

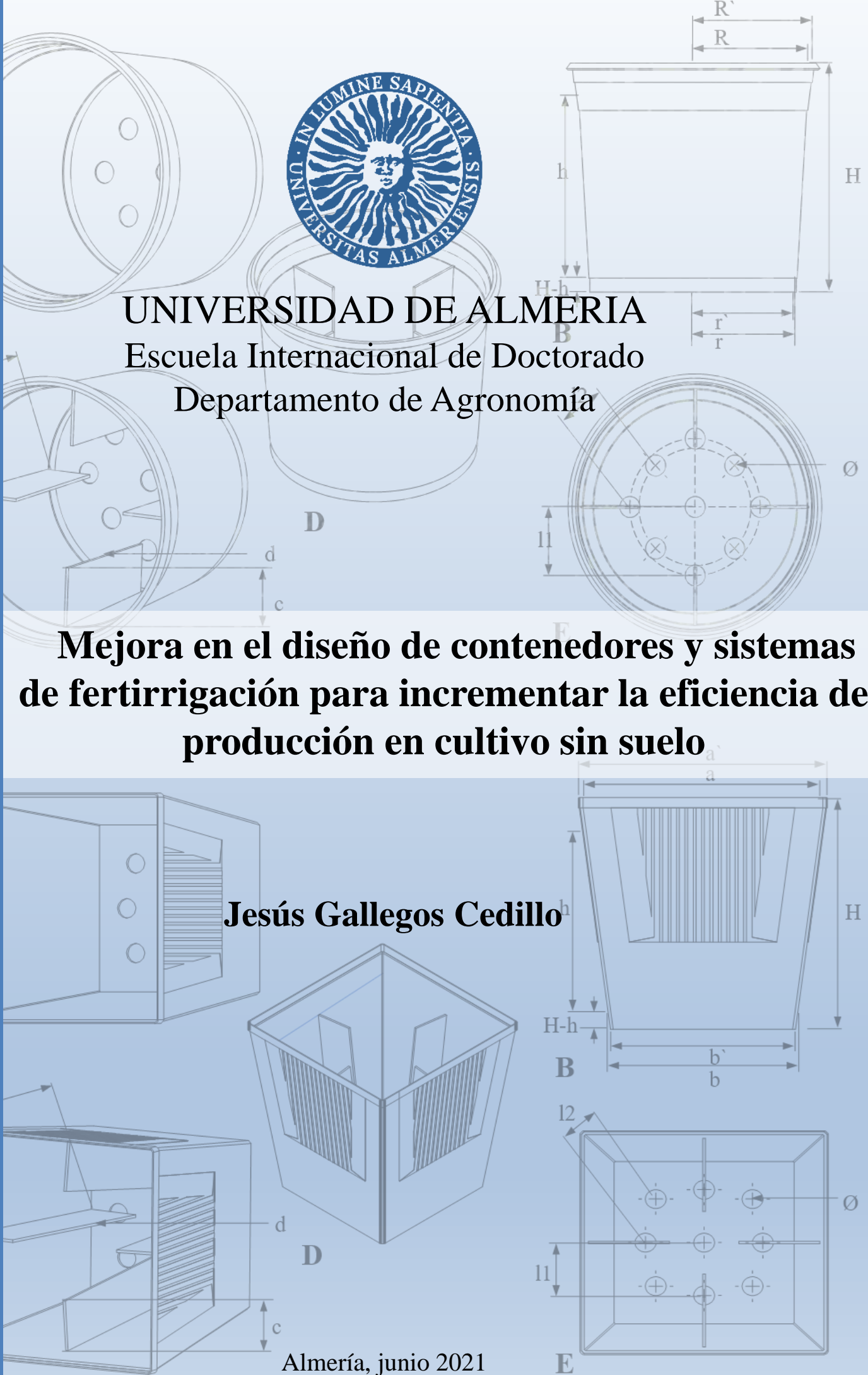


UNIVERSIDAD DE ALMERIA
Escuela Internacional de Doctorado
Departamento de Agronomía

Mejora en el diseño de contenedores y sistemas de fertirrigación para incrementar la eficiencia de producción en cultivo sin suelo

Jesús Gallegos Cedillo

Almería, junio 2021





UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado

Departamento de Agronomía

Doctorado en Tecnología de Invernadero e Ingeniería

Industrial y Ambiental

TESIS DOCTORAL

**Mejora en el diseño de contenedores y sistemas de
fertirrigación para incrementar la eficiencia de
producción en cultivo sin suelo**

Jesús Gallegos Cedillo

Almería, junio 2021



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Escuela Internacional de Doctorado

Departamento de Agronomía

Doctorado en Tecnología de Invernadero e Ingeniería
Industrial y Ambiental

TESIS DOCTORAL

**Mejora en el diseño de contenedores y sistemas de
fertirrigación para incrementar la eficiencia de producción en
cultivo sin suelo**

**Improved design of containers and fertigation systems to
increase production efficiency in soilless culture**

Memoria presentada por D. **Jesús Gallegos Cedillo** para aspirar al grado de **Doctor con
Mención Internacional** por la Universidad de Almería.

Director:

Catedrático Miguel Urrestarazu Gavilán
Departamento de Agronomía
Universidad de Almería, España

Almería, junio 2021



Departamento de Agronomía

Carretera Sacramento s/n La Cañada de San Urbano 04120 Almería, España

Dr. D. Miguel Urrestarazu Gavilán, Catedrático de Producción Vegetal, del Departamento de Agronomía de la Universidad de Almería

Informa que:

El trabajo recogido en la presente Memoria, titulada: *“Mejora en el diseño de contenedores y sistemas de fertirrigación para incrementar la eficiencia de producción en cultivo sin suelo (Improved design of containers and fertigation systems to increase production efficiency in soilless culture)*, presentada por D. **Jesús Gallegos Cedillo**, ha sido realizada bajo mi dirección y cumple con la normativa de estudios oficiales de doctorado para optar al grado de **Doctor con Mención Internacional** por la Universidad de Almería, por lo que se autoriza su presentación para que sea juzgada por el tribunal correspondiente.

Y para que así conste y surta efecto oportunos, firma el presente documento en Almería, a 23 de abril de 2021.

Fdo. Miguel Urrestarazu Gavilán

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por la concesión de financiamiento para realizar estudios de doctorado.

Al Dr. Miguel Urrestarazu Gavilán por su apoyo incondicional, sus consejos y todos sus aportes a mi formación académica, profesional y personal.

Al Dr. Joel David Flores Rivas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), México, por haberme brindado la oportunidad de realizar una estancia de investigación en el área de ecofisiología vegetal.

A mis compañeros de doctorado Cinthia y Victor Manuel, gracias por su apoyo incondicional, su dedicación y su enseñanza, sin su ayuda los experimentos plasmados en esta tesis no hubieran sido posible.

A los profesores de la Universidad de Almería, Diego Valera y Araceli Peña por sus consejos e inspiración en mi formación investigadora y profesional, especialmente por brindarme su amistad.

Dedicatoria

A mis padres, hermanos y sobrinos que me inspiran e impulsan a seguir preparándome. Gracias por su apoyo inconmensurable.

Reconocimiento

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar estudios de doctorado.

Publicaciones y otras aportaciones científicas derivadas de la tesis doctoral

Las publicaciones obtenidas directamente de la realización de esta tesis doctoral se describen con detalle a continuación.

1. Artículos

Gallegos, J., J.E. Álvaro, y M. Urrestarazu. 2020. Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. HortScience 55(6):787-794. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14954-20>

Gallegos, J., y M. Urrestarazu. 2021. Increasing root contact surface in the same container volume improves root architecture and production efficiency of vegetable crops in soilless culture. Article submitted to a journal.

2. Congresos

Gallegos-Cedillo, J., C. Nájera, V.M. Gallegos-Cedillo, y M. Urrestarazu. 2019. Efecto del tipo de contenedor en el desarrollo vegetativo en plantas de tomate injertado en cultivo sin suelo. Presentación en forma de póster en el VIII Simposio de Investigación en Ciencias Experimentales. Celebrado el 14 y 15 de noviembre de 2019 en la Universidad de Almería, Almería, España.

Pérez, A., **J. Gallegos-Cedillo,** C. Nájera, V.M. Gallegos-Cedillo, y M. Urrestarazu. 2019. Evaluación de dos formas de contenedor en el desarrollo y crecimiento del cultivo de maíz. Presentación en forma de póster en el II Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias. Celebrado el 17 de octubre de 2019 en la Universidad de Almería, Almería, España.

3. Trabajos fin de grado y trabajos fin de máster

Estudio de la morfología del contenedor para mejorar la eficiencia del cultivo sin suelo. Trabajo Fin de Máster. Gallegos Cedillo Jesús. Para obtener el título de Máster en Horticultura Mediterránea bajo Invernadero, Universidad de Almería, España. Septiembre 2017.

Influencia de la forma del contenedor en el desarrollo y crecimiento del cultivo de pepino. Trabajo Fin de Grado. Martínez Pérez Fernando. Para obtener el título de Ingeniero agrícola, Universidad de Almería, España. Julio 2018.

Influencia de la forma del contenedor en el desarrollo y crecimiento del cultivo de maíz. Trabajo Fin de Grado. Pérez Rus Ana. Para obtener el título de Ingeniero agrícola, Universidad de Almería, España. Septiembre 2018.

4. Patente

Urrestarazu, M., J. Gallegos, y J.E. Álvaro. 2020. Solicitud de patente: Modelo de Utilidad. Unidad apilable con tabiques verticales para ser usado como contenedor de cultivo. Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INAPI-Chile). Código de solicitud: SOL-202000329611-TRA (21 de junio de 2020). Universidad de Almería (66%), España; Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (33%), Chile.

Resumen

En las últimas décadas, la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente de los recursos se han convertido en los pilares fundamentales de la visión científica moderna, cuyo eje a priori es el progreso tecnológico. En este contexto, el cultivo sin suelo ha impulsado la integración de múltiples avances tecnológicos, que se han convertido en la base para mejorar la eficiencia en el uso del agua y nutrientes y disminuir la contaminación por iones nutritivos. Por su parte, el diseño de contenedores ha potenciado las ventajas del cultivo sin suelo, permitiendo obtener plantas de alta calidad, mayor potencial productivo, mejor calidad de frutas, balance hídrico en el medio de cultivo y minimizar problemas radicales de las plantas.

El objetivo general de este trabajo fue contribuir con nuevas herramientas técnicas a través del diseño de contenedores que favorezcan el uso eficiente de los recursos, la disminución contaminante de iones nutritivos, el correcto equilibrio de humedad en la relación sustrato-contenedor donde se desarrollen las raíces, y al mismo tiempo, potenciar un incremento en la distribución radical, en la calidad de planta en las etapas vegetativa y productiva, y en el rendimiento final de diversos cultivos hortícolas cultivados en sistema de cultivo sin suelo.

Para lograr el objetivo general, se plantearon tres objetivos específicos: 1) Evaluar el efecto de la morfología de cuatro tipos de contenedores cuadrados y circulares, con y sin pared vertical interna, sobre el crecimiento vegetal, la superficie radicular y la respuesta a un período de estrés por sequía en los cultivos de pepino, pimiento y tomate. Los resultados demostraron que el contenedor con paredes verticales internas favorece un incremento significativo promedio de la biomasa ($\approx 20\%$) y de la superficie de absorción de las raíces ($\approx 30-35\%$). También, duplicó o triplicó los parámetros de crecimiento de los brotes al ser sometidos a un estrés por sequía, lo que se confirma por la clara asociación de las variables analizadas con los modelos de regresión lineal simple, descrito en ambos sustratos (fibra de coco y perlita). 2) Evaluar el efecto de dos tipos de contenedores circulares con y sin paredes verticales internas sobre los parámetros de fertirrigación, absorción de agua y nutrientes, emisión de iones nutritivos, crecimiento y desarrollo vegetal, arquitectura radical, parámetros de calidad del fruto, productividad del agua y eficiencia productiva de plantas hortícolas de tomate, pimiento, pepino y melón cultivadas en sistema de cultivo sin suelo. En los cuatro cultivos estudiados, la tasa de

absorción de agua (10%), el número de frutos de la categoría comercial y total (16%) y la productividad del agua (comercial (17%) y total (20%)) de los contenedores con tabiques verticales en el interior registraron un incremento significativo promedio en comparación con los contenedores del tratamiento control. 3) Diseñar y construir un contenedor de cultivo tipo que reúna la totalidad de las funciones y exigencias que incluyen otros sistemas de forma aislada y que debe reunir un contenedor de cultivo. Los documentos de patente analizados no anticipan por sí solo todas y cada una de las características desarrolladas en el contenedor de cultivo diseñado.

Como conclusión general de este trabajo de investigación se puede decir que, las modificaciones estructurales del interior de un contenedor pueden proporcionar una significativa mejora en el comportamiento agronómico en la producción de plantas hortícolas. Estos beneficios se registran tanto en la producción, en calidad y en cantidad, como en la mejora de los insumos y el respeto por el medio ambiente. Desde el punto de vista económico, es factible optar por los contenedores con paredes interiores, ya que favorecen un mayor aprovechamiento de la inversión económica al incrementar la eficiencia productiva de los cultivos hortícolas y al mismo tiempo los beneficios económicos. En este sentido, el contenedor de cultivo diseñado y construido es novedoso, con aplicación técnica e industrial en diversidad de campos de estudio. Por tanto, el diseño del contenedor es presentado a protección intelectual en modelo de utilidad y patente.

Abstract

In recent decades, environmental sustainability and the efficient use of resources have become the fundamental pillars of the modern scientific vision, whose axis, a priori, is technological progress. In this context, soilless culture has driven the integration of multiple technological advances and has become the basis for improving water and nutrient use efficiency and reducing contamination by nutrient ions. In turn, container design has enhanced the advantages of soilless culture, making it possible to obtain high-quality plants, greater productive potential, better fruit quality, improved water balance in the growing medium, and minimising plant root problems.

The general objective of this work is to contribute new technical tools through the design of containers that efficiently use resources, reduce contaminating nutrient ions, correct humidify balance in the substrate-container relationship where roots develop, and at the same time, promote increased root distribution, plant quality in the vegetative and productive stages, and the final yield of various horticultural crops grown in soilless culture systems.

