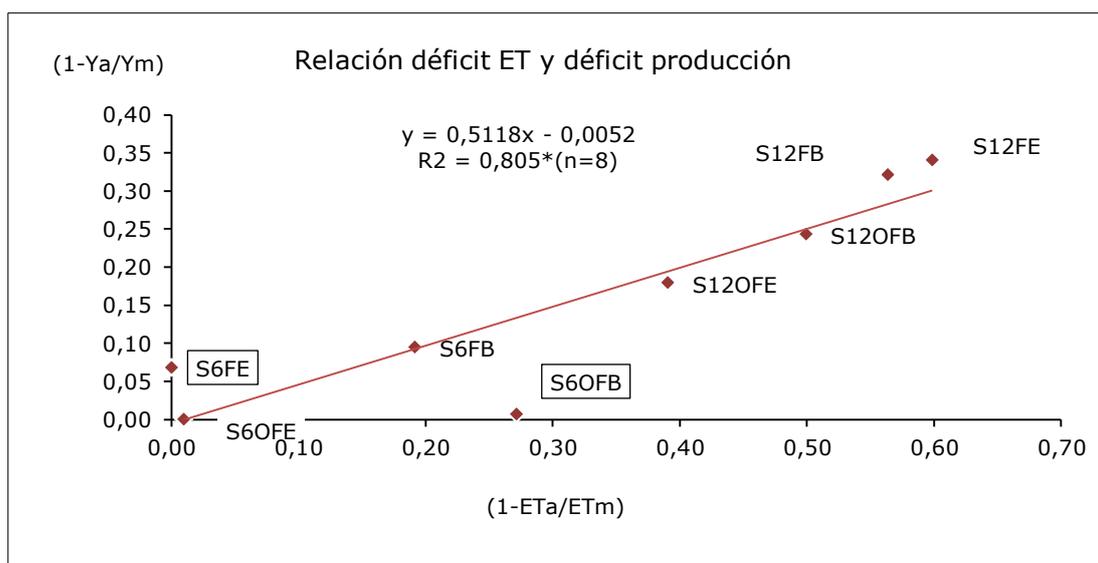
Figura 5.13. Consumo de agua ( $L \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ ) de las plantas en tratamiento de oxigenación o no de la solución (O2, No O2), frecuencia elevada o baja de riego (FE, FB) y perlita B6 o B12.

Tabla 5.16. Aportación, consumo, lixiviación y tasa de lixiviación medias en el periodo de cultivo.

|                                  | O2    |       |          |           | NoO2     |        |       |        |       |
|----------------------------------|-------|-------|----------|-----------|----------|--------|-------|--------|-------|
|                                  | FE    |       | FB       |           | FE       |        | FB    |        |       |
| Tratamiento                      | S12   | O2 FE | S6 O2 FE | S12 O2 FB | S6 O2 FB | S12 FE | S6 FE | S12 FB | S6 FB |
| Aportación ( $L \cdot m^{-2}$ )  | 420,5 | 630,6 | 335,6    | 496,1     | 285,4    | 652,6  | 305,3 | 538    |       |
| Lixiviación ( $L \cdot m^{-2}$ ) | 114,2 | 133,1 | 83,8     | 130,1     | 83,52    | 150    | 85,9  | 131,7  |       |
| Consumo ( $L \cdot m^{-2}$ )     | 306,2 | 497,6 | 251,8    | 366       | 201,8    | 502,6  | 219,4 | 406,3  |       |
| Tasa de lixiviación (%)          | 27,2  | 21,1  | 25,0     | 26,2      | 29,3     | 23,0   | 28,1  | 24,5   |       |

#### 5.4.5.2. Relación entre el déficit de evapotranspiración y el déficit de producción

La relación entre el déficit de producción relativa ( $1-Y_a/Y_m$ ) y el déficit de evapotranspiración relativa ( $1-ET_a/ET_m$ ) para los tratamientos de oxifertirrigación o no, perlita B6 y B12 y frecuencia de riego alta y baja (Figura 5.12) nos muestra que una restricción del 50% de agua haría disminuir el rendimiento cerca del 25% en todos los tratamientos excepto en el S6 O2 FB y S6 noO2 FE (S6 FE). En el tratamiento S6 O2 FB vemos cómo una restricción de hasta un 27% de agua mantiene la producción casi intacta; en cambio el tratamiento S6 noO2 FE (S6 FE) sufre una disminución de un 7% del rendimiento sin sufrir restricciones hídricas, cosa que sugiere que la disminución de producción puede estar relacionada con condiciones de hipoxia puntuales en algunos momentos del ciclo productivo, sobre todo si se han dado en los momentos más sensibles del periodo de desarrollo (Doorenbos y Kassam, 1979).

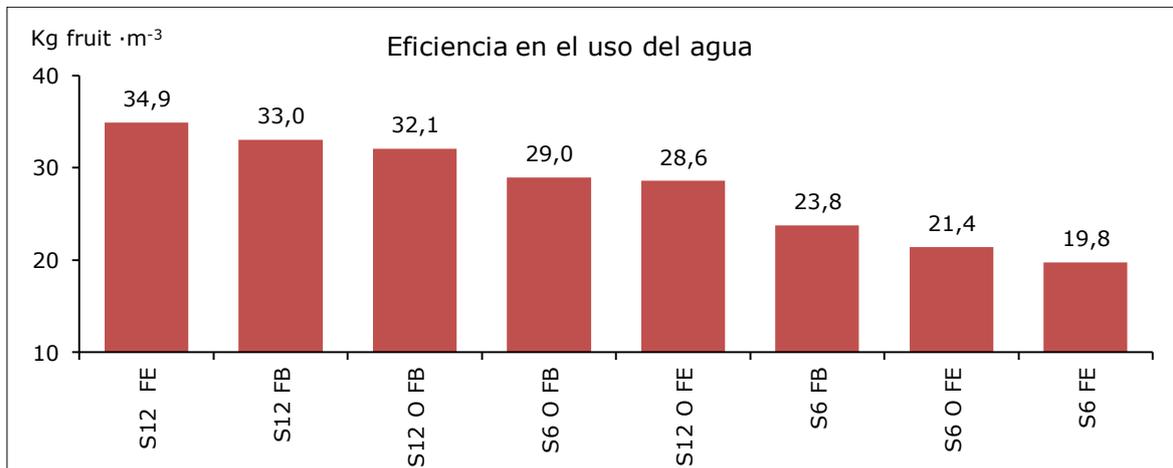


**Figura 5.14. Relación entre el déficit de evapotranspiración relativa ( $1-ET_a/ET_m$ ) y el déficit de producción relativa ( $1-Y_a/Y_m$ ) para los tratamientos de oxigenación complementaria o no, perlita B6 y B12 y frecuencia de riego alta y baja de pimiento cv. Vidi.**

#### 5.4.5.3. Eficiencia en el uso de agua

Los tratamientos que muestran tendencia a una mayor eficiencia en el uso de agua son los de perlita B12, y también se aprecia una ligera mayor eficiencia en el uso de agua de las plantas con oxigenación en perlita B6 que las mismas en perlita B12 (Figura 5.13). El tratamiento S6 O2 FB es el más eficiente de los de perlita B6, además de ser uno de los de mayor rendimiento productivo, por lo que se presenta como uno de los tratamientos más interesantes desde el

punto de vista agronómico. Los valores de eficiencia en el uso de agua (WUE) registrado en el experimento son cercanos a los que se encuentran en la bibliografía, con valores entre los 25 y los 45  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$  (Frenz y Lechl, 1981; Vaysse, 1981) y más de diez veces mayores que los valores de eficiencias en producciones de gran cultivo, en sistemas extensivos (Antony, 2004).



**Figura 5.15. Eficiencia en el uso del agua para los tratamientos de oxigenación o no, frecuencia alta y baja y perlita B6 y B12.**

## 5.5. Conclusiones

En las condiciones experimentales descritas y considerando los resultados obtenidos de cultivo de pimiento descritas y a partir de los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

- La oxifertirrigación, el sustrato de partícula fina (perlita B6) y la frecuencia elevada de riego favorecen concentraciones de oxígeno más altas en la solución del sustrato.
- La oxifertirrigación y el sustrato de partícula fina (perlita B6) promueven un aumento significativo del número de frutos de pimiento y del peso fresco de los mismos.
- La frecuencia elevada de riego promueve una mayor tasa de respiración en las plantas de pimiento.
- La oxifertirrigación reduce de forma notable y significativamente la resistencia hidráulica radicular.
- Con oxifertirrigación, el déficit de evapotranspiración impuesto por una frecuencia baja en perlita B6 reduce el déficit de cosecha.

## **6. Conclusiones generales**



## 6. Conclusiones generales

Las conclusiones de la tesis son las siguientes:

### Apartado 3:

En las condiciones experimentales de cultivo sin suelo de rosa para flor cortada:

- 3.1. La oxifertirrigación en cultivo sin suelo aumenta significativamente la producción del rosal en uno de los dos cultivares ensayados (Red Corvette®)
- 3.2. La oxifertirrigación (cv. Dallas® y cv. Red Corvette) mejora los parámetros de calidad relativos al peso fresco de la flor y a la longitud de la vara floral.
- 3.3. La oxifertirrigación (cv. Dallas® y cv. Red Corvette) mejora el comportamiento en vaso de la flor una vez cortada, en términos de mayor duración de la flor, estadio de apertura el día de senescencia de la misma.
- 3.4. La oxifertirrigación favorece en términos generales un mayor contenido de calcio en la vara floral en el momento de la cosecha, concretamente en las fracciones de pétalos, sépalos y parte superior del tallo.
- 3.5. La aplicación nocturna de oxígeno en el medio de cultivo promueve un aumento de la traslocación de calcio a la parte aérea de la planta, concretamente en la fracción superior del tallo y en los sépalos de la flor.
- 3.6. La oxifertirrigación favorece un mayor contenido foliar de calcio y de potasio en el primer y segundo flujo productivo.

### Apartado 4:

En las condiciones experimentales del cultivo con esquejes y plántula recién enraizada de rosal:

- 4.1. La oxifertirrigación favorece un mayor peso, longitud, área y ratio área/peso seco de raíces que en esquejes no oxifertirrigados,
- 4.2. La oxifertirrigación de planta joven de rosal promueve un mayor contenido mineral de las raíces de plantas jóvenes de rosal en fósforo, magnesio, calcio cuando se emplea perlita de granulometría gruesa y de potasio, tanto empleando sustrato de perlita de partícula fina como de partícula gruesa

- 4.3. La oxifertirrigación de plantas jóvenes de rosal promueve una mayor biomasa aérea, mayor área foliar y mayor área específica cuando se emplea sustrato de perlita de grado fino y el área foliar también en el caso de empelar perlita de grado grueso.
- 4.4. El contenido en nitrógeno radicular es mayor en plantas oxifertirrigadas que en las plantas no oxifertirrigadas, tanto en la parte aérea como en la radicular, y también aumenta el contenido en C en las hojas.
- 4.5. La tasa respiratoria de raíces escindidas es mayor en plantas oxifertirrigadas que en plantas no oxifertirrigadas, pero la conductividad hidráulica radicular no muestra diferencias significativas entre plantas oxifertirrigadas y plantas no oxifertirrigadas.
- 4.6. Las medidas continuas de la respiración radicular parecen indicar una mayor respiración por planta en las plantas oxifertirrigadas pero de reducida significación.

## **Apartado 5**

En las condiciones experimentales de cultivo sin suelo de pimiento:

- 5.1. La oxifertirrigación, el sustrato de partícula fina (perlita B6) y la frecuencia elevada de riego favorecen concentraciones de oxígeno más altas en la solución del sustrato.
- 5.2. La oxifertirrigación y el sustrato de partícula fina (perlita B6) promueven un aumento significativo del número de frutos de pimiento y del peso fresco de los mismos.
- 5.3. La oxifertirrigación reduce muy significativamente la resistencia hidráulica radicular.
- 5.4. La frecuencia elevada de riego promueve una mayor tasa de respiración en las plantas de pimiento.
- 5.5. La oxifertirrigación reduce el déficit de cosecha que se da con una frecuencia baja de riego en perlita B6.
- 5.6. La oxifertirrigación en sustrato de partícula fina (perlita B6) y con baja frecuencia de riego promueve una mayor eficiencia en el uso de agua, interesante agronómicamente por su buena productividad.

## **7. Bibliografía**



## 7. Bibliografía

- Acuña, R.A. 2006. Oxigenación en cultivos hortícolas en sustratos de lana de roca y perlita en el litoral de Almería. Tesis Doctoral. Univ. Almería.
- Aguilar EA, Turner D, Gibbs DJ, Armstrong W, Sivasithamparam K. 2003. Oxygen distribution and movement, respiration and nutrient loading in banana roots (*Musa* spp. L.) subjected to aerated and oxygen-depleted environments. *Plant and Soil*. Vol. 253(1): 91-102.
- Aladenola, O., y Madramootoo, C., 2012. Effect of different water application on yield and water use of bell pepper under greenhouse conditions. In Northeast Agricultural and Biological Engineering Conference Canadian Society for Bioengineering. Lakehead University, Orillia, Ontario. pp. 15-18.
- Aladenola, O. y Madramootoo, C. 2014. Response of greenhouse-grown bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to variable irrigation. *Can. J. Plant Sci.* 94: 303–310.
- Allaire, S.E., Caron, J., Duchesne, I., Parent, L.E. & Rioux, J.A. 1996. Air-filled Porosity, Gas Relative Diffusivity, and Tortuosity: Indices of *Prunus × cistena* sp. Growth in Peat Substrates. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* Vol. 121 N. 2 236-242.
- Aminah, H., J. McP. Dick, R.R.B. Leakey, J. Grace, y R.I. Smith. 1995. Effect of indolebutyric acid (IBA) on stem cuttings of *Shorea leprosula*. *Forest Ecol. Mgt.* 72:199–206.
- Amoore, J.E., 1961. Dependence of Mitosis and Respiration in Roots upon Oxygen Tension. <http://rspb.royalsocietypublishing.org/> on Oct. 3, 2015. DOI: 10.1098/rspb.1961.0023
- André, J.P. 2003. Shoots & Stems. *Encyclopedia of Rose Science*. A. V. Roberts, Oxford, Elsevier: 512 p.
- Andrews, J. 1984. Peppers, the Domesticated Capsicums. Univ. Texas Press. Austin.
- Ansorena, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Mundi Prensa. Madrid. Pp. 172
- Antony, E. y Singandhupe, R.B., 2004. Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (*Capsicum annuum* L.) *Agricultural Water Management*. Vol. 65, N. 2. Pp. 121–132.
- Armstrong, W. y Drew, M.C. 2002. Root Growth and Metabolism under Oxygen Deficiency. In: *Plant Roots: The Hidden Half* (3rd Edition). Ed.: Yoav Waisel, Amram Eshel & Uzi Kafkafi. Publ. Marcel Dekker, New York & Basel. pp.729-761.
- Azcón-Bieto, J. 2005. *Prácticas de Fisiología Vegetal*. Fac. Biología. Univ. Barcelona.
- Azcón-Bieto, J. y Talon, M., 1999. *Fundamentos de fisiología vegetal.*, S.A. Mcgraw-Hill / Interamericana de España.
- Baas, R., van der Berg, D., Gislerød, H.R. 1997. Do roots of rose cuttings suffer from oxygen deficiency during propagation in rockwool? *Acta Hort.* 450:123-131