In order to achieve the general objective, three specific objectives are established: 1) To evaluate the effect of the morphology of four types of square and circular containers, with and without an internal vertical wall, on plant growth, root surface area, and response to a period of drought stress in cucumber, pepper, and tomato crops. The results showed that the container with internal vertical walls favoured a significant average increase in biomass ($\approx 20\%$) and root absorption surface ($\approx 30-35\%$). Also, it doubled or tripled shoot growth parameters when subjected to drought stress, as confirmed by the clear association of the analysed variables with simple linear regression models described in both substrates (coconut fibre and perlite). 2) To evaluate the effect of two types of circular containers, with and without internal vertical walls, on fertigation parameters, water and nutrient absorption, nutrient ion emission, plant growth and development, root architecture, fruit quality parameters, water productivity, and productive efficiency of tomato, pepper, cucumber, and melon vegetable plants grown in soilless culture systems. In the four crops studied, the water absorption rate (10%), the number of fruits in the commercial and total category (16%), and the water productivity (commercial (17%) and total (20%)) of the containers with vertical internal partitions recorded a significant average increase compared to the control treatment containers. 3) To design and build a

standard culture container that meets all the functions and requirements that other systems include in isolation and that a culture container must meet. The analysed patent documents alone do not anticipate each feature developed in the culture container design.

As a general conclusion of this research, it can be said that structural modifications to the interior of a container can significantly improve the agronomic performance of the production of horticultural plants. These benefits are recorded both in terms of production, quality, and quantity and improved inputs and environmental friendliness. From an economic point of view, it is feasible to opt for containers with inner walls, as these make the most of the economic investment by increasing the production efficiency of horticultural crops and, at the same time, increasing economic benefits. In this sense, the design and construction of the culture container is novel, with technical and industrial applications in various fields of study. Therefore, the container design analysed in this work is submitted for intellectual protection in the form of a utility model and patent.

Tabla de contenido

| | |
|-------------------------------|-------------|
| Índice general | VIII |
| Índice de figuras..... | XI |
| Índice de tablas..... | XIII |

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Resumen..... | IV |
| Abstract..... | VI |
| I. INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| 1.1. Concepto de contenedor para plantas..... | 2 |
| 1.2. Antecedentes históricos sobre el uso de contenedores | 2 |
| 1.3. Importancia de las características de los contenedores que determinan la calidad de planta | 7 |
| 1.4. Evolución de la tecnología e importancia sobre las técnicas de cultivo en la provincia de Almería | 11 |
| 1.5. Literatura citada | 17 |
| II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS | 27 |
| 2.1. Hipótesis..... | 28 |
| 2.2. Objetivo general | 28 |
| 2.3. Objetivos específicos | 29 |
| III. CAPÍTULO 1..... | 31 |
| Efecto del diseño del contenedor sobre el desarrollo vegetativo de plantas hortícolas..... | 32 |
| 3.1. Introducción | 33 |
| 3.2. Materiales y métodos | 36 |
| 3.2.1. Material vegetal..... | 36 |
| 3.2.2. Tratamientos..... | 37 |
| 3.2.3. Sistema de fertilización | 39 |
| 3.2.4. Parámetros de crecimiento de los cultivos | 39 |
| 3.2.5. Superficie radical de absorción por volumen de sustrato..... | 40 |
| 3.2.6. Prueba de estrés por sequía | 40 |
| 3.2.7. Análisis estadístico y diseño experimental | 41 |
| 3.3. Resultados y discusión | 41 |

| | |
|--|------------|
| 3.3.1. Parámetros de crecimiento de diferentes cultivos hortícolas con respecto al tipo de contenedor y al sustrato..... | 41 |
| 3.3.1.1. Efecto de la forma externa del contenedor..... | 41 |
| 3.3.1.2. Efecto de las paredes dentro del contenedor..... | 41 |
| 3.3.2. Superficie radical de absorción de acuerdo con la forma de contenedor y el sustrato..... | 43 |
| 3.3.2.1. Efecto de la morfología del contenedor..... | 43 |
| 3.3.2.2. Efecto de la presencia de las paredes dentro del contenedor..... | 44 |
| 3.3.3. Parámetros de crecimiento después de un período de estrés por sequía..... | 48 |
| 3.3.3.1. Efecto de la morfología del contenedor..... | 48 |
| 3.3.3.2. Efecto de las paredes dentro del contenedor..... | 48 |
| 3.4. Conclusiones..... | 52 |
| 3.5. Literatura citada..... | 52 |
| IV. CAPÍTULO 2..... | 59 |
| Efecto de la morfología del contenedor sobre la producción de cultivos hortícolas en cultivo sin suelo..... | 60 |
| 4.1. Introducción..... | 62 |
| 4.2. Materiales y métodos..... | 64 |
| 4.2.1. Material vegetal..... | 64 |
| 4.2.2. Tratamientos..... | 65 |
| 4.2.3. Programación de la fertirrigación..... | 66 |
| 4.2.4. Parámetros de crecimiento vegetal..... | 67 |
| 4.2.5. Control de producción..... | 68 |
| 4.2.6. Parámetros de calidad de la fruta..... | 69 |
| 4.2.7. Indicadores de calidad de planta..... | 70 |
| 4.2.8. Indicadores de productividad..... | 71 |
| 4.2.9. Diseño experimental y análisis estadístico..... | 71 |
| 4.3. Resultados y discusión..... | 72 |
| 4.3.1. Efecto sobre los parámetros de fertirriego, absorción de agua, nutrientes y emisión de nitratos..... | 72 |
| 4.3.2. Efecto sobre los parámetros vegetativos, biomasa fresca y seca..... | 73 |
| 4.3.3. Efecto sobre los parámetros de calidad de fruto..... | 77 |
| 4.3.4. Efecto sobre la producción..... | 78 |
| 4.3.5. Efecto sobre los indicadores de calidad de planta..... | 83 |
| 4.3.6. Efecto sobre los indicadores de productividad: Eficiencia en el Uso del Agua e Índice de Cosecha..... | 84 |
| 4.3.7. Análisis económico de dos tipos de contenedores sobre la productividad de diferentes cultivos hortícolas..... | 86 |
| 4.4. Conclusiones..... | 88 |
| 4.5. Literatura citada..... | 89 |
| V. CAPÍTULO 3..... | 95 |
| Diseño y mejora de las unidades de cultivo en los sistemas de cultivo sin suelo. | |
| Desarrollo de una patente..... | 96 |
| 5.1. Introducción..... | 98 |
| 5.2. Materiales y métodos..... | 100 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.1. Bases de datos utilizadas | 100 |
| 5.2.2. Prototipos CSC-HVF | 100 |
| 5.3. Resultados y discusión | 105 |
| 5.3.1. Prototipos CSC-HVF | 105 |
| 5.4. Conclusiones | 110 |
| 5.5. Literatura citada | 111 |
| VI. CONCLUSIÓN GENERAL | 115 |
| VII. ANEJO | 119 |

Índice de figuras

Introducción

Fig. 1. Evolución de las innovaciones tecnológicas (ha) y de la producción hortícola (t x 100) en Almería. Elaboración propia. Fuente: Pérez-Parra y Céspedes (2001), Camacho (2002), Baeza et al. (2009***), García et al. (2016**), Moreno (2018*), CAJAMAR (2020), Salmerón (2020) y Sancho (2020). 14

Capítulo 1

| | |
|--|----|
| Resumen gráfico | 32 |
| Fig. 1. (A y B) Contenedor de sección circular sin (⊖) y con (⊕) paredes verticales internas. (C y D) El mismo contenedor pero de sección cuadrada. Las líneas punteadas representan el área o vista de la sección transversal donde se hace el muestreo de raíces..... | 38 |
| Fig. 2. Superficie radical de absorción (cm ² /cm ³) a diferentes profundidades del contenedor, medida en la ubicación media de la pared en pepino, pimiento y tomate. A. Detalle de la sección de raíz de pimiento en fibra de coco T0 (Sin PVI) y T1 (Con PVI)..... | 45 |
| Fig. 3. Sección vertical de raíz sin (Izquierda) y con (Derecha) paredes verticales internas en fibra de coco “tomate” (A) y perlita “pimiento” (C) de acuerdo con la sección vertical a-a’ y b-b’ en los contenedores A y B de la Fig. 1. B y D son los detalles del corte donde se ubicaban convenientemente las PVI (línea vertical continua) y proporcionan una vista interna de la acumulación de raíces dentro de ambos sustratos en los contenedores. | 46 |
| Fig. 4. Área foliar de pepino (PE), pimiento (PI) y tomate (TO) sin (izquierda) y con paredes verticales internas (derecha) medida después de 8 días bajo estrés hídrico. H1, H2, H3, H4 y H5, son la primera, segunda, tercera, cuarta y quinta hoja verdadera, respectivamente. HN1, HN2, HN3, HN4 y HN5 son las hojas nuevas, el recuadro negro es la referencia de 25 cm ² | 47 |
| Fig. 5. A. Plantas de tomate sin (Izquierda) y con (Derecha) paredes verticales internos en el contenedor tras un período de estrés hídrico de 8 días. B. Las mismas plantas de A tras el corte de las hojas verdaderas preexistentes. C es el punto de corte en el tallo. H1, H2, H3, H4 y H5, son la primera, segunda, tercera, cuarta y quinta hoja verdadera, respectivamente. B1, B2, B3, B4 y B5 son los brotes foliares axilares de las hojas verdaderas primera, segunda, tercera, cuarta y quinta, respectivamente. ... | 50 |
| Fig. 6. Correlación lineal entre la superficie de contacto en el contenedor (cm ²) y el área foliar (cm ² /planta, fila superior) y el peso seco (g/planta, fila inferior) de los nuevos brotes después de la decapitación y supresión del fertirriego. Los diamantes y los triángulos indican los contenedores con fibra de coco y perlita, respectivamente. ⊖ = contenedores de sección circular sin PVI; ⊕ = contenedores de sección circular con PVI; □ = contenedores de sección cuadrada sin PVI; y ⊞ = contenedores de sección cuadrada con PVI. | 51 |

Capítulo 2

| | |
|--|----|
| Resumen gráfico | 60 |
| Fig. 1. Tratamientos: A. Contenedor control (T0), B. Contenedor con tabiques verticales internos (T1). Diseños realizados en SolidWorks® (2018). | 65 |
| Fig. 2. Sistema de control de fertirriego. | 67 |
| Fig. 3. Unidad de crecimiento de tomate (C), pimiento (D), pepino (E) y melón (F). c-c` sección transversal (ver Fig. 1) en fibra de coco en los contenedores control (T0) (izquierda) y con tabiques verticales (T1) (derecha). Recuadros 1 (ubicación de los PVI), 2, 3 y 4 indican las zonas de alta incidencia en raíz..... | 74 |
| Fig. 4. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en pimiento. | 79 |
| Fig. 5. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en pepino..... | 80 |
| Fig. 6. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en melón..... | 81 |
| Fig. 7. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en tomate..... | 82 |

Capítulo 3

| | |
|--|-----|
| Resumen gráfico | 96 |
| Fig. 1. Características del contenedor de sección circular (CSC-HVF1). (A) contenedor de superficie lisa. (B, C, D y E) contenedor con PVI, donde se indican los principales componentes del prototipo. H) altura total. R` y r`) radio superior e inferior. H-h) altura de la base. h, c y d) dimensiones de los PVI. 1, 1, 12 y Ø) dimensión de los agujeros de drenaje y de aireación. Línea continua azul indica el nivel de llenado del sustrato. | 102 |
| Fig. 2. Características del contenedor de sección cuadrada. (CSC-HVF2) Contenedor sin PVI. En (B, C, D y E) se observa un contenedor con PVI y las partes que lo constituyen. H) altura total. a`-b`) longitud superior e inferior. H-h) altura de la base. h, c y d) dimensiones de los PVI. 1, 1, 12 y Ø) dimensión de los agujeros de drenaje y de aireación. Línea continua azul indica el nivel de llenado del sustrato. | 103 |
| Fig. 3. Modelos de los prototipos de prueba diseñados en SolidWorks® (2018). (A) Contenedor de sección circular. (B) Contenedor de sección cuadrada. (1) cuerpo principal. (2) paredes verticales internas. (3) reborde superior. (4) orificios de drenaje. (5) orificios de aireación. (6) altura de base. | 104 |
| Fig. 4. Estado de la técnica de algunos de los documentos de patente analizados. A. Maceta apilable (Stutelberg y Anderson, 1977); B. Receptáculo (Clement, 1958); C. Contenedor de vivero (Manlove, 1995); D. Placa base de aireación (Rose, 2005); E. Dispositivo, especialmente para plantas (Lehmann, 2002); F. Contenedor de dos piezas con depósito de agua (Eckert 2011); G. Maceta (Nobbe, 2013); H. Maceta para cultivar un árbol (Yoon et al., 2013); I. Contenedor de cultivo de plantas (Chen, 2017); J. Maceta anti-enredo (Clou, 2014)..... | 107 |
| Fig. 5. Reproducción del modelo de sección circular (impresión 3D). A) Contenedor de superficie lisa. (B) Contenedor con cuatro paredes verticales internas. | 109 |

Índice de tablas

Introducción

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Estadísticas de distribución de superficie de tierras de cultivo (hectáreas). | 16 |
|--|----|

Capítulo 1

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Tipos de contenedores utilizados y sus características (véase la Fig. 1). | 39 |
| Tabla 2. Solución nutritiva utilizada en los cultivos durante la evaluación agronómica..... | 39 |
| Tabla 3. Área foliar (cm ² /planta) y biomasa (g/planta) de varios cultivos hortícolas versus contenedor y sustrato. | 42 |
| Tabla 4. Área de raíz (cm ² /cm ³) a diferentes profundidades del contenedor, medida según la posición de las paredes verticales internas frente al tipo de contenedor y sustrato. | 44 |
| Tabla 5. Área foliar (cm ² /planta) y biomasa (g/planta) de varios cultivos hortícolas vs contenedor y sustrato después de la decapitación parcial y estrés hídrico. | 49 |