- Baas, R., Wever, G., Koolen, A.J., Tariku, E. and Stol, K.J. 2000. Oxygen supply and consumption in soilless culture: Evaluation of an oxygen simulation model for cucumber. *Acta Hort.* 554.
- Bangerth, F. 1979. Calcium-related disorders of plants. *Annual Review of Phytopathology* 17, 97-122.
- Bar-Tal, A., Baas, R., Ganmore-Neumann, R., Dik, A., Marissen, N., Silber, A., Davidov, S., Hazan, A., Kirshner, B. and Elad, Y. 2001. Rose flower production and quality as affected by Ca concentration in the petal. *Agronomie* Vol. 21, 393-402. © INRA, EDP Sciences.
- Basile, B., Marsal, J., Solari, I.I., Tyree, M.T., Bryla, D.R. y DeJong, T.M., 2003. Hydraulic conductance of peach trees grafted on rootstocks with differing size-controlling potentials. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 78: 768-774.
- Bernstein, N., Eshel, A. y Beeckman, T., 2013. Effects of salinity on root growth. *Plant roots: the hidden half.* CRC Press.
- Bhattarai, S.P., Huber, S. y Midmore, D.J., 2004. Aerated subsurface irrigation water gives growth and yield benefits to zucchini, vegetable soybean and cotton in heavy clay soils. *Ann. Appl. Biol.* 144, 285-298.
- Bhattarai, S.P., Pendergast, L., Midmore, D.J. 2006. Root aeration improves yield and water use efficiency of tomato in heavy clay and saline soils. *Scientia Horticulturae.* Vol. 108, pp. 278-288.
- Bhattarai, S. P. y Midmore, D. J. 2008. Effect of oxygation with respect to dripper depths on yield and water use efficiencies of soybean and pumpkin in vertisols, pp. 243-257. In: K. Palanisami, B. R. Neupane and M. Thangarajan (Eds.). *Ground Water Quality and Environment.* Macmillan Publication, India.
- Bhattarai, S.P., Midmore, D.J. y Pendergast, L. 2009. Oxygation effect on growth, gas exchange, water relation and salt tolerance of vegetable soybean and cotton in a saline vertisol. *Journal of Integrative Plant Biology* 51 (7): 675-688.
- Bolívar, P.; Fischer, G.; Flórez, V.J. & Mora, A. 1999. Effect of pre- and postharvest treatments on flower longevity of & lsquo; ARIANA & rsquo; Cut Flowers. *Acta Horticulturae* 482.
- Bonachela, S., Acuña, R. y Magán, J.J., 2008. Sustratos inertes. Caracterización física. Oxigenación de los sustratos. En: 'Relaciones Hídricas y Programación de Riego en Cultivos Hortícolas en Sustratos' IFAPA. Almería.
- Bonachela, S., Acuña, R. y Magán, J.J. y Marfà, O., 2010a. Oxygen enrichment of nutrient solution of substrate-grown vegetable crops under Mediterranean greenhouse conditions: oxygen content dynamics and crop response. *Spanish Journal of Agricultural Research* 12/2010; 8(4):1231-1241.
- Bonachela, S., Quesada, J., Acuña, R. A., Magán, J. J., & Marfà, O., 2010b. Oxyfertigation of a greenhouse tomato crop grown on rockwool slabs and irrigated with treated wastewater: Oxygen content dynamics and crop response. *Agricultural water management*, 97(3), 433-438.
- Bosland, P.W. y Votava, E. J., 2000. *Peppers: Vegetable and spice capsicums.* CABI Publ. USA

- Bryce, J.H., Focht, D.D., Stolzy, L.H., 1982. Soil aeration and plant growth response to urea peroxide fertilization. *Soil Science* 134, 111–116.
- Burés, S., Gago, M.C., Morales, O., Marfà, O. y Martínez, F.X. 1997. Water characterization in granular materials. *Acta Horticulturae* 450, 389-396.
- Busscher, W.J., 1982. Improved growing conditions through soil aeration. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 13, 401–409.
- Cabrera, R.I. 2002. Rose yield, dry matter partitioning and nutrient status responses to rootstock selection. *Scientia Horticulturae*, 95. Pp. 75–83.
- Cabrera, R.I., 2003. Mineral Nutrition. *Encyclopedia of Rose Science/Morphology and Anatomy*. Ed. A.V. Roberts. Oxford. Elsevier: 512 p.
- Cai, X., Sun, Y., Starman, T., Hall, C. y Niu, G. 2014. Response of 18 Earth-Kind® Rose Cultivars to Salt Stress. *HortScience*, vol. 49. No. 5. 544-549.
- Capellades, M., Fontarnau, R., Carulla, C. y Debergh, P., 1990. Environment influences anatomy of stomata and epidermal cells in tissue-cultured *Rosa multiflora*. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115:141-145.
- Carazo, N., López, D., Mancilla, S., Martínez, A., Cáceres, R. y Marfà, O., 2005. Oxifertigation and Foliar Nutrient Contents of Closed Soilless Rose Crop. *ISHS Acta Hort.* 697, 493-497.
- Carazo, N., López, D., Peleato, M., Cáceres, R. y Marfà, O., 2007. Oxifertirrigación de rosa: contenido de nutrientes en flor cortada. *Actas de Horticultura II Cong. Nacional SECH*.
- Carazo, N., López, D., Rodrigo, M.C., Brunet, G., Cáceres, R. and Marfà, O., 2008. The effect of oxygenation on the root hydraulic conductivity of container-grown roses. *Acta Hort.* 779, 471-476. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.779.59.
- Caron, J., Morel, P.H. y Riviere, L.M. 2001. "Aeration in Growing media containing large particle size". *Acta Hort.* 548: 229:234
- Casadesús, J., Cáceres, R., y Marfà, O. 2007. Dynamics of CO<sub>2</sub> efflux from the substrate root system of container-grown plants associated with irrigation cycles. *Plant and Soil*, Vol. 300. Pp. 71-82.
- Castilla N., Hernández J., Abou-Hadid A.F. 2004. Strategic crop and greenhouse management in mild winter climate areas. *Acta Hort.*, 633:183-196.
- Castillo Rodríguez, F. 2005. *Biotechnología ambiental*. Ed. Tebar.
- Cid, M<sup>a</sup> C.; Ayerra, P., 2001 *Poscosecha de flores* (72 p). Cabildo de Tenerife. Servicio de agricultura. Monografías agrarias nº 2. Tenerife.
- Clark, D. G., Kelly, J. W., y Rajapakse, N. C. 1993. Production and Postharvest Characteristics of *Rosa hybrida* L.Meijikatar'Grown in Pots under Carbon Dioxide Enrichment. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118(5), 613-617.
- Cook, F.J. y Knight, J.H., 2003. Oxygen Transport to Plant Roots: Modeling for Physical Understanding of Soil Aeration. *Soil Science Society of America Journal*. 01/2003; 67(1).

- Cook, F.J., Knight, J.H., Kelliher, F.M., 2007. Oxygen transport in soil and vertical distribution of roots. *Australian Journal of Soil Research* 45, 101-110.
- Costa, J.M., Challa, H., Van Meeteren, U. and Van de Pol, P.A. 2001. Photosynthates: mainly stored and yet limiting in propagation of rose cuttings. *Acta Hort.* 547:167-174.
- Costa, J.M.R.C., 2002. The role of the leaf in growth dynamics and rooting of leafy stem cuttings of rose. PhD thesis, Plant Sciences Group, The Netherlands.
- Costa, J.M. y Challa, H. 2002. The effect of the original leaf of rooting and initial growth of planting material of rose. *Sci. Hort.* 95:111-121.
- Cunill, C. y Marfà, O., 1988. Cálculos de la fertirrigación por medios informáticos. Aplicación a los cultivos de flor cortada. II Jornadas Técnicas de Floricultura de Cádiz. Col. Cong. & Jornadas nº 7. Junta de Andalucía.
- Chen, J.H. y Barber, S.A., 1990. Soil pH and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with an uptake model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1032-1036.
- Chen, X., Dhungel, J., Bhattarai, SP, Torabi, M., Pendergast, L. and Midmore, DJ., 2011. Impact of oxygation on soil respiration, yield and water use efficiency of three crop species. *Journal of Plant Ecology*, Vol. 4, N.4, 236-248.
- Chimonidou, D. 2003. Flower Development and the Abscission Zone. *Encyclopedia of Rose Science*. Ed. A.V.Roberts, T. Debener & S. Gudin, Oxford, Elsevier: 512 p.
- Dalla Costa L., Gianquinto G. 2002. Water stress and water table depth influence yield, water use efficiency and nitrogen recovery in bell pepper: lisimeter studies. *Aust. J. Agric. Res.*, 53:201-210.
- De Pascale S., Maggio A., Barbieri G. 2006. La sostenibilità delle colture protette in ambiente mediterraneo: limiti e prospettive. *Italus Hortus*, 16, 1:33-48.
- Dhungel, J., Bhattarai, S.P. and Midmore, D.J., 2012. Aerated water irrigation (oxygation) benefits to pineapple yield, water use efficiency and crop health. *Adv.Hort.Sci.*,26(1):3-16
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. No. 33. Rome.
- Drew, M.C., 1988. Effects of flooding and oxygen deficiency on plant mineral nutrition. *Advances in Plant Nutrition*, Volume: v. 3 p. 115-159.
- Drew, M.C. 1992. Soil Aeration and Plant Root Metabolism. *Soil Sci.* Vol. 154: N.4: 259-268.
- Drew, M.C. 1997. Oxygen deficiency and root metabolism: Injury and acclimation under hypoxia and anoxia. *An. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 48:223-250.
- Druege, U., Zerche, S., Kadner, R., y Ernst, M. 2000. Relation between nitrogen status, carbohydrate distribution and subsequent rooting of chrysanthemum cuttings as affected by pre-harvest nitrogen supply and cold-storage. *Annals of Botany*,85(5), 687-701.
- Druege, U., Baltruschat, H., y Franken, P. 2007. Piriformospora indica promotes adventitious root formation in cuttings. *Scientia Horticulturae*, 112(4), 422-426.

- Dutilleul, C., Driscoll, S., Cornic, G., De Paepe, R., Foyer, C. H. y Noctor, G., 2003. Functional mitochondrial complex I is required by tobacco leaves for optimal photosynthetic performance in photorespiratory conditions and during transients. *Plant Physiology*, 131(1), 264-275.
- Erard, P. 2002. Le poivron. Ed. CTIFL. Francia. 155 p.
- Erstad J.L.F. y Gislerød, H.R., 1994. Water uptake of cuttings and stem pieces as affected by different anaerobic conditions in the rooting medium. *Scientia Horticulturae*, Vol. 58, Issues 1-2, June 1994, Pages 151-160. doi:10.1016/0304-4238(94)90135-X
- ETI Ethical Trading Initiative. 2015. <http://www.ethicaltrade.org/> ,10 julio 2015
- FAOSTAT, 2015. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Dirección de Estadística. <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/S> (3-septiembre-2015)
- FEPEX, Fed. Esp. Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas y Plantas vivas. 2015. <http://www.fepex.es/datos-del-sector/exportacion-importacion-espa%C3%B1ola-flores-plantas>, 14 julio 2015
- Fernandez, M.D., Gallardo, M., Bonachela, S., Orgaz, F., Thompson, R.B., Fereres, E., 2005. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 80 (1), 87-96
- Fernie, A. R., Carrari, F. y Sweetlove, L. J., 2004. Respiratory metabolism: glycolysis, the TCA cycle and mitochondrial electron transport. *Current opinion in plant biology*, 7(3), 254-261.
- Frenz, F.W. y Lechl, P., 1981. The influence of different water suctions on yield and water requirements of tomatoes, cucumbers, radishes and lettuce in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 119: 323-331.
- Fr.Wikipédia. [https://fr.wikipedia.org/wiki/Rose\\_%28fleur%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Rose_%28fleur%29) (29-agosto-2015)
- Friedman, S.P. y Naftaliev, B. 2012. A survey of the aeration status of drip-irrigated orchards. *Agricultural Water Management* 115 (2012) 132- 147
- Fuchs, H.W.M. 1986. Root regeneration of rose plants as influenced by applied auxins. *Acta Hort.* 189, 101-108.
- Fuchs, H.W.M., 1994. Scion - rootstock relationships and root behaviour in glasshouse roses. PhD Thesis, Univ. Wageningen.
- Gercek S., Comlekcioglu N., Dikilitas M. 2009. Effectiveness of water pillow irrigation method on yield and water use efficiency on hot pepper (*Capsicum annum* L.). *Sci.Hort.*, 120: 325-9.
- Gislerød, H. R., 1983. Physical conditions of propagation media and their influence on the rooting of cuttings. *Plant and Soil*, 75(1), 1-14.
- Gislerød, H.R., Adams, P., 1983. Diurnal variations in the oxygen content and acid requirement of recirculating nutrient solutions and in the uptake of water and potassium by cucumber and tomato plants. *Scientia Horticulturae*. Vol. 21, Núm. 4, Pp. 311-321.
- Gislerød, H.R., Baas, R., Warmenhoven, M., van der Berg, D. 1997 Effect of aeration on rooting and growth of roses. *Acta Hort.* 450:113-122.