Capítulo 2

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Descripción de las especies cultivadas por ciclo de cultivo. | 64 |
| Tabla 2. Características de los tipos de contenedores utilizados (véase la Fig. 1). | 66 |
| Tabla 3. Solución nutritiva estándar empleada durante el ciclo de cultivo. | 66 |
| Tabla 4. Clasificación de hortalizas por calibres y pesos. | 68 |
| Tabla 5. Parámetros de fertirrigación y emisión de nutrientes al medio ambiente en dos tipos de contenedores circulares y en sustrato fibra de coco, para diversos cultivos hortícolas durante el ciclo de cultivo. | 75 |
| Tabla 6. Parámetros de crecimiento vegetativo en diferentes cultivos hortícolas. | 75 |
| Tabla 7. Biomasa fresca (g/planta) de diferentes cultivos hortícolas. | 76 |
| Tabla 8. Biomasa seca (g/planta) de diferentes cultivos hortícolas. | 77 |
| Tabla 9. Parámetros de calidad de fruta en diferentes especies hortícolas. | 78 |
| Tabla 10. Efecto de la modificación de morfología del contenedor en la longitud y diámetro ecuatorial de fruto por área en el cultivo de pepino. | 83 |
| Tabla 11. Efecto de la modificación de morfología del contenedor en el diámetro transversal y longitudinal de fruto por área en el cultivo de melón..... | 83 |
| Tabla 12. Indicadores de calidad de planta. | 84 |
| Tabla 13. Indicadores de productividad. | 86 |
| Tabla 14. Balance económico en función del tipo de contenedor [con (T1) y sin (T0) adaptación] utilizado en diferentes cultivos hortícolas. | 86 |
| Tabla 15. Balance económico por cultivo hortícola. | 87 |
| Tabla 16. Balance económico en función de la solución nutritiva (agua y fertilizantes) suministrados en dos diferentes sistemas de contenedores en cuatro cultivos hortícolas. | 88 |

Table of contents

| | |
|--|------------|
| CHAPTER 2..... | 123 |
| <i>Container design affects shoot and root growth of vegetable plant.....</i> | 123 |
| Introduction..... | 125 |
| Materials and methods | 127 |
| Plant material | 127 |
| Treatments..... | 128 |
| Fertigation system | 128 |
| Crop growth parameters | 129 |
| Root surface by volume of substrate | 129 |
| Drought stress test | 130 |
| Statistical analysis and experimental design | 131 |
| Results and discussion | 131 |
| Growth parameters of different horticultural crops with respect to container type and substrate..... | 131 |
| Effect of external container shape | 131 |
| Effect of walls inside a container | 131 |
| Root surface according to container shape and substrate..... | 133 |
| Effect of external container shape..... | 133 |
| Effect of walls inside a container. | 133 |
| Growth parameters after a period of drought stress | 135 |
| Effect of container morphology | 135 |
| Effect of walls inside a container | 136 |
| Conclusions..... | 139 |
| Acknowledgement | 139 |
| Literature cited..... | 139 |
| GENERAL CONCLUSION..... | 147 |

List of Figures

Chapter 2

- Fig. 1.** (A and B) Round pot without (\odot) and with (\oplus) internal vertical walls, respectively. (C and D) The same pot but squared. (E and F) The vertical section from tomato crops in coir fiber in container A and B. a-a' y b-b' are vertical section of tomato roots by coir in pot A and B. The dotted lines represent the area or view of the cross section where root sampling is done. Continuous line indicates the filling level of the substrate in the pot (350 mL). 130
- Fig. 2.** Leaf area of cucumber (CU), pepper (SP), and tomato (TO) without (left) and with internal vertical walls (right) measured after 8 d under water stress. L1, L2, L3, L4, and L5, are the first, second, third, fourth, and fifth true leaf, respectively. LN1, LN2, LN3, LN4, and LN5 are the new leaves. Square black is the reference of 25 cm². 134
- Fig. 3.** (A) Tomato plants without (left) and with (right) vertical internal walls in the container after decapitation in the stem (point C) and a water stress period of 8 d. (B) The same plants of A after the cutting of the pre-existing true leaves. L1, L2, L3, L4, and L5, are the first, second, third, fourth, and fifth true leaf, respectively. S1, S2, S3, S4, and S5 are the axillary leaf buds of the first, second, third, fourth, and fifth true leaves, respectively. 137
- Fig. 4.** Linear correlation between the contact surface in the container (cm²) and the leaf surface (cm²/plant, upper row) and the dry weight (g/plant, lower row) of the new shoots after decapitation and suppression of the fertigation. The diamonds and triangles indicate the containers with coir fiber and perlite, respectively. \odot = circular section containers without internal walls; \oplus = circular section containers with internal walls; \square = square section containers without internal walls; and \boxplus = square section containers with internal walls. 138

List of Tables

Chapter 2

- Table 1.** Types of containers used and their characteristics (See Fig. 1). 128
- Table 2.** Leaf area (cm²/plant) and biomass (g/plant) of several horticultural crops vs. container and substrate. 132
- Table 3.** Root area (cm²/cm³) at different deeps of container measured on position of internal vertical walls vs. type of container and substrate. 133
- Table 4.** Leaf area (cm²/plant) and biomass (g/plant) of several horticultural crops vs. container and substrate after partial decapitation and water stress. 135

Acrónimos y abreviaturas

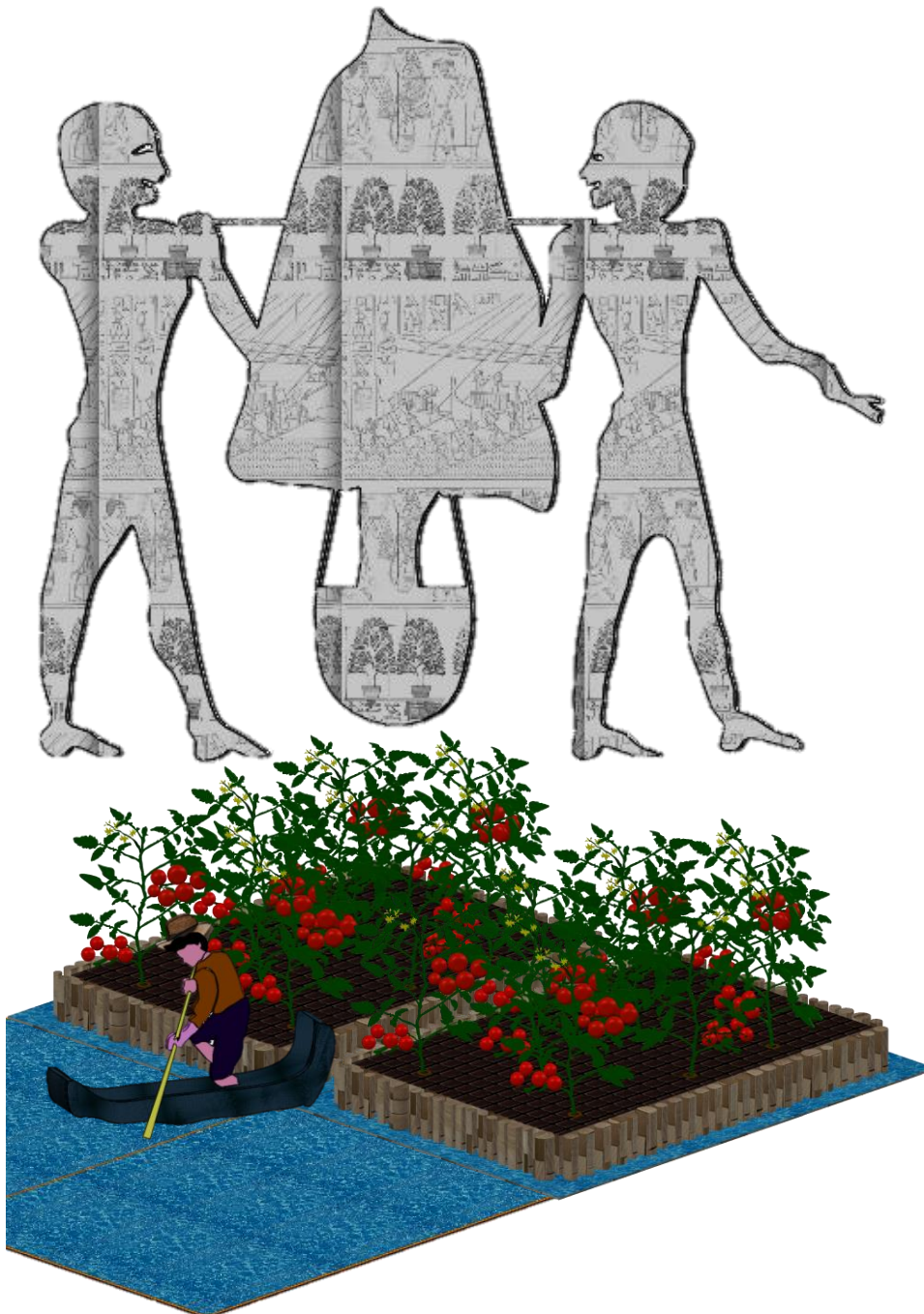
| | |
|---------|--|
| AIPH | International Association of Horticultural Producers |
| ANOVA | Análisis de Varianza |
| AR | Agua de Riego |
| CSC-HVF | Contenedor de Sección Circular/Cuadrada con Paredes Verticales para ser usado en Horticultura y Viveros Forestales |
| CC | Contenedor de Cultivo |
| COITAAL | Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas de Almería |
| CONACYT | Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología |
| CP | Calidad de Planta |
| CSS | Cultivo Sin Suelo |
| cv | Cultivar |
| DC | Diseño de Contenedor |
| EUA | Eficiencia en el Uso del Agua |
| FEPEX | Federación Española de Asociaciones de Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas |
| FIAPA | Fundación para la Investigación Agraria de la Provincia de Almería |
| IC | Índice de Cosecha |
| ICD | Índice de Calidad de Dickson |
| IFAPA | Investigación y Formación Agraria y Pesquera |
| LSD | Least Significant Difference |
| MAPA | Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación |
| MC | Medio de Cultivo |
| PVI | Tabique o Pared Vertical Interna |
| SAR | Sistema de Asistencia al Regante |
| SN | Solución Nutritiva |
| UC | Unidad de Cultivo |

Unidades

Unidades de base y unidades derivadas seleccionadas del Sistema Internacional expresadas en términos de unidades de base.

| Magnitud | Nombre | Símbolo |
|---------------------------------|---|----------------------------------|
| Longitud | Metro | m |
| | Centímetro | cm |
| | Milímetro | mm |
| Masa | Kilogramo | kg |
| | Gramo | g |
| Tiempo | Segundo | s |
| | Minuto | min |
| | Hora | h |
| Cantidad de sustancia | Mol | mol |
| Área | Metro cuadrado | m ² |
| | Centímetro cuadrado | cm ² |
| Volumen | Metro cúbico | m ³ |
| | Centímetro cúbico | cm ³ |
| | Litro | L |
| | Mililitro | mL |
| Temperatura | grado Celsius | °C |
| Absorción de agua | Litro por metro cuadrado | L/m ² |
| Absorción de nutrientes | Milimoles por metro cuadrado | mmol/m ² |
| Área foliar | Centímetro cuadrado por planta | cm ² /planta |
| Biomasa | Gramos por planta | g/planta |
| Conductividad eléctrica | Decisiemens por metro | dS/m |
| Contenido de sólidos solubles | Grados Brix | °Brix |
| Densidad de planta | Planta por metro cuadrado | planta/m ² |
| Eficiencia en el Uso del Agua | Kilogramo por metro cúbico | kg/m ³ |
| Emisión de iones contaminantes | Gramos por metro cuadrado | g/m ² |
| Rendimiento productivo | Kilogramo por metro cuadrado | kg/m ² |
| Superficie radical de absorción | Centímetro cuadrado por centímetro cúbico | cm ² /cm ³ |

I. INTRODUCCIÓN GENERAL



Introducción general

1.1. Concepto de contenedor para plantas

Actualmente en el mercado de contenedores, existen una importante variedad de formas de contenedores para el cultivo de plantas hortícolas, ornamentales, forestales y de horticultura urbana, siendo los más utilizados los contenedores de material plástico de sección circular y cuadrada ahusados de arriba a abajo, por su aspecto ligero y económico. La mayor parte de ellos están diseñados con funciones aisladas y exigencias específicas. Los cultivos en macetas o contenedores tienen en común producir plantas en un volumen restringido, donde se desarrolla el sistema radical (Lemaire et al., 2005). Desde sus inicios y con el paso del tiempo, han evolucionado sus características de funcionalidad, pasando de ser signo de estatus social (Raviv et al., 2019) hasta su función primaria de contener una cantidad de sustrato, que a su vez abastece a las raíces con agua, aire, nutrientes minerales, y además, brinda soporte a las plantas (Landis, 1990). En este sentido, un contenedor para plantas se puede definir como un recipiente “receptáculo” de diversas dimensiones y características, capaz de contener sustrato que provee soporte físico a las plantas, permite abastecer y renovar la suficiente cantidad de oxígeno, agua y nutrientes, y a su vez, evacuar los excedentes de agua y drenaje necesarios para mantener un adecuado equilibrio de humedad en el medio de cultivo (MC), además, cumple con otros requerimientos especiales o funciones operativas (promover la relación raíz-biomasa aérea), económicas (costo-disponibilidad-cantidad) y de manejo (rigidez, resistencia, apilado, transporte, remoción, etc.), para producir plantas de calidad.

1.2. Antecedentes históricos sobre el uso de contenedores

El origen del uso de contenedores para el cultivo de plantas se establece hace 4000 años, como hecho documentado de acuerdo con las pinturas murales encontradas en el templo Deir-el-Bahari en Egipto (Matkin et al., 1957). A inicios del siglo XVII, las plantas en contenedores son introducidos a Europa para ser cultivados en invernaderos especiales “Orangeries”, estableciendo así el primer registro de plantas en contenedores con suelo como medio de cultivo, utilizados por personas de estatus social para proporcionar valor estético como objetos decorativos (Raviv et al., 2019). Sin embargo, el estudio de plantas en contenedores se desarrolló a finales del siglo XVII (Hewitt, 1966) con la introducción de nuevos enfoques de estudio, como el cultivo en agua (cultivo sin

suelo), la nutrición mineral y la fisiología de plantas (Urrestarazu, 2015). El primer estudio registrado del cultivo en agua sin sustrato sólido en diversos recipientes lo realizó Woodward (1699), quien trabajó con distintas fuentes de agua en plantas herbáceas, y concluyó que el agua es solo un portador de materia terrestre, elemento esencial para la producción de vegetales. Posteriormente, Duhamel du Monceau (1758) trabajando con plantas de cebada en contenedores, señaló que el agua, incluso el agua destilada, contenía partículas capaces de nutrir a las plantas e indicó la importancia del nitrógeno. A principios del siglo XIX, De Saussure (1804) trabajando con plantas de *Polygonum persicaria* y *Bidens cannabina*, y utilizando como tratamiento, agua destilada y soluciones nutritivas de varias sales, descubrió que los nitratos eran necesarios además de otras sales minerales, y que la absorción de minerales no era proporcional a la absorción de agua y que los solutos no eran absorbidos de forma similar a las condiciones del suelo, lo que sugiere que las raíces difieren en la permeabilidad de varios solutos (Kramer y Boyer, 1995). Cuarenta años más tarde Wiegman y Polstorff encontraron que las plantas obtienen la totalidad de los minerales necesarios a través de la absorción de las raíces, como complemento a los constituyentes presentes en las semillas (Hewitt, 1966). Años más tarde, Sachs (1860) precursor de la fisiología vegetal moderna y Knop (1865) padre de la cultura del agua, demostraron que las plantas podían ser cultivadas hasta la madurez en sistema de cultivo de solución simple, la nombrada “nutricultura”, que no difiere de las técnicas modernas de investigación en nutrición mineral y fisiología vegetal (Asher y Edwards, 1983; Urrestarazu, 2015).

La creciente industrialización del siglo XIX generó enormes transformaciones a nivel mundial, especialmente en términos de agricultura. El uso generalizado del vidrio y su adaptación como material de cerramiento en invernaderos permitió su construcción a mayor escala, especialmente por agricultores de viveros forestales y cultivadores de plantas ornamentales en contenedores (López y Salinas, 2001). Tan solo en Holanda para 1904 ya se tenía registro de 30 ha derivadas del desarrollo gradual de esta técnica de cultivo y casi 7000 ha para 1970 (Gómez-López, 1993), cuyo incremento fue favorecido por la construcción del invernadero Venlo a base de acero y cristal en 1937, adecuado para el desarrollo de diversos cultivos.

A principios del siglo XX, junto con el establecimiento del uso económico del agua “cultura del agua”, se reafirmó la acuicultura que hasta entonces ya había sido probada,

y fueron impulsados los cultivos hidropónicos para la producción en intensivo por Gericke en 1929, que unía las técnicas de estudios experimentales de laboratorio y las técnicas de operación práctica, y que definió como, el arte y la ciencia de la producción de plantas en medios de cultivos líquidos “solución nutritiva” (Gericke, 1929, 1937 y 1938). No obstante, existen registros que señalan que la técnica de plantas cultivadas sin suelo ya habían sido desarrollada por los babilonios durante el siglo VI a. C., con la construcción de los jardines colgantes de la antigua Babilonia (Beltrano y Gimenez, 2015), y por la cultura azteca en México, en el período 1325-1521 d. C., época considerada como la edad de oro de las chinampas o jardines flotantes (Ebel, 2020; Nájera, 2020), e incluso el historiador William Prescott describe estos métodos de cultivo, como “asombrosas islas errantes de verdor, repletas de flores y verduras, que se mueven como balsas sobre las aguas”.

Durante la década de los años treinta se dio uno de los primeros usos de contenedores a gran escala para la producción de plantas forestales, como parte del Proyecto Forestal de las Grandes Llanuras de Estados Unidos, que consistió en la plantación de franjas de protección forestal cultivadas en un sistema de macetas de papel alquitranado, como medio para mitigar las severas condiciones ambientales de la época (Landis, 1990).

Hacia el año 1945, tras las inclemencias de la segunda guerra mundial, se produce un cierto desarrollo en las técnicas de cultivo sin suelo (CSS), debido a la necesidad de producir y proveer mayor cantidad de alimento a tropas americanas estacionadas en islas rocosas, y la búsqueda de nuevas alternativas de producción (Baixauli y Aguilar, 2002). En consecuencia, se inicia la expansión de los cultivos hidropónicos comerciales a escala mundial en países como Italia, España, Francia, Inglaterra, Alemania, Suecia, la URSS e Israel (Resh, 2002). A finales de los años 50 y principios de los años 60 se desarrolló el uso de film plástico para la producción de plantas agrícolas, impulsando aún más los cultivos hidropónicos (Orzolek, 2017). Al mismo tiempo, surgen nuevas tecnologías para la distribución eficiente del agua de riego en las plantas, la empresa israelí (Netafim) introdujo emisores con diseño de laberinto a partir de tubos de plástico que incrementan la eficiencia de aplicación (Hochmuth, 2017). La demostración agrícola del riego por goteo se llevó a cabo en 1963 por Norm Smith y Richard Chapin al cultivar plantas de melón en Long Island, Nueva York, E.U.A., encontrando que el laberinto redujo la velocidad de aplicación de riego, facilitó la retención de humedad y disminuyó la

obtención de los emisores, además, favoreció la uniformidad de aplicación, fundamental en el suministro de fertilizantes (Lamm et al., 2007).

El avance de la producción comercial de plantas en contenedor tuvo su punto álgido a principios de los años sesenta (Cantliffe, 2008), vinculado con la comprensión de los requerimientos nutricionales, manejo y uso de suelo, mezclas de suelo y sustratos, control de enfermedades y del manejo de organismos patógenos (Baker, 1957). Los contenedores más comunes desarrollados en la primera generación de contenedores para producción de plantas fueron construidos con plástico rígido, paredes lisas y pequeños orificios de drenaje, y algunos otros, con pared blanda. Ambos modelos en la práctica dieron lugar a raíces en espiral (Rune, 2003) y disminución en el desarrollo radical (Liptay y Edwards, 1994). La evolución de los materiales de fabricación y el rápido éxito alcanzado por los modernos contenedores de plástico supuso un incremento en el desarrollo de nuevos modelos de contenedores que tomaban como base prototipos que ya habían sido probados. Durante la década de los años sesenta y setenta, se examinaron diversos diseños de contenedores a través de patentes industriales, diseñados con características y funciones operativas específicas, algunos de ellos construidos para promover un sistema radical sano y disminuir los problemas mecánicos de las raíces, y otros simplemente para brindar mayor facilidad en el manejo (Gallegos et al., 2020).

A finales de los años setenta, surge la segunda generación de modelos de contenedores, que contempla en el diseño nervaduras verticales en las paredes interiores para tratar los problemas de espiralización de raíces (Spencer, 1972, 1977, 1991) y dirigir las hacia el fondo sobre el eje vertical de la pared del contenedor (Cooley, 2011). Estudios posteriores, demostraron que las ranuras o nervaduras disminuyen el espiralamiento de raíz y mejora la calidad de planta (Rune, 2003; Amoroso et al., 2010; Gallegos et al., 2020). Durante el mismo período, el cultivo sin suelo resurge progresivamente como alternativa a los costosos métodos químicos de desinfección del suelo y residuos de plantas (De Boodt et al., 1974), reemplazando el suelo tradicional por diversos sustratos de origen orgánico (turba, fibra de coco, espuma de poliuretano, etc.) y mineral (perlita, lana de roca, arena, etc.), donde la capacidad de penetración de las raíces de las plantas, la tasa de transporte de agua, nutrientes y oxígeno, son más altas, debido principalmente a sus características fisicoquímicas (Gallegos-Cedillo, 2019). El gran despegue alcanzado por los sistemas de cultivo sin suelo, probablemente se debe al desarrollo de nuevos plásticos

como material de cubierta de invernaderos, de riego y para el diseños de contenedores, y al desarrollo de los sistemas de riego localizado, incorporación de equipos de cómputo con programadores de riego y desarrollo de nuevos sustratos. Abad et al. (2004) describe el término sustrato o medio de cultivo a todo material sólido distinto del suelo, natural o de síntesis, mineral u orgánica que colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, el papel de soporte para la planta y que puede intervenir o no en el proceso de nutrición vegetal. Actualmente, la fibra de coco es el medio de cultivo (MC) más utilizado al no implicar consideraciones ambientales y económicas importantes en el manejo (Raviv et al., 2019).

La tercera generación de contenedores se inició a principios de la década de 1980. Estos contenedores contemplaban en su diseño diferentes soluciones para la poda de raíces laterales de las plántulas de viveros forestales. Algunos contenedores incluían en la superficie interna hendiduras o rendijas verticales (Rune, 2003); otros, combinaban la poda aérea con la función clásica de Spencer (1972), que resultaba en un sistema radical más natural.

Actualmente en el mercado existe una importante variedad de formas de contenedores para el cultivo de plantas. Sin embargo, hasta la fecha, se ha prestado poca atención al efecto integrado de cada una de las características en relación con la funcionalidad (primaria y específica), que debe cumplir un contenedor para plantas. Por su parte, Landis et al. (2014) indica que el contenedor perfecto aún está lejos de ser desarrollado, porque este depende del cultivo a establecer y el propósito específico. Hoy en día, los campos de aplicación más importantes que dominan la producción del cultivo de plantas sin suelo son los cultivos ornamentales y hortícolas en invernadero, la producción en contenedores de plantas forestales en viveros al aire libre, y finalmente la horticultura urbana donde prácticamente todas las plantas se cultivan en contenedores con algún tipo de sustrato (Raviv et al., 2019).

La aplicación integrada de los avances científicos y tecnológicos descritos anteriormente, permiten incrementar las ventajas de las técnicas de producción de plantas de calidad en contenedores, así como, de los sistemas de cultivo relacionadas con estas técnicas. El diseño de contenedores ha aumentado las ventajas de esta técnica: producir plántulas de mejor calidad en contenedores individuales, minimizar las deformaciones

radicales, mecanizar la producción, facilitar la siembra y permitir la gestión de los parámetros de nutrición mineral. Sin embargo, queda margen para desarrollar mejoras.

1.3. Importancia de las características de los contenedores que determinan la calidad de planta

El crecimiento de las raíces es un fenómeno complejo. Durante al menos dos siglos, la respuesta de las raíces a la impedancia mecánica en el interior de un contenedor ha atraído interés de horticultores, biólogos de plantas y físicos de sustratos (Atwell, 1993; Araki y Iijima, 2001), mientras que el crecimiento de las raíces como función de múltiples variables, sigue estando lejos de ser completamente comprendido. Las consecuencias de las limitaciones del volumen utilizable por las raíces en un contenedor serán más o menos importante dependiendo del cultivo (Lemaire et al., 2005), debido principalmente al grado de adaptación del sistema radical, gestión del riego y de la fertilización. Particularmente, el confinamiento de las raíces dentro de un volumen limitado puede reducir el crecimiento de las raíces que está directamente relacionado con el rendimiento de la planta (Raviv et al., 2019). No obstante, todos los sistemas de producción de plantas en contenedores coinciden en la importancia de promover un sistema radical vigoroso, lo que favorece una mejor transmisión de nutrientes a la parte aérea, y enriquece el crecimiento general de las plantas. Por ejemplo, las especies forestales, están directamente relacionadas con la capacidad de crecimiento del sistema radical, que determina su aptitud de sobrevivencia y desarrollo en campo (Landis, 1990). Algunas plantas ornamentales, no implican necesariamente un cultivo de raíces, porque su propósito es producir flores o follaje en un tiempo determinado. Además, el número de especies cultivadas con sistema radical pivotante es menor y la multiplicación vegetativa se emplea de forma más importante. Sin embargo, un sistema radical sano, mejora el crecimiento, la supervivencia, el vigor, la uniformidad y el valor estético de las plantas (Lemaire et al., 2005). En las plantas hortícolas cultivadas sin suelo, el volumen limitado se considera una ventaja para la ubicación de las raíces, debido a que permite controlar las necesidades ambientales, demanda de agua y los parámetros de nutrición vegetal (Urrestarazu, 2015). Lemaire et al. (2005) recomiendan adoptar un volumen de contenedor adecuado con la duración del cultivo, para disminuir las deformaciones de raíz. A su vez, el desarrollo de enfoques eficientes para mejorar las características del contenedor puede beneficiar el desarrollo del sistema radical de las plantas, como se ha demostrado en la práctica, utilizando nuevas

unidades de crecimiento diseñadas con paredes verticales en el interior (Gallegos et al., 2020).

Las dimensiones y características de los contenedores tienen consecuencias en el crecimiento y desarrollo de la parte aérea, y en la calidad del sistema radical de las plantas. Múltiples estudios indican que el tamaño, volumen, diámetro, forma, profundidad, orificios de drenaje, color e incluso la rugosidad de la pared interna del contenedor afectan las características de crecimiento de las plantas, particularmente la calidad de su sistema radical (Spencer, 1972; Lemaire y Papin, 1989; Liptay y Edwards, 1994; Rune, 2003; Lemaire et al., 2005; South et al., 2005; Yano et al., 2018).

Una de las características más importantes de un contenedor es su tamaño. Desde un punto de vista conceptual, el tamaño se vincula a qué tan pequeño o grande es el contenedor en términos de su volumen. El tamaño del contenedor influye en la optimización y eficiencia en términos de producción y calidad de plantas en semilleros hortícolas (Vavrina, 1995; Nesmith y Duval, 1998), y al mismo tiempo permite reducir los costos de propagación por planta (Dufaul y Waters, 1985). Nesmith y Duval (1998) documentaron que el crecimiento de las raíces y de los brotes, la acumulación y reparto de biomasa, la fotosíntesis, el contenido de clorofila en las hojas, las interacción hídrica de las plantas, la absorción de nutrientes, la respiración, la floración y el rendimiento se ve afectado por la restricción de las raíces y el tamaño del contenedor. Por su parte, Tonutti y Giulivo (1990) trabajando con plantas de kiwi en contenedores de diferente volumen, encontraron que las tasas de crecimiento de brotes y de raíces son interdependientes, y que la intensidad de crecimiento se reduce proporcionalmente con la reducción del tamaño del contenedor y del aumento de la densidad de plantación. Weston y Zandstra (1986) y Weston (1988) trabajando con tomate y pimiento, reportaron que las plantas cultivadas en contenedores de mayor volumen generan un aumento de altura, área foliar, cantidad de raíz, biomasa seca, y en campo favorecen la cosecha temprana de frutos, el incremento del rendimiento y el peso de frutos, en comparación con las plantas cultivadas en contenedores de menor volumen. Además, Xu et al. (2001) y Oagile et al. (2016) registraron que el número total de frutos cuajados y el rendimiento total de pimiento y tomate fueron superiores cuando se utilizan contenedores de mayor tamaño.