- González, M.M. 1995. Estudio y modelización de intercambios gaseosos (H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>) en cultivo de rosas bajo invernadero. Tesis Doctoral. Univ. Politécnica de Valencia. Pp 192.
- González, V.D., Orgaz, F., Federes, E., 2007. Response of pepper to deficit irrigation for paprika production. *Sci. Hortic.* 114, 77-82.
- Goorahoo, D., Carstensen, G., Zoldoske, D.F., Norum, E., CIT y Mazzei, A. 2002. Using Air in Sub-Surface Irrigation (SDI) to Increase Yields in Bell Peppers. Proc. California Plant and Soil Conference. Energy and Agriculture. Pp.10-19.
- Goto, E., Both, A.J., Albright, L.D. Langhans, R.W. y Leed, A.R. 1996. Effect of dissolved oxygen concentration on lettuce growth in floating hydroponics. *Acta Horticulturae* 440: 205-210.
- Gudin, S., 2001. "Rose breeding technologies. In: Proceedings of the third international symposium on rose research and cultivation. (Zieslin, N. and Agbaria, H. eds.)" *Acta Horticulturae* 547: 23-26.
- Gudin, S., 2003. BREEDING | Overview. *Encyclopedia of Rose Science*. Ed. A.V.Roberts, Oxford, Elsevier: 25-30.
- Gupta, K. J., Zabalza, A., & Van Dongen, J. T., 2009. Regulation of respiration when the oxygen availability changes. *Physiologia Plantarum*, 137(4), 383-391.
- Gupta, K.J., Neelwarne, B. Y Mur, L.A.J., 2015. Integrating classical and alternative respiratory pathways. In: *Alternative Respiratory Pathways in Higher Plants*. Ed. K. J. Gupta, L. A. J. Mur y B. Neelwarne. Chap. I. John Wiley & Sons Ltd.
- Guri, S. 2002. Efectes de la fertirrigació carbònica i de l'oxigenació del medi radicular en la productivitat dels cultius hortícoles. Tesis Doct. ETSEA. Univ.Lleida. Catalunya. Spain. P 147
- Guri, S. y Marfà, O. 2002 Oxifertirrigación en cultivo sin suelo de rosal. Resultados preliminares. *Plantflor* 92: 66-68
- Gysi, Ch. y Reist, A., 1990. Hors-sol Kulturen eine ökologische Bilanz. *Landwirtschaft Schweiz* 3/8: 447-459.
- Gysi, Ch. and von Allmen, F. 1997. Lamb's lettuce in different growing media in closed recirculating soilless culture. *Acta Hort.* ISHS. 450:155-159.
- He, C., Davies, F.T.Jr. y Lacey, R.E., 2007. Separating the effects of hypobarica and hypoxia on lettuce: growth and gas exchange. *Physiol Plant.* Oct. Vol. 131(2):226-40.
- Högberg, P., Nordgren, A., Buchmann, N., Taylor, A. F., Ekblad, A., Högberg, M. N., ... & Read, D. J. 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature*, 411(6839), 789-792.
- Horridge, J.S. and Cockshull, K.E., 1974. Flower initiation and development in the glasshouse rose. *Scientis Hort.* Vol.2, 3 273-284
- Huang H. and Eissenstat, 2000. Root plasticity in exploiting water and nutrient heterogeneity. In: Wilkinson RE (ed) *Plant-environment interactions*. Marcel Dekker, New York, 111-132.
- IFD, International Flower Distributors. 2010. [www.flowertrendsforecast.com/](http://www.flowertrendsforecast.com/) (2- septiembre 2015)

- Ismail, S.M. 2012. Water Use Efficiency and Bird Pepper Production as Affected by Deficit Irrigation Practice. *International Journal of Agriculture and Forestry*. Vol. 2(5): 262-267.
- Jackson, M.B. 1980. Aeration in the nutrient film technique of glasshouse crop production and the importance of oxygen, ethylene and carbon dioxide. *Acta Hort.* 98. 61-78.
- Jackson, M.B., Blackwell, P.S., Chrimes, J.R., Simes, T.V. 1984 Poor aeration in NFT and means for its improvement. *J. of Hort. Sci.* 59: 439-448.
- Jeannequin, B. 1988. Els cultius fòra sol. Sistemes i perspectives. En: *El cultiu fora sòl. Jornades Tècniques FIERESME 88*. Mataró (Barcelona).
- Jiménez, S., Dridi, J., Gutiérrez, D., Moret, D., Irigoyen, J.J., Moreno, M.A., y Gogorcena, Y., 2013. Physiological, biochemical and molecular responses in four *Prunus* rootstocks submitted to drought stress. *Tree Physiology*, 33: 1061-1075.
- Katerji, N., Mastrorilli, M. y Hamdy, A. 1993. Effects of water stress at different growth stages on pepper yield. *Acta Horticulturae*, 335, 165-171.
- Lambers, H., 1985. Respiration in intact plants and tissues: its regulation and dependence on environmental factors, metabolism and invaded organisms. In *Higher plant cell respiration*; pp. 418-473. Springer Berlin Heidelberg.
- Lambers, H., Day, D.a. y Azcón-Bieto, J., 1983. Cyanide-resistant respiration on roots and leaves. Measurements with intact tissues and isolated mitochondria. *Physiol. Plant.* 58: 148-154
- Lésaint, C., Grandjean, M., Gambier, J. 1983 Influence de l'aération du milieu nutritif sur l'absorption de l'eau et des ions, la nuit et le jour. Comparaison du maïs et de la tomate. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, 69(6): 399-406
- Liao, C. T. y Lin, C. H., 2001. Physiological adaptation of crop plants to flooding stress. *Proceedings of the National Science Council, Republic of China. Part B, Life sciences*, 25(3), 148-157.
- Lorenzo, H., Cid, M.C., Siverio, J.M. y Ruano, M.C., 2000. Effects of sodium on mineral nutrition in rose plants. *Ann. appl. Biol.* Vol. 137: 065-072.
- Luxmoore, R.J., Stolzy, L.H., Letey, J., 1970. Oxygen diffusion in the soil-plant system. I. A model. II. Respiration Rate, Permeability and Porosity of Consecutive Excised Segments of Maize and Rice Roots. III. Oxygen concentration profiles, respiration rates, and the significance of plant aeration predicted for maize roots. *Agronomy Journal* 62, 317-329.
- Luxmoore, R.J., Sojka, R.E. y Stolzy, L.H., 1972. Root porosity and growth responses of wheat to aeration and light intensity. *Soil Science* 113, 5, 354-357.
- Lynch, J.M. y Harper, S.H.T. 1980. Role of substrates and anoxia in the accumulation of soil ethylene. *Soil Biol. Biochem.* 12: 363-367.
- Lloyd, J., y Taylor, J. A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional ecology*, 315-323.
- MAGRAMA, 2015. Anuario de estadística 2014. <http://www.Magrama.gob.es/es/estadistica/temas/publicaciones/anuario-de-estadistica/default.aspx> 14 julio 2015