De manera general, se ha observado que cuanto más grande sea el contenedor, mayor será la capacidad de respuesta de las plantas para incrementar la superficie foliar, la

biomasa y la cantidad de raíz. Sin embargo, en el manejo del fertirriego se debe considerar la disposición del contenedor, porque con un llenado de sustrato idéntico, los contenedores con un eje horizontal predominante tienen la ventaja de una mayor retención de agua puesto que la columna de presión de agua es más pequeña (Ansorena, 1994). A medida que disminuye la altura del contenedor, la proporción de agua-aire en el espacio poroso del sustrato disminuye, y la amplitud de este cambio depende de las propiedades del medio de cultivo (Biderback y Fonteno, 1987). Además, una baja uniformidad del fertirriego limita el desarrollo y distribución radical de las plantas (Urrestarazu, 2015; Gallegos-Cedillo, 2017), esto depende de la correcta ubicación de los goteros, puntos de drenaje en la unidad de cultivo (UC) (Van Noordwijk y Raats, 1980), tipo de sustrato, tiempo de fertirriego y los patrones de distribución de la solución nutritiva (SN) (Gallegos-Cedillo, 2019). Determinados ensayos tanto en sustratos minerales (García-Lozano et al., 1997; Mascarini et al., 2012) como en sustratos orgánicos (Verloot y Kamoun, 1981) han comprobado que no existen diferencias en la producción al usar volúmenes diferentes dentro de límites razonables si se ajusta el manejo del fertirriego a las características del sustrato y contenedor (Gallegos-Cedillo, 2017). Por ejemplo, Heller et al. (2015) trabajando con plantas de lechuga cultivadas en contenedores de diversas geometrías (estrechos y altos hasta contenedores anchos y cortos), encontraron que la forma no afecta el rendimiento cuando los contenedores son de idéntico volumen. Sin embargo, cuando la planta se coloca en un contenedor durante un período prolongado, la profundidad del contenedor determina la longitud de la raíz principal, y por tanto, la capacidad de la planta para sobrevivir en condiciones limitantes; misma que se mide a partir de la estimulación del crecimiento aéreo y radical después del trasplante en diversos árboles leñosos (Biran y Eliassaf, 1980; Pemán et al., 2006; Chirino et al., 2008; Landis et al., 2014; Trinidad et al., 2015).

Otras propiedades importantes del contenedor son el color y la capacidad aislante del material de fabricación que afecta la temperatura del sustrato. Esto se debe principalmente a la absorción y conducción de calor que resulta de un ambiente de alto intercambio energético, donde los materiales aislantes oscuros y delgados incrementan la absorción y la conducción de calor, inhibiendo así el crecimiento de las plantas e inevitablemente la muerte en casos extremos (Lemaire et al., 2005; Landis et al., 2014).

Un factor fundamental en el diseño de las características del contenedor es la rugosidad de la superficie interna (Gallegos-Cedillo, 2017). Por ejemplo, Gilman et al. (2003) y Amoroso et al. (2010) documentaron que las plantas cultivadas en contenedores de sección transversal redonda, de material plástico y de superficie lisa, generan resultados más severos en el crecimiento de raíz en espiral e impedimento al crecimiento horizontal, provocando disminución en la calidad de las plantas y baja capacidad de supervivencia postrasplante. No obstante, el problema del espiralamiento ha sido parcialmente resuelto colocando un obstáculo orientado verticalmente sobre la superficie de los contenedores. Estas costillas, crestas, hendiduras, ranuras, tabiques o paredes funcionan como encauzador de la raíz, llevándolas hacia la perforación de los orificios de drenaje, donde entran en contacto con el aire, y se realiza de manera natural la poda aérea (Spencer, 1972; Spencer, 1977; Landis, 1990; Landis et al., 2014). Kinghorn (1974) recomienda costillas de 2 mm de altura sobre la cara interna del contenedor. En un estudio sobre plántulas de tomate, Liptay y Edwards (1994) reportaron que la morfología de las paredes del contenedor en plántulas de tomate afectaba al crecimiento radical. Por su parte, Gallegos et al., (2020) trabajando con plantas de pepino, pimiento y tomate cultivadas en sustratos fibra de coco y perlita, en cultivo sin suelo, reportaron que la adición de tabiques al interior de diferentes morfologías de contenedores no solo disminuyen los problemas mecánicos de las raíces, sino que además, favorecen la producción de biomasa aérea e incrementan el peso total radical que permite una importante capacidad de afrontar un estrés hídrico, y por tanto, superar un potencial estrés postrasplante.

La elección del contenedor está condicionada en parte por la integración de las características funcionales y requisitos específicos en el diseño, que conducen a un sistema radical vigoroso y mejoran la calidad de la planta. Por otra parte, se debe considerar las características específicas del sistema radical (Keever y Cobb, 1987), la duración del cultivo en el contenedor previsto (Lemaire et al., 2005), y la combinación del medio de cultivo (Bilderback y Fonteno, 1987) con su fertirrigación (Gallegos-Cedillo, 2019). Por todo esto, el estudio de las plantas cultivadas en contenedores se ha convertido en objeto de observación más sistemática y detallada por parte de los investigadores de diversas disciplinas académicas.

1.4. Evolución de la tecnología e importancia sobre las técnicas de cultivo en la provincia de Almería

Durante todo el siglo XIX, la agricultura fue la principal actividad económica de la población española, caracterizada por prácticas agrícolas tradicionales, con escasa tecnificación, escaso uso de tecnologías, y bajos rendimientos (Clar, 2008). Agricultura claramente deficitaria. En pocos años, sin embargo, este panorama experimentó profundos cambios estructurales. Durante el decenio de 1950, en el conjunto de España inicia una etapa de apertura económica con las políticas del desarrollismo, que se tradujo en creación de pueblos de colonización, desarrollo de planes de regadíos, nuevos agricultores, concentración parcelaria, creación del servicio de extensión agraria, formación de técnicos, asociacionismo, enseñanza agrícola básica, etc. (Abad et al., 1994; Díaz, 2008; Lorén, 2014). En este sentido, Andalucía fue determinante, convirtiéndose, años más tarde en la principal región productora de frutas y hortalizas de toda España, de donde sobresale la provincia de Almería por su volumen de producción del 56% del total de Andalucía, debido principalmente al clima mediterráneo y a las modernas técnicas de producción, cada vez más eficientes y sostenibles. Por su parte, Andalucía concentra el 29% de la producción nacional (>28 millones de t), lo que la convierte en el principal productor de frutas y hortalizas a nivel nacional, y favorece a España como primer productor de la UE con más del 25% de la producción europea y sexto lugar a nivel mundial (MAPA, 2019a).

En Almería, la transición de la agricultura tradicional a la agricultura moderna ha experimentado un desarrollo singular, fundamentada en cuatro fases de cambio: Fase I: agricultura tradicional, Fase II: inicio de la agricultura intensiva, Fase III: madurez hacia un modelo agroindustrial, y Fase IV: consolidación del modelo intensivo de producción hortícola (Fig. 1).

Durante la primera fase de desarrollo, hacia 1956, se introdujeron unidades piloto de explotación (20 ha) donde se utilizaron diferentes técnicas de producción, como las técnicas tradicionales, el enarenado (1956) y estructuras sencillas con abrigos plásticos (1960), impulsadas por Instituto Nacional de Colonización (INC) (Tolón y Lastra, 2010). Todo ello con éxito limitado. Años más tarde, en 1963, se realizó la construcción del primer invernadero compuesto por una protección de película de polietileno sobre una estructura sencilla y ligera “estructura tipo parral” (Invernadero tipo Almería). El éxito

de la combinación del enarenado e invernadero fue tal, que supuso una expansión inesperada en la agricultura moderna (Valera et al., 2016).

La década de 1970 trajo consigo múltiples y permanentes incorporaciones de innovaciones técnicas y tecnológicas que permitieron el desarrollo paulatino del sistema productivo y comercial primario, incrementado la producción y la calidad de los productos hortícolas, dando paso a la estructuración del sistema comercial. El punto de inflexión se produjo en 1986, cuando España entró en el mercado común Europeo, acompañada de nuevas rutas de comercialización que favorecieron la salida de productos hortícolas (López, 2000). Algunas de las mejoras tecnológicas fueron: el uso de nuevas variedades de semillas híbridas, la introducción del sistema de riego localizado, la adecuación de nuevos plásticos de cerramiento, la implementación de maquinarias (Valera et al., 2016; Salmerón, 2020), el injerto de hortalizas, la polinización natural, y el uso de nuevas técnicas de producción como el sistema de cultivo sin suelo (Urrestarazu, 2015). De esta manera, se asentaron las bases de la agricultura intensiva que se constituye en un sistema tecnológico dinámico, que concentra grandes cantidades de agua, mano de obra y agroquímicos, aumentando así el rendimiento y el ciclo productivo, y la obtención de dos hasta tres cosechas anuales, de ahí el término “cultivos forzados” (Tolón y Lastra, 2010).

Durante los años siguientes, el sistema de producción mostró una fuerte posición competitiva con un ritmo de crecimiento excepcional, evolucionando a un modelo basado en ventajas competitivas y dinámicas, alrededor de la que se construye un importante clúster agroindustrial, en el que los competidores luchan no solo contra un sector, sino contra un sistema (Aznar, 2011). Por su parte, algunas empresas comienzan una tímida pero comprometida interrelación con los centros de investigación, apostando por el desarrollo tecnológico y sobre todo por la innovación, con el claro objetivo de aumentar su presencia fuera del entorno nacional y en conjunto obtener una mayor modernización del sector a través de la investigación, desarrollo, la transferencia de tecnología y la formación del sector agrario (Aznar et al., 2014). Asimismo, el sistema acoge nuevas mejoras tecnológicas como la automatización del riego, el control climático, la adaptación de mejoras estructurales de invernadero y nuevas variedades de tomate “larga vida” (Camacho, 2002; Valera, 2016; Salmerón, 2020). Mientras que algunos sistemas ya probados asumen mayor importancia en el entorno local e internacional, como los

sistemas de fertirriego, el cultivo enarenado y el cultivo sin suelo logrando una expansión importante a nuevas condiciones geográficas y climáticas (Moreno, 2008; Urrestarazu, 2015; García et al., 2016). De esta manera, la agricultura intensiva de Almería pasa de ser un “desierto” y se convierte en la mayor transformación agraria de España, conocida mundialmente como “la huerta de Europa” (Fernández y Pizarro, 1981; Camacho, 2002). Simultáneamente, y acorde a la concienciación mundial sobre la presión masiva ejercida sobre los recursos naturales a consecuencia del uso desmedido de fertilizantes minerales y plaguicidas sintéticos, el sector toma conciencia de la sostenibilidad del sistema y adopta nuevas técnicas de producción como la agricultura ecológica y el control biológico (Tolón y Lastra, 2010).

A partir de los primeros años del presente siglo, el modelo intensivo de producción hortícola de Almería se centra en la integración del sistema de innovación y la investigación de calidad, que son dos elementos clave de su crecimiento y consolidación (Galdeano-Gómez et al., 2011; Aznar et al., 2014). En el aspecto técnico se incorpora al sector la luminotecnia hortícola muy importante en determinadas explotaciones como la producción de flores y de plántulas en semilleros, o en nuevos cultivos, como los microgreens, el forraje verde hidropónico, las microalgas y los cultivos medicinales (Nájera, 2020). Al mismo tiempo, se impone la adaptación de herramientas digitales y la renovación de tecnologías probadas, por nuevas o por actualizaciones mejoradas (Moreno, 2018), que según Shumpeter (1942) generan cambios radicales y/o progresivos. De forma adicional, se logra una importante expansión del control biológico y de la producción en ecológico, debido principalmente, al creciente interés del consumidor por productos más sanos y el bienestar del planeta (Salmerón, 2020). Algunos de los hitos o acontecimientos tecnológicos más influyentes en el crecimiento de la producción intensiva bajo plástico en Almería se indican en la Fig. 1. En la que se observa un incremento progresivo de la producción sin importar la ralentización de la superficie de invernaderos de los últimos años (incrementada en 1% de 2019 a 2020). Por su parte, la superficie de riego por goteo tiene un incremento paralelo a la evolución de la superficie invernada. También, se registra una clara tendencia creciente de la superficie de agricultura ecológica y del control biológico. Así mismo, se recogen diferentes estimaciones de la evolución de la superficie del cultivo sin suelo (1,9%), de la utilización de los programadores de riego, de tensiómetros (10%) y de sondas de succión (5%).

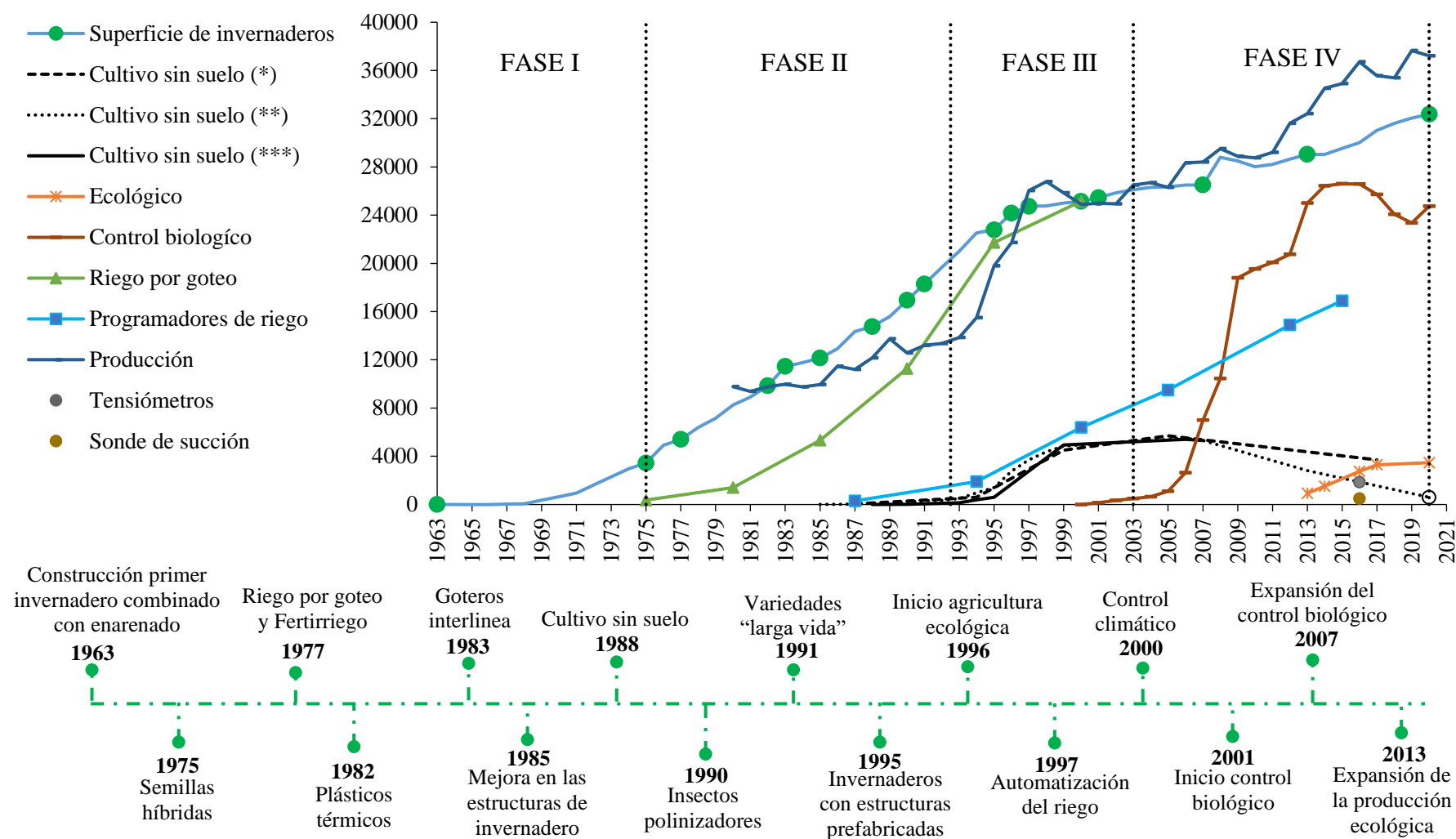


Fig. 1. Evolución de las innovaciones tecnológicas (ha) y de la producción hortícola (t x 100) en Almería. Elaboración propia. Fuente: Pérez-Parra y Céspedes (2001), Camacho (2002), Baeza et al. (2009***), García et al. (2016**), Moreno (2018*), CAJAMAR (2020), Salmerón (2020) y Sancho (2020).

La constante evolución de las incorporaciones tecnológicas ha favorecido al sector en dos aspectos principalmente. Por un lado, ha mejorado los rendimientos de la producción de forma sostenida en el tiempo, aunado a la expansión de un mercado de productos hortícolas, en el contexto de una creciente apertura comercial en el mercado europeo (Salmerón, 2020). Y por otro lado, ha favorecido la transformación general del sistema tradicional basado en ventajas tipo absolutas a un modelo clasificado como un “milagro agrícola” fundamentado en ventajas de tipo dinámico (Mota et al. 1996; Downward y Taylor, 2007). Desde un punto de vista medioambiental, el “mar de plástico” se consolida como un importante sistema que se une contra el cambio climático, debido a que funge como amortiguador del calentamiento global “efecto albedo”, y a su vez, la gran cantidad de especies cultivadas en su interior, actúan como sumideros de dióxido de carbono (CO₂) (Campra et al., 2008).

En la actualidad, la superficie cultivada de Almería ha crecido un 3,1% respecto a la campaña 2018/2019, alcanzando una superficie cultivable de 60699 ha en la campaña 2019/2020 (CAJAMAR, 2020), que corresponde el 49% del total de la superficie de Andalucía, estimado en 123390 ha (MAPA, 2019b) (Tabla 1). Los principales cultivos de acuerdo con la superficie de producción son: el pimiento con 11936 ha de cultivo, seguido por sandía (10671 ha), tomate (8633 ha), lechuga (7674 ha), calabacín (7611 ha), pepino (4900 ha), melón (2650 ha), berenjena (2391 ha) y judía verde (190 ha), respectivamente (CAJAMAR, 2020).

En el litoral de Almería, existen aproximadamente 32368 ha de invernadero (CAJAMAR, 2020). De las que se estima que existen 3469 ha bajo las técnicas de cultivo ecológico, y aproximadamente 600 ha al sistema de cultivo sin suelo (Sancho, 2020) (Fig. 1). Sin embargo, el cultivo sin suelo se ha ralentizado en la última década, probablemente debido al incremento de la superficie de cultivo en ecológico (García, 2016; Salmerón, 2020), al retorno de cultivar bajo las técnicas del “enarenado” aprovechando las nuevas tecnologías, a la evolución del injerto de hortalizas (Gallegos-Cedillo, 2019) y/o a la disminución de la superficie utilizable en el que se desarrolle actividad agraria (Valera et al., 2016). No obstante, todo usuario del cultivo sin suelo ha dado un salto de calidad técnica, debido a que le ha permitido comprender el manejo de la fertirrigación, y aplicarlo a sistemas agrícolas tradicionales, como el enarenado y/o el mismo suelo que suponen un menor desembolso económico (Moreno, 2018).

Hoy en día, en Almería los sectores de aplicación más importantes que dominan el cultivo y producción de plantas sin suelo son los cultivos ornamentales y hortícolas en invernadero, la producción de plantas forestales en contenedores en viveros al aire libre y la jardinería urbana donde habitualmente todas las plantas crecen en contenedores con algún tipo de sustrato (Tabla 1). Aunque en Almería, se ha mencionado que la superficie de cultivo sin suelo (CSS) ha disminuido (García et al., 2016; Sancho, 2020). Cabe mencionar que la profunda transformación del sector agrario que ha experimentado refrenda el protagonismo de la producción de planta en semilleros hortícolas que representa un 6% de los 1188 productores de planta hortícola registrados en toda España (Nájera, 2020). Sin embargo, la producción de planta de buena calidad exige una serie de prácticas e intervenciones hortícolas importantes, donde algunos de los factores a considerar son: la elección cuidadosa del sustrato, el régimen apropiado de temperaturas, la gestión correcta de la fertirrigación, la elección del tamaño adecuado de contenedor, y una combinación apropiada de manejo y de las técnicas de control de crecimiento y endurecimiento. Las principales especies que se producen son: calabacín, pepino, tomate, pimiento, melón, berenjena, sandía y judía (MAPA, 2019b).

Tabla 1. Estadísticas de distribución de superficie de tierras de cultivo (hectáreas).

| | España | Andalucía | Almería |
|--|---------------|------------------|----------------|
| Superficie geográfica | 50595729 | 8758200 | 877300 |
| Superficie total de tierra de cultivo | 16770364 | 3641081 | 177799 |
| Superficie cultivada | 380510 | 123390 | 60699 |
| Superficie bajo plástico | 74300 | 59821 | 49226 |
| Superficie de invernaderos | 53800 | 38431 | 32368 |
| Viveros | 20583 | 2640 | 601 |
| Flores y plantas ornamentales | | | |
| Total flores | 1303 | 431 | 20 |
| Total plantas ornamental | 4921 | 527 | 287 |
| Esquejes | 98 | - | - |
| Total | 6224 | 958 | 307 |
| Bajo plástico | | | |
| Flores | 917 | 350 | 18 |
| Plantas ornamental | 1408 | 406 | 225 |
| Total | 2325 | 756 | 242 |

Elaboración propia. Fuente: Hübner (2019), MAPA (2019b), CAJAMAR (2020).

Desde un punto de vista económico, el cultivo de plantas en contenedor es muy importante. A nivel mundial, la producción de flores y plantas en contenedor en el año 2019 fue de 35500 millones de € (745000 ha). A nivel europeo, el valor de la producción de plantas y flores fue de 11000 millones de € (60000 ha), de las que España aporta 775 millones de € (6224 ha) (Hübner, 2019).

En Almería, el sector de planta ornamental y flor cortada ha incrementado el valor de las exportaciones un 6% (38378486 €), respecto al año 2018, siendo destacable el valor de las exportaciones de plantas de interior con 20343447 € (FEPEX, 2020). Según datos del anuario estadístico del 2019, la provincia destina 242 ha de invernaderos al cultivo de flor cortada y planta ornamental, de las que 225 ha son para plantas ornamentales y 18 ha para flores, respectivamente (Tabla 1).

Aunque existen estudios basados en los efectos de la nutrición mineral (Urrestarazu, 2015; Dixon, 2019), del riego y de la rugosidad interna de alvéolos en bandejas de semillero (Liptay y Edwards, 1994), sobre el crecimiento, el desarrollo y la distribución radical en plantas hortícolas, ornamentales o plantas forestales (Spencer, 1972; Amoroso et al., 2010). Existe poca información sobre el diseño de contenedores, donde se indique el incremento del área de raíz con un mismo volumen de sustrato-contenedor a través de la adición de paredes verticales en el interior. No obstante, al incrementar la superficie de contacto de las raíces dentro de los límites espaciales de la pared del contenedor con un mismo volumen sustrato, se puede derivar algún beneficio.

1.5. Literatura citada

- Abad, B.M., M.P. Noguera, y B.C. Carrión. 2004. Los sustratos en los cultivos sin suelo, p. 113-158. En: M. Urrestarazu (coord.). Tratado de cultivo sin suelo, 3rd ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Abad, B.C., D.J.L. García, y C.C. Muñoz. 1994. La agricultura española en el último tercio del siglo XX: principales pautas evolutivas, p. 69-125. En: J.M. Sumpsi (coord.). Modernización y cambio estructural en la agricultura española. Serie Estudios. MAPA, Madrid, España.
- Amoroso, G., P. Frangi, R. Piatti, F. Ferrini, A. Fini, y M. Faoro. 2010. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. HortScience 45:1824-1829.
- Ansorena, M.J. 1994. Sustratos: propiedades y caracterización. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Araki, H. y M. Iijima. 2001. Deep rooting in winter wheat: rooting nodes of deep roots in two cultivars with deep and shallow root systems. Plant Prod. Sci. 4:215-219.

- Asher, C.J. y D.G. Edwards. 1983. Modern solution culture techniques, p. 94-119. In: A. Läuchli, y R.L. Bielecki (eds). Inorganic plant nutrition. Encyclopedia of plant physiology (New series), vol 15. Springer, Berlin, Heidelberg, Alemania.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33:27-40.
- Aznar, S.J.Á. 2011. El clúster agroindustrial de la horticultura intensiva de Almería: surgimiento, dinámica y perspectivas. *Cuaderno Estud. Agroalimentarios* 2:199-217.
- Aznar, S.J.A. G.E. Galdeano, y L.J.J. Tapia. 2014. Innovación y Centros de Investigación en la agricultura intensiva de Almería. *Cuaderno Estud. Agroalimentarios* 6:205-227.
- Baeza, C.R., C.E. Medrano, y R.F. Alonso. 2009. Requerimientos técnicos en instalaciones de riego localizado en cultivos hortícolas sin suelo, p. 04-05. En: *Boletín Trimestral de Información al Regante*. SAR. IFAPA, Junta de Andalucía, España.
- Baixauli, S.C. y O.J.M. Aguilar. 2002. Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias, p. 01-110. Generalitat Valenciana, Valencia, España.
- Baker, K.F. 1957. The U.C. System for producing healthy container-grown plants through the use of clean soil, clean stock, and sanitation, p. 1-332. University of California, Division of Agricultural Sciences. C.A. USA.
- Beltrano, J. y D.O. Gimenez, 2015. Cultivo en hidroponía, p. 01-181. Editorial de la Universidad Nacional de la Plata (EDULP), Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Bilderback, T.E. y W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5(4):180-182.
- Biran, I. y A. Eliassaf. 1980. The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Scientia Hort.* 12:183-193.
- CAJAMAR, 2020. Análisis de la campaña hortofrutícola de Almería. Campaña 2019/2020. Cajamar Caja Rural. Servicio de Estudios Agroalimentarios de Cajamar, Almería, España.
- Camacho, F.F. 2002. España, huerta de Europa = España, orchard of Europe. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.

- Campra, P., M. García, Y. Cantón, y A. Palacios-Orueta. 2008. Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain. *J. Geophys. Res. Atmos.* 113: D18109.
- Cantliffe, D.J. 2008. Plug technology: horticultural revolution. In: *Chron. Horticult. Acta Hort.* 48(4):7-10.
- Chirino, E., A. Vilagrosa, E.I. Hernández, A. Matos, y V.R. Vallejo. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *For. Ecol. Mgt.* 256:779-785.
- Clar, E. 2008. Más allá de 1936: la crisis de la agricultura tradicional española en perspectiva, 1900-1975. *Ager. Rev. Estud. Despob. Desarro. Rural* 7:112-149.
- Cooley, J.N. 2011. Plant container. U.S. Patent No. 7,954,277 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- De Boodt, M., O. Verdonck, y I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37:2054-2063.
- De Saussure, N.T. 1804. *Recherches chimiques sur la végétation*. Chez la Ve. Nyon, Paris, Francia.
- Díaz, J.F.J. 2008. Estudio de caso del poniente almeriense, globalización de la horticultura. *Papers. Rev. Sociol.* 90:83-104.
- Dixon, G.R. 2019. Horticultural science-a century of discovery and application. *J. Horticult. Sci. Biotechnol.* 94:550-572.
- Downard, S.R. y R. Taylor. 2007. An assessment of Spain's Programa AGUA and its implications for sustainable water management in the province of Almería, southeast Spain. *J. Environ. Manage.* 82(2):277-289.
- Dufault, R.J. y L. Waters. 1985. Container size influences broccoli and cauliflower transplant growth but not yield. *HortScience* 20(4):682-684.
- Duhamel du Monceau, H. L. 1758. *La physique des arbres, ou il est traite de l'anatomie des plantes et de l'economie vegetale pour servir d'introduction au traite complet des bois et des forets*. P. H. L. Guerin Pub. Paris, Francia.

- Ebel, R. 2020. Chinampas: An urban farming model of the aztecs and a potential solution for modern megalopolis. *HortTechnology* 30(1):13-19.
- FEPEX, 2020. Exportación / Importación española de flores y plantas. Federación Española de Asociaciones de Productores y Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas Vivas. Revisado el 23/12/2020.
- Fernández, L.O. y C.A. Pizarro. 1981. Almería: la técnica del “enarenado” transforma un desierto. *Rev. Estud. Agro-Soc.* 115:31-70.
- Galdeano-Gómez, E., J.A. Aznar-Sánchez, y J.C. Pérez-Mesa. 2011. The complexity of theories on rural development in Europe: An analysis of the paradigmatic case of Almería (south-east Spain). *Sociol. Ruralis* 51(1):54-78.
- Gallegos-Cedillo, J. 2017. Estudio de la morfología del contenedor para mejorar la eficiencia del cultivo sin suelo. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Almería, España.
- Gallegos, J., J.E. Álvaro, y M. Urrestarazu. 2020. Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience* 55(6):787-794.
- Gallegos-Cedillo, V.M. 2019. Effect of fertigation on productivity parameters through mineral nutrition in soilless culture. Ph.D. Dissertation. Almeria University, Almeria, Spain. 182.
- García, G.M., L.A. Céspedes, P.J. Pérez, y M. Lorenzo. 2016. El Sistema de producción hortícola protegido de la provincia de Almería. IFAPA, Junta de Andalucía, España.
- García-Lozano, M., I. Escobar, M. Guzmán, M. Urrestarazu, y M.C. Salas. 1997. Evaluación de diferentes parámetros en cultivo de perlita para distintas especies hortícolas en invernadero. *Acta Hortic.* 18(4):519-525.
- Gericke, W.F. 1929. Aquiculture-A means of crop production. *Amer. J. Bot.* 16:862.
- Gericke, W.F. 1937. Hydroponics-Crop production in liquid culture media. *Science* 85:177-178.
- Gericke, W.F. 1938. Crop production without soil. *Nature* 141:536-540.
- Gilman, E. F., J. Grabosky, A. Stodola, y M.D. Marshall. 2003. Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *J. Arboric.* 29(4):231-236.