- Makita, N., Hirano, Y., Sugimoto, T., Tanikawa, T., y Ishii, H. 2015. Intraspecific variation in fine root respiration and morphology in response to in situ soil nitrogen fertility in a 100-year-old *Chamaecyparis obtusa* forest. *Oecologia*, 1-9.
- Marfà, O. 1994. Los cultivos sin suelo. Algunas reflexiones. *Hortofruticultura*, 5(4): 39-48.
- Marfà, O., 1998. Física, hidrología y oxigenación en los sustratos para cultivos sin suelo. Revisión. *Riegos y Drenajes* 101: 39-44.
- Marfa, O., Orozco, R. 1994. Non saturated hydraulic conductivity of perlites: Some effects on pepper. Symposium on growing media and plant nutrition in horticulture .ISHS
- Marfà, O. y Guri, S., 1999. Física de sustratos y oxigenación del medio radicular. In: Cultivos sin suelo II. M. Fernández y I.M. Cuadrado (Eds). Consejería de Agricultura (Junta de Andalucía), FIAPA y Cajamar. Almería: 93:106.
- Marfà, O. y Guri, S., 2001. Efectos de la aplicación de oxígeno en el agua de riego en cultivos sin suelo. *Agrícola Vergel* 239, 593-596.
- Marfà, O., Cáceres, R. y Guri, S. 2005. Oxyfertigation: A New Technique for Soilless Culture under Mediterranean Conditions. *Acta Horticulturae*, 697: 65-72.
- Marfà, O., Brunet, G., Cáceres, R. y Carazo, N. 2014. Closed Soilless Technique for Growing Roses and Effects of Oxifertigation. *Barcelona Rose Convention*. May 2014
- Marschner, H. 2011. Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic press.
- Marti, H.R. y Mills, H.A. 1991. Calcium uptake and concentration in bell pepper plants as influenced by nitrogen form and stages of development. *Journal of Plant Nutrition* 14, 1177-1185.
- Martínez, F.X. 1990 Interrelacions dels processos de bescanvi de gasos de les plantes i llur ambient radicular: bescanvi de gasos sota diverses condicions d'stress radicular de curta durada en *Dianthus caryophyllus* L. Doctoral Thesis. Fac. of Biology. Univ. of Barcelona. Barcelona
- M'Bou, A. T., Saint-André, L., de Grandcourt, A., Nouvellon, Y., Jourdan, C., Mialoundama, F., & Epron, D., 2010. Growth and maintenance respiration of roots of clonal Eucalyptus cuttings: scaling to stand-level. *Plant and soil*, 332(1-2), 41-53.
- McCall, W.W. & Nakagawa, Y. 1970. Growing plants without soil. Circular 440, Cooperative Ext. Serv. Hawai Univ.
- Melsted, S.W., Krutz, T., Bray, R., 1949. Hydrogen peroxide as an oxygen fertilizer. *Agronomy Journal* 41, 97.
- Midmore, D & Bhattarai, S 2012, 'Oxygation : optimising delivery and benefits of aerated irrigation', NPSI Project final report, NPSI 06-12, National Program for Sustainable Irrigation, Canberra, Australia, <http://npsi.gov.au/projects/2633>
- Midmore, D.J., Bhattarai, S.P., Pendergast, L. y Torabi, M. 2007, 'Oxygation: aeration of subsurface drip irrigation water and its advantages for crop production', paper presented at the ANCID Conference 2007, Bundaberg, Australia, 19-22 August 2007.

- Miyamoto, N., Steudle, E., Hirasawa, T., & Lafitte, R. 2001. Hydraulic conductivity of rice roots. *Journal of Experimental Botany*, 52(362), 1835-1846.
- Moe, R. y Kristofferson, T., 1969. The effect of temperature and light on growth and flowering of rose 'Baccara' in greenhouses. *Acta Hort.*, 14: 157--167.
- Morard, P. 1995. Étude de l'oxygénation du système racinaire. En: *Les cultures végétales hors-sol*. Ed. SARL Pub. Agr. Agen. Francia: 245-252.
- Morard, P. 1996 Le calcium et les végétaux cultivés. *PHM-Revue Horticole*, 371: 10-13.
- Morgan, L. 2002. Effect of dissolved oxygen in the root zone on plant growth and development. [www.suntec.co.nz/consultants.htm](http://www.suntec.co.nz/consultants.htm) 1 julio 2003
- Morgan, L. 2002. Effect of dissolved oxygen in the root zone on plant growth and development. SUNTEC International Hydroponic Consultants. New Zealand. <http://www.suntec.co.nz/consultants.htm> 1 Julio 2003.
- Motisi, A., y Gullo, G. 2002. Effect of soil texture on root hydraulic conductivity in *Olea europaea* L. cv. *Nocellara del Belice* potted trees, 503-506.
- Moyen, C., y Roblin, G., 2013. Occurrence of interactions between individual Sr 2+-and Ca 2+-effects on maize root and shoot growth and Sr 2+, Ca 2+ and Mg 2+ contents, and membrane potential: Consequences on predicting Sr 2+-impact. *Journal of hazardous materials*, 260, 770-779.
- Mu, Z., Zhang, S., Zhang, L., Liang, A., y Liang, Z. 2006. Hydraulic conductivity of whole root system is better than hydraulic conductivity of single root in correlation with the leaf water status of maize. *Botanical Studies*, 47(2), 145-151.
- Nau, J. 2011. *Ball Redbook. Crop Production*. Ball Publishing. Chicago.
- Niu, G., Starman, T., and Byrne, D. 2013. Responses of Growth and Mineral Nutrition of Garden Roses to Saline Water Irrigation. *HortScience* June 2013 vol. 48 no. 6 756-761.
- Nuez, F. Gil, R. y Costa, J., 1996. *El cultivo de pimientos, chiles y ajíes*. Ed. Mundi Prensa. Madrid.
- Orgaz F., Fernández M.D., Bonachela S., Gallardo M., Fereres E. 2005. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agric. Water Manag.*, 72:81-96.
- Orozco R. 1995. Propiedades físicas e hidrológicas de las perlitas utilizadas para cultivos sin suelo. Su implicación con las relaciones sustrato-agua-planta y con el riego de los cultivos hortícolas. Tesis doctoral. Universitat de Lleida.
- Orozco, R y O. Marfà. 1995. Non saturated hydraulic conductivity of perlites: some effect on pepper. *Acta Hort.* 401: 235-242.
- Ou, L.J., Dai, X.Z., Zhang, Z.Q y Zou, X.X., 2011. Responses of pepper to waterlogging stress. *PHOTOSYNTHETICA* 49 (3): 339-345.
- Owen Jr, J. S., y Maynard, B. K., 2007. Environmental effects on stem-cuttings propagation: A brief review. In *Combined Proceedings International Plant Propagators' Society*. Vol. 57, pp. 558-564.

- Passioura, J. B., 1980. The transport of water from soil to shoot in wheat seedlings. *Journal of Experimental Botany*, 31(1), 333-345.
- Pemberton, H. B. and D. H. Byrne. 2000. Field resistance of rose hybrids, species, and species hybrids as part of a rose improvement program. *International Rose Symposium*, Israel, May, 2000
- Pemberton, H. B., Kelly, J. W., Ferare, J., y Armitage, A. 2003. Pot rose production. *Encyclopedia of Rose Science*. Elsevier Science, Oxford, 587-593.
- Pettersen, R.I., Moe, R. y Gislerød, H.R., 2007. Growth of pot roses and post-harvest rate of water loss as affected by air humidity and temperature variations during growth under continuous light. *Scientia Horticulturae*, Volume 114, Issue 3, 1, Pages 207–213.
- Pezeshki, S.R., Pardue, J.H. y Delaume, R.D. 1993 The influence of soil oxygen deficiency on alcohol-dehydrogenase activity, root porosity, ethylene production and photosynthesis in *Spartina patens*. *Environm. And Exp. Bot.*, 33(4):565-573.
- Pezeshki, S.R. 1994. Responses of baldcypress (*Taxodium distichum*) seedlings to hypoxia: leaf protein content, ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase activity and photosynthesis. *Photosynthetica* 30:59–68.
- Poorter, H., van der Werf, A., Atkin O.K. y Lambers H. 1991. Respiratory energy requirement of roots vary with the potential growth rate of a plant species. *Physiol Plant* 83: 469–475.
- Poovaliah, B.W. y Leopold, A.C. 1973. "Deferreal of leaf senescence with Ca". *Plant. Physiol.* 52: 236 – 239.
- Put, H.M.C. y Clercx, A.C.M. 2003. Xylem structure and Function in Cut Roses. . *Encyclopedia of Rose Science*. Ed. A.V. Roberts, T. Debener and S. Gudin. Oxford, Elsevier
- Quintero, J. M., Fournier, J. M., & Benlloch, M. 1999. Water transport in sunflower root systems: effects of ABA, Ca<sup>2+</sup> status and HgCl<sub>2</sub>. *Journal of Experimental Botany*, 50(339), 1607-12.
- Rachmilevitch, S., Lambers, H., & Huang, B., 2006. Root respiratory characteristics associated with plant adaptation to high soil temperature for geothermal and turf-type *Agrostis* species. *Journal of Experimental Botany*, 57(3), 623-631.
- Rabobank 2015. Técnicas de mejora y efecto de los sustratos. <https://economics.rabobank.com/.../outlook-2015/> (5- septiembre-2015).
- Ramos, C. y Kaufmann, M.R., 1979. Hydraulic resistance of rough lemon root. *Physiologia Plantarum* 45: 311-314.
- Raviv et al. 2002. *Llibre Hydroponics*, Savvas, pag. 34.
- Requena, E. 1990. La fertilización en el rosal 1. *FLOR, Cultivo & Comercio*. 4: 35-37.
- Riviere, L.M., Charpentier, S. Jeannin, B. and Kafka, B. 1993. Oxygen concentration of nutrient solution in mineral wools. *Acta Hort.* 342, p.93
- Rivière, L.M., Charpentier, S., Jeannin, B., Kafka, B., 1993 Oxygen concentration of nutrient solution in mineral wools. *Acta Hort.*, 342: 93-101

- Rubio, J. S., Garcia-Sanchez, F., Rubio, F., & Martinez, V. 2009. Yield, blossom-end rot incidence, and fruit quality in pepper plants under moderate salinity are affected by K<sup>+</sup> and Ca<sup>2+</sup> fertilization. *Scientia Horticulturae*, 119(2), 79-87.
- Scagel, C. F. 2004. Changes in cutting composition during early stages of adventitious rooting of miniature rose altered by inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 129(5), 624-634.
- Scheurwater, I., Dünnebacke, M., Eising, R., & Lambers, H., 2000. Respiratory costs and rate of protein turnover in the roots of a fast-growing (*Dactylis glomerata* L.) and a slow-growing (*Festuca ovina* L.) grass species. *Journal of Experimental Botany*, 51(347), 1089-1097.
- Schwarz, M. 1989. Oxygenation of nutrient solution in normal and stress conditions. *Soilless Culture* 5(1): 45-53.
- Schwarz, M. y Gale, J. 1981. Maintenance Respiration and Carbon Balance of Plants at Low Levels of Sodium Chloride Salinity. *J. Exp. Botany*. Vol. 32. N. 130. Pp.933-941.
- Serek, M., E.J. Wolteringc, E.C. Sislerd, S. Frelloa, S. Sriskandarajaha. 2006. Controlling ethylene responses in flowers at the receptor level. *Biotechnology Advances* Volume 24, Issue 4, July–August 2006, Pages 368–381. Ethylene biology.
- Sezen S.M, Yazar A., Eker S. 2006. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. *Agric. Water Manag.*, 81:115-131.
- Shahein, M.M., Abuarab, M.E. y Magdy, E., 2014. Root aeration improves yield and water use efficiency of irrigated potato in sandy clay loam soil. *Int. Journal of Adv. Research*, Volume 2, Issue 10, 310-320 [journalijar.com](http://journalijar.com)
- Silber, A., Xu, G., Levkovitch, I., Soriano, S., Bilu, A., y Wallach, R. 2003. High fertigation frequency: the effects on uptake of nutrients, water and plant growth. *Plant and soil*, 253(2), 467-477.
- Silva, H., Martínez, JP., Baginsky, C. y Pinto, M. 1999. Efecto del déficit hídrico en la anatomía foliar de seis cultivares de poroto *Phaseolus vulgaris*. *Rev. Chilena Historia Natural* 72: 219-235.
- Skytt Andersen, A. y Fuchs, H.W.M. 2003. Roots. *Encyclopedia of Rose Science/Morphology and Anatomy*. Ed. A.V. Roberts. Oxford. Elsevier: 512 p.
- Soffer, H. y Burger, D.W. 1988. Effects of Dissolved Oxygen Concentrations in Aero-hydroponics on the Formation and Growth of Adventitious Roots. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 113(2): 218-221.
- Sojka, R.E. 1992. Stomatal closure in oxygen-stressed plants. *Soil Science* 154(4): 269-280.
- Somos, A., 1984. *The paprika*. Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Sonneveld, C. y Straver, N., 1994. Nutrient solutions for vegetables and flowers grown in water or substrates. Serie: Voedingsoplossingen glastuinbouw, nº 8. Aalsmeer. Netherlands.
- Stepniewski, W., 2005. *Oxygenology in outline*. Publ. Lublin, Inst. of Agrophysics PAS. 121
- Stepniewski,W., Stepniewska,Z., Bennicelli, R.P. y Glinski, J. 2005. *Oxygenology in outline*. EU5thFrameworkProgramQLAM-2001-00428.

- Steudle, E. y Peterson, C.A. 1998. How does water get through roots? *Journal of experimental Botany*, 49: 322; 775-788.
- Svenson, S.E., Davies, F.T.Jr. y Duray, S.A., 1995. Gas Exchange, Water Relations, and Dry Weight Partitioning during Root Initiation and Development of Poinsettia Cuttings. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120(3): 454-459.
- Tachibana, S. 1988. The influence of withholding oxygen supply to roots by day and night on the blossom-end rot of tomatoes in water culture. *Soilless Culture* 4(1): 41-50.
- Tanaka, G., Yamashita, Y Nakabayashi, K, 2001. "Effect of Supersaturation of Dissolved Oxygen on the Growth of Tomato Plants and Nutrient Uptake in Hydroponic Culture". *Journal of Soc. of High Tech. Agriculture*, 13(1): 21-28.
- Tarbouriech, M.F. 1996. Des églantiers et des roses. Dossier de l'environnement de l'INRA, n°21. *Agriculture et biodiversité des plantes*. 119-124.
- Toro, G. y Pinto, M., 2015. Plant respiration under low oxygen. *Chilean journal of agricultural research*, 75, 57-70.
- Torre, S., y Fjeld, T. 2001. Water loss and postharvest characteristics of cut roses grown at high or moderate relative air humidity. *Scientia Horticulturae*, 89(3), 217-226.
- Torre, S. 2003. Leaves. *Encyclopedia of Rose Science*. Ed. A.V.Roberts, Debener & Gudín, Oxford, Elsevier.
- UN Comtrade | International Trade Statistics Database. [comtrade.un.org](http://comtrade.un.org) (28-septiembre 2015)
- Urban, L. (1991). . Etat hydrique et production sous serre en hors sol. *PHM Revue Horticole* (319), 37-43. <http://prodinra.inra.fr/record/94236>
- USDA. APHIS. 2011. International Flower Developments Pty. Ltd. Petition (08-315-01p) for Determination of Nonregulated Status of Events IFD-524Ø1-4 and IFD-529Ø1-9 Rosa x hybrida (rose). Final Envir. Assess.
- Van Dongen, J. T., Gupta, K. J., Ramírez-Aguilar, S. J., Araújo, W. L., Nunes-Nesi, A., & Fernie, A. R., 2011. Regulation of respiration in plants: a role for alternative metabolic pathways. *Journal of plant physiology*, 168(12), 1434-1443.
- Van Iersel, M. W., y Seymour, L., 2000. Growth respiration, maintenance respiration, and carbon fixation of Vinca: a time series analysis. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 125(6), 702-706.
- Vanachter, A., Thys, L., van Wambeke, E., van Aassche, C. 1988. Possible use of ozone for disinfection of plant nutrient solutions. *Acta Hort-* 221: 295-301.
- Vargas, J.A. 2001 Uso de la oxifertirrigación en un cultivo de sandía en sustrato de perlita en un invernadero de el Ejido (Almería). TFC. EUPolitécnica Superior. Ing. Técn. Agríc. esp.Hortofructicultura y Jardinería. Univeridad de Almería
- Vaysse, P., 1981. Water stress response of tomato under protected culture on drip irrigation. *Acta Horticulturae* 119: 285-291.
- Vilmorín Díaz, F., 1977. El cultivo del pimiento dulce (tipo Bell). Ed. Diana. México.