- Gómez-López, J.D. 1993. Cultivos de invernadero en la fachada Sureste Peninsular ante el ingreso en la C.E., p. 01-392. Serie Estudios. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, España.
- Heller, H., A. Bar-Tal, S. Assouline, K. Narkis, S. Suryano, A. de la Forge, M. Barak, H. Alon, M. Bruner, S. Cohen, y D. Tsohar. 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study. *Irrig. Sci.* 33:53-65.
- Hewitt, E.J. 1966. Sand and water culture methods use in the study of plant nutrition, p. 01-625. 2nd ed. Technical Communication No. 22 (revised). Commonwealth Agricultural Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Malling, Maidstone, Kent. Farnham Royal, Inglaterra.
- Hochmuth, G. 2017. Drip irrigation, p. 79-105. In: M. Orzolek (ed.). A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture, William Andrew, Elsevier.
- Hübner, S. 2019. International statistics flowers and plants, Vol. 67. International Association of Horticultural Producers (AIPH). Horticulture House, Chilton, Oxford, OXII ORN UK.
- Keever, G.J. y G.S. Cobbs. 1987. Effects of containers volume and fertility rate on growth of two woody ornamentals. *HortScience* 22(5):891-895.
- Knop, W. 1865. Quantitative untersuchungen über die Ernährungsprozesse der Pflanzen. *Landwirtsch Vers. Stn.* 7:93-107.
- Kramer, P.J. y J.S. Boyer. 1995. Water relations of plants and soil, p. 01-509. Academic press. San Diego, California. USA.
- Lamm, F.R., J.E. Ayars, y F.S. Nakayama. 2007. Microirrigation for crop production. Design, operation, and management. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Landis, T.D. 1990. Containers and growing media, p. 45-85. In: T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, y J.P. Barnett (eds.). The container tree nursery manual, vol. 2. Agricultural Handbook 674. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.

- Landis, T.D., T. Luna, y R.K. Dumroese. 2014. Containers, p. 123-140. In: K.M. Wilkinson, T.D. Landis, D.L. Haase, B.F. Daley, y R.K. Dumroese (eds.). Tropical Nursery Manual: A guide to starting and operating a nursery for native and traditional plants. Agriculture Handbook 732. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Lemaire, F. y J.L. Papin. 1989. Influence of the physical characteristics of substrate on the root systems of ornamental plants grown in pots and containers. *Agronomie* 9:795-801.
- Lemaire, F., A. Dartigues, L.M. Rivière, S. Charpentier, y P. Morel. 2005. Cultivos en macetas y contenedores. Principios agronómicos y aplicaciones. 2nd ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Liptay, A. y D. Edwards. 1994. Tomato seedling growth in response to variation in root container shape. *HortScience* 29:633-635.
- López, G.J. y A.J. Salinas. 2001. Efectos ambientales y tecnología en el sistema de cultivo forzado, p. 67-85. En: J.A. Salinas (ed.). El sector agrario y agroalimentario de Almería ante el siglo XXI: evolución y perspectiva de nuestra agricultura en el año 2000. Producción integrada: incidencia de las nuevas normativas de residuos de plaguicidas sobre la horticultura almeriense. Instituto de Estudios Almerienses, Madrid, España.
- López, C.D. 2000. España-Unión Europea: los esfuerzos de una década de integración. *Invest. Geog.* 42:173-191.
- Lorén, Z.J. 2014. Evolución de la agricultura. S. XX-Actualidad. Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Agrícolas (COITAAL). 01-15.
- MAPA, 2019a. Cifras del sector de frutas y hortalizas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- MAPA, 2019b. Anuario de estadísticas. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Mascarini, L., G. Lorenzo, H. Svartz, S. Pesenti, y S. Amado. 2012. Container size and growing media affects water use efficiency in a *Gerbera jamesonii* cut flower crop. *Rev. Bras. Hort. Ornam.* 18:71-77.

- Matkin, O.A., P.A. Chandler, y K.F. Baker. 1957. Components and development of mixes, p. 86-107. In: K.F. Baker (ed). The U.C. System for producing healthy container-grown plants through the use of clean soil, clean stock, and sanitation, University of California, Division of Agricultural Sciences. C.A. USA.
- Moreno. 2018. Transfer of innovation for sustainable fertigation in Mediterranean horticulture: the Almeria case. FERTINNOWA, Aguadulce Congress Hall, Almería, España. 01-12.
- Mota, J.F., J. Peñas, H. Castro, y J. Cabello. 1996. Agricultural development vs. biodiversity conservation: the Mediterranean semiarid vegetation in El Ejido (Almería, southeastern Spain). *Biodivers. Conserv.* 5(12):1597-1617.
- Nájera, V.C. 2020. Evaluation of certain quality and quantity factors regarding solar radiation spectra in plants. Ph.D. Dissertation. Almeria University, Almeria, Spain. 171.
- NeSmith, D.S. y J.R. Duval. 1998. The effect of container size. *HortTechnology* 8(4):495-498.
- Oagile, O., P. Gabolemogwe, C. Matsuane, y T. Mathowa. 2016. Effect of container size on the growth and development of tomato seedlings. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 5(4):890-896.
- Orzolek, M. 2017. A guide to the manufacture, performance, and potential of plastics in agriculture, William Andrew, Elsevier.
- Pemán, J., J. Voltas, y E. Gil-Pelegrin. 2006. Morphological and functional variability in the root system of *Quercus ilex* L. subject to confinement: consequences for afforestation. *Ann. For. Sci.* 63:425-430.
- Pérez-Parra, J.J. y A.J. Céspedes. 2001. Análisis de la demanda de inputs para la producción en el sector de cultivos protegidos de Almería, p. 1-102. En: G.I.M. Cuadrado (ed.). Estudio de la demanda de inputs auxiliares: producción y manipulación en el sistema productivo agrícola almeriense. FIAPA, Almería, España.
- Raviv, M., J.H. Lieth, y A. Bar-Tal. 2019. Soilless culture. Theory and practice. 2nd ed. Academic Press.

- Resh, H.M. 2002. Cultivos hidropónicos. Nuevas técnicas de producción [Hydroponic crops. New production techniques], 5th ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fenn.* 37:333-342.
- Sachs, J. 1860. Berichte über die physiologische Tätigkeit an der Versuchstation in Tharandt. IV. Vegetationsversuche mit ausschluß des bodens über die nährstoffe und sonstigen ernährungsbedingungen von mais, bohnen und anderen pflanzen. *Landwirtsch Vers. Stn.* 2:219-268
- Salmerón, A.M.G. 2020. Almería's fruit and vegetable competitive advantage and the growth of GDP per capita. *Small Bus. International Review* 4(2):18-29.
- Sancho, G.E. 2020. Hidroponía, el sistema óptimo para producir súper alimentos. *Horticultura* 305:30-69.
- South, D.B., S.W. Harris, J.P. Barnett, M.J. Hains, y D.H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. *For. Ecol. Mgt.* 204:385-398.
- Spencer, H.A. 1972. Planting from the book. *For. Chron.* 48(5):240-241.
- Spencer, H.A. 1977. Container for seedlings. U.S. Patent No. 4,057,932. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-16.
- Spencer, H.A. 1991. Book-type container for raising seedlings. U.S. Patent No. 4,998,378. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Tolón, B.A. y B.X. Lastra. 2010. La agricultura intensiva del Poniente Almeriense: diagnóstico e instrumentos de gestión ambiental. *M+A (Madr.)*. 8:18-40.
- Tonutti, P. y C. Giulivo. 1990. Effect of available soil volume on growth of young kiwi plants. *Acta Hort.* 282:283-294.
- Trinidad, O.S., H.J. Vargas, A. Aldrete, U.J. López, y G.A.M. Fierros. 2015. Substrate and container size over the development of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. at the nursery. *Rev. Mex. Cienc. For.* 6:94-113.
- Urrestarazu, M. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía, p. 1-267. Mundi-Prensa, Madrid, España.

- Valera, D.L., L.J. Belmonte, F.D. Molina, y A. López. 2016. Greenhouse agriculture in Almería. A comprehensive techno-economic analysis. Cajamar Caja Rural, Almería, España.
- Van Noordwijk, M. y P.A.C. Raats. 1980. Drip and drainage systems for rockwool cultures in relation to accumulation and leaching of salts. Proc. 5th Intl. Congr. Soilless Cult. The Netherlands. 279-287.
- Vavrina, C.S. 1995. An introduction to the production of containerized vegetable transplant, p. 01-14. Coop. Ext. Serv., Bul. 302. University of Florida, Gainesville. FL.
- Verlodt, H. y S. Kamoun. 1981. Influence du volume des sacs et de l'addition de fumier decompose sur le comportement d'une culture de tomate en sac boudin a base d'une graminee marine *Posidonia oceánica* L. del. Acta Hortic. 126:263-272.
- Weston, L.A. 1998. Effect of flat cell size, transplant age, and production site on growth and yield of pepper transplants. HortScience 23:709-711.
- Weston, L.A. y B.H. Zandstra. 1986. Effect of root container size and location of production on growth and yield of tomato transplants. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 111:498-501.
- Woodward, J. 1699. II. Some thoughts and experiments concerning vegetation. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 21(253):193-227.
- Xu, G., S. Wolf, y U. Kafkafi. 2001. Interactive effect of nutrient concentration and container volume on flowering, fruiting, and nutrient uptake of sweet pepper. J. Plant Nutr. 24(3):479-501.
- Yano, T., A. Morisaki, S. Ito, y M. Kitano. 2018. A generalized linear model to predict the growth of potted seedlings of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marcow.) under different initial plant conditions, environmental conditions, and pot size. Hort. J. 87:490-498.

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS



Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis

A menudo, las raíces crecen a lo largo de la superficie de los contenedores y, por lo tanto, una mayor superficie puede aumentar el crecimiento y la distribución de raíces; sin embargo, existe poca información sobre el diseño de la morfología de contenedor que resultan en un aumento del área de raíz en contenedores con un mismo volumen que tienen paredes verticales en el interior. En este contexto, se puede derivar algún beneficio de incorporar un aumento en la superficie de contacto entre el contenedor y la raíz que crece dentro de los límites espaciales de las paredes del contenedor.

En este sentido, se plantea la siguiente hipótesis:

- El aumento del área y la mejor distribución del sistema radical, la disminución de la impedancia mecánica de las raíces, conocida como “espiralización”. Así como, el incremento de la eficiencia de producción de biomasa y de fruta en plantas hortícolas se debe a la adición de paredes verticales internas en los tipos de contenedores (cuadrados y circulares) que incrementan la superficie total de contacto de las raíces en la relación sustrato-medio de cultivo en un mismo volumen.

2.2. Objetivo general

- Contribuir con nuevas herramientas técnicas a través del diseño de contenedores que favorezcan el uso eficiente de los recursos, la disminución contaminante de iones nutritivos, el correcto equilibrio de humedad en la relación sustrato-contenedor donde se desarrollen las raíces, y al mismo tiempo, potenciar un incremento en la distribución radical, en la calidad de planta en las etapas vegetativa y productiva, y en el rendimiento final de diversos cultivos hortícolas cultivados en sistema de cultivo sin suelo.

2.3. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la morfología de cuatro tipos de contenedores cuadrados y circulares, con y sin pared vertical interna, sobre el crecimiento vegetal, la superficie radicular y la respuesta a un período de estrés por sequía en los cultivos de pepino, pimiento y tomate.
- Evaluar el efecto de dos tipos de contenedores circulares con y sin paredes verticales internas sobre los parámetros de fertirrigación, absorción de agua y nutrientes, emisión de iones nutritivos, crecimiento y desarrollo vegetal, arquitectura radical, parámetros de calidad del fruto, productividad del agua y eficiencia productiva de plantas hortícolas de tomate, pimiento, pepino y melón cultivadas en sistema de cultivo sin suelo.
- Diseñar y construir un contenedor de cultivo tipo que reúna la totalidad de las funciones y exigencias que incluyen otros sistemas de forma aislada y que debe reunir un contenedor de cultivo.