- Villalobos, F.J., Mateos, I., Orgaz, F. Y Fereres, E., 2009. *Fitotecnia. Bases y tecnologías de la producción agrícola*. Ed. Mundi-Prensa.
- Wagenvoort, W.A., Babik, I., Findenegg, G.R. 1985 The effect of oxygen supply and calcium levels in hydroponic culture on the occurrence of carrot cavity spot. *Soilless Culture* Vol. 1(1):67-72
- Waisel, Y.A., 2002. *Plant Roots: The Hidden Half*, 2002. Ed. Yoav Waisel, Amram Eshel, Tom Beeckman, Uzi Kafkafi. CRC Press Third Edition.
- Walker D. y Leegood RC. 1993. Photosynthesis and respiration: use of O<sub>2</sub> electrodes. *In: Hendry GAF, Grime JP, eds. Methods in Comparative Ecology - a Laboratory Manual. London: Chapman & Hall.* 136-139.
- Walter, S., Heuberger, H. y Schnitzler, W.H. 2004. Sensibility of Different Vegetables to Oxygen Deficiency and Aeration with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in the Rhizosphere. *Acta Hort.* 659.
- White, J.W., 1975. *Greenhouse Roses. Diagnosis and Remedy of Nutritional Disorders*. Roses Incorporated. 1975, 46pp
- White, J.W., 1987. Fertilization. *In: Langhans, R.W. (Ed.), Roses. Roses Incorporated, Haslett, MI, pp. 87-135.*
- Widlechner, M.P. 1981. History of utilization of *Rosa damascena*. *Economic Botany*, 35 (1), pp. 42-58.
- Wien, H.C., 1997. 'Peppers' en *The Physiology of Vegetable Crops*. CAB International.
- William, M., Davies, W., Malone, M., Jackson, M. 1995 A negative hydraulic message from oxygen deficient roots of tomato plants. *Plant Physiol.*, 109: 1017-1024
- William, M., Davies, W., Malone, M. y Jackson, M. 1995. A negative hydraulic message from oxygen deficient roots of tomato plants. *Plant Physiol.*, 109: 1017-1024.
- Williamson, R.E., 1964. The effect of root aeration on plant growth. *Soil Science Society of America Journal* 28, 86-90.
- Wu, R. & Hinckley, T.M., 2001. Phenotypic Plasticity of Syllaptic Branching: Genetic Design of Tree Architecture. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 20(5):467-485.
- Wylie, A.P., 1954. The history of garden roses. *J Royal Hort Soc.* 79, 555-71.
- Yoshida, S., Kitano, M., Eguchi, H. 1996 Water uptake and growth of cucumber plants under control of dissolved O<sub>2</sub> concentrations in hydroponics. *Acta Hort.*, 440: 199-204.
- Yoshida 1997. *Llibre 'Hydroponics'*, Savvas, pag. 274.
- Zieslin, N. & Moe, R., 1988. *Rosa. Handbook of flowering*. Vol. IV, CRC Press. Ed. A.H. Halevy. Florida. USA
- Zieslin, N. 1992 Postharvest control of vase life of rose flowers. *Acta Horticulturae* 261
- Zieslin, N., 1996. Influence of climatic and socio-economical factors on mode of cultivation and research of rose plants. *Acta Hort.* 424, 21-22.
- Zlesak, D.C., 2007. "Rose" En '*Inflower Breeding and Genetics: Issues, Challenges and Opportunities for the 21st Century*', Ed. N.O. Anderson, 695-737.



**ANEJO**



## ANEJO

### Consideraciones económicas sobre el uso de oxígeno en cultivos sin suelo

Las técnicas de cultivo sin suelo se aplican en cultivos hortícolas comestibles, cultivos de flor cortada y en los cultivos de planta ornamental. Por esta razón la difusión de los cultivos sin suelo es importante a escala mundial. En las últimas décadas la superficie de cultivo sin suelo ha aumentado considerablemente, sobre todo en los países con horticultura de tecnología desarrollada (Holanda, Francia, Israel, Italia o España). En los países mediterráneos como España las condiciones agrícolas de las zonas litorales obligan a utilizar aguas salinas para el riego de los cultivos. Además, la limitación del volumen del medio radicular y la elevada tasa respiratoria de las raíces hace que la productividad de estos cultivos quede afectada. Por tanto es necesario encontrar soluciones a estas limitaciones como la técnica de aplicación de soluciones sobresaturadas de oxígeno.

#### Consideraciones económicas

Los beneficios derivados del uso de soluciones sobresaturadas de oxígeno han de tener en cuenta el coste de la aplicación.

Para considerar en una primera aproximación la escala económica de la cuestión se estima el coste de oxígeno referido al volumen de la solución nutritiva y a la superficie cultivada.

Teniendo en cuenta la dosificación media a la que se aplica el oxígeno en los experimentos llevados a cabo (16 ppm) y tomando como precio unitario de 3 €/m<sup>3</sup> (el de compra de cantidades relativamente grandes) resulta:

$$16 \text{ mg O}_2/\text{Lsol} \times 1 \text{ g O}_2 / 1000 \text{ mg O}_2 \times 22,4 \text{ L O}_2 / 32 \text{ g O}_2 \times 3 \text{ €/}1000 \text{ L O}_2 = 0.0336 \text{ €/m}^{-3} \text{ sol}$$

Teniendo en cuenta el coste unitario de los fertilizantes solubles para preparar una solución nutritiva el coste del oxígeno es poco importante. Sí que es cierto que al coste estimado anteriormente hay que añadir la parte proporcional de amortización técnica de la instalación para la dosificación a escala agrícola. Aunque faltan datos para una estimación precisa por los experimentos realizados se entiende que el coste a escala agrícola será bajo. Será suficiente un manoreductor, una válvula de accionamiento eléctrico comandada por el propio cabezal de fertirrigación y unos difusores para la inyección directa en las tuberías principales de riego.

En cuanto al coste por unidad de superficie y tomando como referencia un consumo de agua medio durante una campaña agrícola, en un cultivo de pimiento sin suelo y protegido, de 850 L.m<sup>-2</sup>, el coste estimado del oxígeno aplicado será:

$$850 \text{ L.m}^{-2} \times 0.336 \cdot 10^{-3} \text{ € L}^{-1} = 0.02856 \text{ €/m}^2$$

Teniendo en cuenta que los gastos medios directos de un cultivo de este tipo son de unos 3€/m<sup>2</sup>, se aprecia que el sobrecoste del oxígeno suplementario es relativamente reducido.



Diciembre de 2015

Universitat de Lleida - Doctorado en Ciencia y Tecnología Agraria y Alimentaria