III. CAPÍTULO 1

*Efecto del diseño del contenedor sobre el
desarrollo vegetativo de plantas
hortícolas*



Efecto del diseño del contenedor sobre el desarrollo vegetativo de plantas hortícolas

Jesús Gallegos ^{a*}, Juan E. Álvaro ^b, Miguel Urrestarazu ^a

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, E-04120 Almería, España

^bPontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Calle San Francisco s/n, La Palma, Quillota, Chile

Revista: HortScience

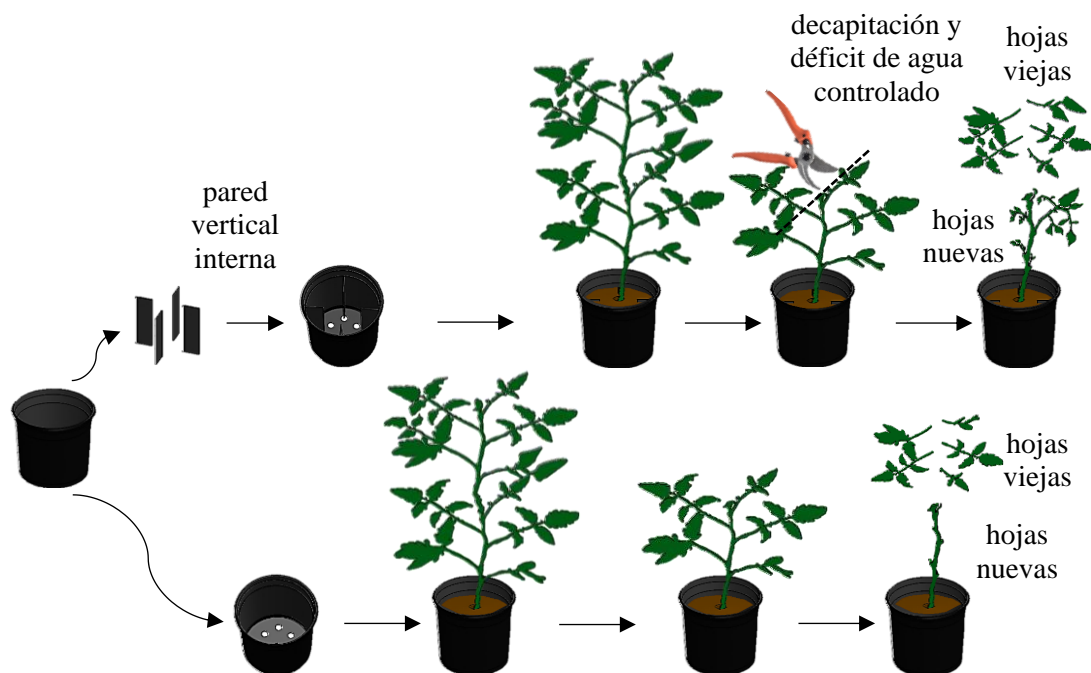
Factor de impacto (JCR, 2020): 0,906

Categoría: Horticultura

Posición de la revista dentro de la categoría 2020: (17/36)

Cuartil: Q2

Resumen gráfico



Resumen

La respuesta del crecimiento de raíces en contenedores se ha estudiado en las últimas décadas. El objetivo fue evaluar el efecto de cuatro tipos de contenedores sobre el crecimiento de raíces y brotes. Los contenedores fueron dos formas, circulares y cuadrados, y en algunos contenedores se colocaron paredes verticales internas (PVI) que aumentaron la superficie interna del contenedor con dos sustratos: perlita y fibra de coco. Se trasplantaron plántulas de pepino, pimiento y tomate. Se realizaron dos experimentos: crecimiento vegetativo y estrés por sequía por decapitación parcial y un período sin fertirriego. Después de la decapitación, se midieron el área foliar preexistente y nueva, la biomasa seca y fresca de brotes, hoja, tallo y raíz. Los resultados revelaron que el tipo de contenedor no tuvo efecto, ni hubo diferencias significativas entre sustratos. Los contenedores con PVI exhibieron un aumento en la biomasa y la superficie radicular. La superficie de contacto total con el sustrato de los cuatro tipos de contenedores estuvo estrechamente relacionada con el crecimiento de las plantas registrado. Por lo tanto, las PVI no solo disminuyen los problemas mecánicos de las raíces al evitar la formación de raíz en espiral, sino que también favorecen la producción de biomasa en las plantas vegetales y aumentan sustancialmente la raíz, lo que permite a las plantas gestionar el déficit de agua y mejorar potencialmente el estrés postrasplante.

Palabras clave: pared vertical interna, superficie de raíz, forma de contenedor, cultivos hortícolas, impedancia de raíz

3.1. Introducción

La respuesta de las raíces a la impedancia mecánica ha intrigado a los horticultores, biólogos de plantas y físicos de sustratos durante al menos dos siglos (Atwell, 1993; Araki y Iijima, 2001), mientras que el modelo de crecimiento de las raíces en función de múltiples variables en un contenedor sigue estando lejos de ser completamente comprendido. Las industrias Spencer-Lemaire intentaron diseñar un contenedor que incluyera los beneficios de otros sistemas, como plántula extraíble con cepellón (economía de espacio), superara las deficiencias de otros como exceso de raíces en espiral, y se incluyeron ranuras en el diseño, ya que se creía que reduciría el espiralado de las raíces; esto se confirmó después en la práctica (Spencer, 1972). El diseño de contenedores (DC) ha aumentado las ventajas de esta técnica: producir plántulas de mejor

calidad en contenedores individuales, minimizar las deformaciones radicales, mecanizar la producción, facilitar la siembra y permitir el control de los parámetros de nutrición mineral. Sin embargo, queda margen para desarrollar mejoras.

El sustrato, fertilización y la fertirrigación en cultivos en contenedor, son algunos de los múltiples aspectos que pueden afectar el crecimiento radicular y, posteriormente, el crecimiento aéreo de una planta.

Múltiples estudios indican que el tamaño, volumen, forma, profundidad, color e incluso la rugosidad de la pared interna de un contenedor afecta las características de crecimiento de las plantas, particularmente la calidad de su sistema radical (Spencer, 1972; Lemaire y Papin, 1989; Liptay y Edwards, 1994; Rune, 2003; Lemaire et al., 2005; South et al., 2005; Yano et al., 2018).

La morfología del contenedor es uno de los factores primordiales a considerar, porque su diseño determina las características morfológicas y fisiológicas de las plantas, principalmente en término de su sistema radical (Spencer, 1972; Landis, 1990; Aphalo y Rikala, 2003; Domínguez-Lerena et al., 2006; Sánchez-Aguilar et al., 2016).

Con un llenado de sustrato idéntico, los contenedores con un eje horizontal predominante tienen la ventaja de una mayor retención de agua porque la columna de presión de agua es más pequeña (Ansorena, 1994). Diversos estudios, como los de Heller et al. (2015) sobre la geometría de un contenedor (desde contenedores estrechos y altos hasta contenedores anchos y cortos) que contiene lechuga, encontraron que la forma no afecta el rendimiento cuando los contenedores son de idéntico volumen. Sin embargo, cuando una planta está en un contenedor durante un período prolongado, la profundidad del contenedor determina la longitud de la raíz principal de la planta y, por lo tanto, la supervivencia de la planta en condiciones limitantes, determinada a partir de la estimulación del crecimiento aéreo y de las raíces después del trasplante de diversos árboles leñosos (Biran y Eliassaf 1980; Pemán et al., 2006; Chirino et al., 2008; Landis et al., 2014; Trinidad et al., 2015).

A través de patentes industriales, el diseño de contenedores ha permitido probar muchas formas de contenedores (redondos, rectangulares, hexagonales o cuadrados y ahusados de arriba a abajo) con plantas forestales (Ferrand, 1971; Guggenheim y Odle, 2016), con ornamentales (Kreizel, 2002; Lüken y Sieverding, 2009) y en horticultura (Gallegos-Cedillo, 2017). En las primeras pruebas experimentales, Spencer (1972)

implementó crestas, nervaduras o ranuras orientadas verticalmente que representaban un impedimento u obstáculo mecánico para el crecimiento de raíces en espiral. Sin embargo, el contenedor perfecto aún no se ha desarrollado porque depende de los propósitos de uso y las especies cultivadas (Landis, 1990). Muchas de las modificaciones al diseño de las propiedades del contenedor se realizan para evitar deformaciones radiculares (Neddo et al., 1977) y para dirigir las raíces de las plántulas hacia abajo (Cooley, 2011), lo que resulta en un desarrollo importante del crecimiento de raíces rectas que se extienden a través del eje vertical del contenedor, con la adición de ranuras verticales a lo largo de la pared hasta la abertura de los orificios de drenaje (Spencer, 1972), como se describe en Spencer (1977) y Spencer (1991). Se han desarrollado algunas modificaciones en el diseño del contenedor para facilitar el manejo, rigidez (Bokmiller et al., 2000; Schromm, 2009; Quan et al., 2011), durabilidad, apilamiento (Sieverding, 2007), transporte (Park, 1966; Schmidt, 2009; Nilsson y Fransson, 2017), remoción sin dañar las plantas (Spencer, 1991), etiquetado (Skinner, 2002), y para evitar la adherencia entre contenedores (Stockdale, 1961). Otras funciones de diseño permiten la poda aérea de raíces con orificios de drenaje y proporcionan un adecuado equilibrio de humedad en el medio de cultivo (Insalaco, 1975; Staby, 1979), o combinan la facilidad de poda aérea con la función clásica de Spencer (1972), satisfaciendo la deflexión mecánica al incluir nervaduras en las superficies internas del contenedor (Rune, 2003).

Gilman et al. (2003) y Amoroso et al. (2010) reportaron que las plantas cultivadas en contenedores de material plástico con paredes lisas durante un ciclo generan raíces deformadas con movimiento en espiral e impedimento al crecimiento horizontal. Se han estudiado las deformaciones de las raíces y su influencia en los parámetros de crecimiento postrasplante (Spencer, 1972; Lemaire y Papin, 1989) debido a su importancia en cultivos ornamentales, hortícolas y forestales. La espiralización de las raíces es uno de los factores más importantes en el desarrollo vegetativo y radical, además de la supervivencia en campo (Brass et al., 1996), y una posible influencia en la floración (Armitage y Gross, 1996).

Por lo tanto, la selección del contenedor debe estar de acuerdo con las características específicas 1) del sistema radical (Keever y Cobb, 1987), 2) la duración del cultivo en contenedor previsto (Lemaire et al., 2005), y 3) la combinación del medio de cultivo (Bilderback y Fonteno, 1987) con su fertirrigación (Urrestarazu et al., 2017).

Aunque existen estudios sobre los efectos del crecimiento, desarrollo y producción radicular de las plantas vegetales en función de su nutrición mineral (Urrestarazu et al., 2008; Urrestarazu, 2015; Dixon, 2019), riego (Salter, 1961), la rugosidad y suavidad interna de bandejas de semilleros en plantas de tomate (Liptay y Edwards, 1994) y en viveros forestales (Spencer, 1972; Amoroso et al., 2010). Las raíces a menudo crecen a lo largo de la superficie de los contenedores y, por lo tanto, una gran superficie puede aumentar el crecimiento de raíces; sin embargo, existe poca información sobre el diseño de la morfología de contenedor que resultan en un aumento en el área de raíz para contenedores con un mismo volumen que tienen tabiques verticales en el interior. Se puede derivar algún beneficio de incorporar un aumento en la superficie de contacto entre el contenedor y la raíz que crece dentro de los límites espaciales de las paredes del contenedor. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la morfología de cuatro tipos de contenedores cuadrados y circulares, con y sin pared vertical interna, sobre el crecimiento vegetal, la superficie radicular y la respuesta a un período de estrés por sequía en los cultivos de pepino, pimiento y tomate.

3.2. Materiales y métodos

El experimento se realizó en las instalaciones de la Universidad de Almería (España) en un invernadero de plástico tipo multitúnel situado en las coordenadas: latitud 36°49'45" N, longitud 2°24'16" O. La temperatura media nocturna y diurna del invernadero fue de 15 a 20 °C y de 20 a 35 °C, respectivamente. Antes del cultivo, el invernadero y los contenedores fueron desinfectados con ácido peracético al 3% de concentración de acuerdo con lo recomendado por Álvaro et al. (2009).

3.2.1. Material vegetal

Se realizaron dos experimentos independientes; el primero sobre crecimiento vegetativo y análisis de la superficie de absorción radical por volumen de sustrato, y el segundo sobre el estrés por sequía por decapitación parcial y un período de supresión de fertirriego de 8 d.

El material vegetal fue plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) cv. SV0091CE, pimiento (*Capsicum annuum* L.) cv. Valenciano y tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Granoval. Las plantas fueron sembradas en fibra de coco (compuesta de 85% de fibra y 15% de turba), y perlita Agroperl[®] B12, y se realizó el trasplante a los tratamientos

definitivos de contenedores cuando se alcanzó el estado de dos hojas verdaderas en pepino y cuatro hojas verdaderas para pimiento y tomate. Las propiedades fisicoquímicas de la fibra de coco pelemix[®] empleada fueron descritas por Urrestarazu et al. (2019) y las propiedades de la perlita Agroperl[®] B12 por Urrestarazu (2015) y Urrestarazu et al. (2017).

3.2.2. Tratamientos

Los tratamientos consistieron en cuatro tipos de contenedores de 0.5 L. Se utilizaron dos formas de contenedores comerciales, circulares y cuadrados, fabricados por la empresa Pöppelmann TEKU[®] (Alemania), con denominación de serie VCG y VQB respectivamente, dentro de los cuales se añadió las paredes como piezas plásticas convenientemente ensambladas que aumentaban la superficie interior del contenedor. El diseño, mejora y modificación del contenedor se proyectó y realizó con el software SolidWorks[®] (Fig. 1, Tabla 1).

Los tratamientos fueron los siguientes; \odot : contenedores de sección circular sin paredes verticales internas, \oplus : contenedores de sección circular con paredes verticales internas, \square : contenedores de sección cuadrada sin paredes verticales internas y \boxplus : contenedor de sección cuadrada con paredes verticales internas. Las dimensiones de la pared interna de los contenedores \oplus y \boxplus fueron de 2 x 6 y 2 x 7 cm, respectivamente.

Se calculó la superficie total de contacto de cada morfología de contenedor (A_t , expresado en cm^2) con volumen de 350 mL de sustrato utilizando las expresiones matemáticas mostradas en las Ecuaciones. (1) sección circular sin paredes verticales internas, (2) sección cuadrada sin paredes verticales internas, (4) sección circular con paredes verticales internas y (5) sección cuadrada con paredes verticales internas. La Ecuación (3) representa el valor de la superficie total de contacto de las cuatro paredes internas (A_{t_t} , expresado en cm^2) que fueron colocadas perpendiculares al eje longitudinal en los tratamientos con PVI.

$$A_t (\odot) = \pi r^2 + \pi \left(\sqrt{(R - r)^2 + h^2} \right) (R + r) \quad (1)$$

$$A_t (\square) = 2 (a + b) \sqrt{h^2 + (a - b)^2/4} + b^2 \quad (2)$$

$$A_{t_t} = 4 h (d + 2 c) \quad (3)$$

$$At(\ominus) = \pi r^2 + \pi \left(\sqrt{(R-r)^2 + h^2} \right) (R+r) + At_t \quad (4)$$

$$At(\boxplus) = 2(a+b) \sqrt{h^2 + (a-b)^2/4} + b^2 + At_t \quad (5)$$

donde h es la altura desde la base del contenedor hasta la superficie de sustrato (cm), R y r son el radio de la base superior e inferior de la sección circular (cm), a y b son la longitud de la base superior e inferior de la sección cuadrada (cm), y c y d son el largo y ancho de la sección de la pared vertical interna (cm).

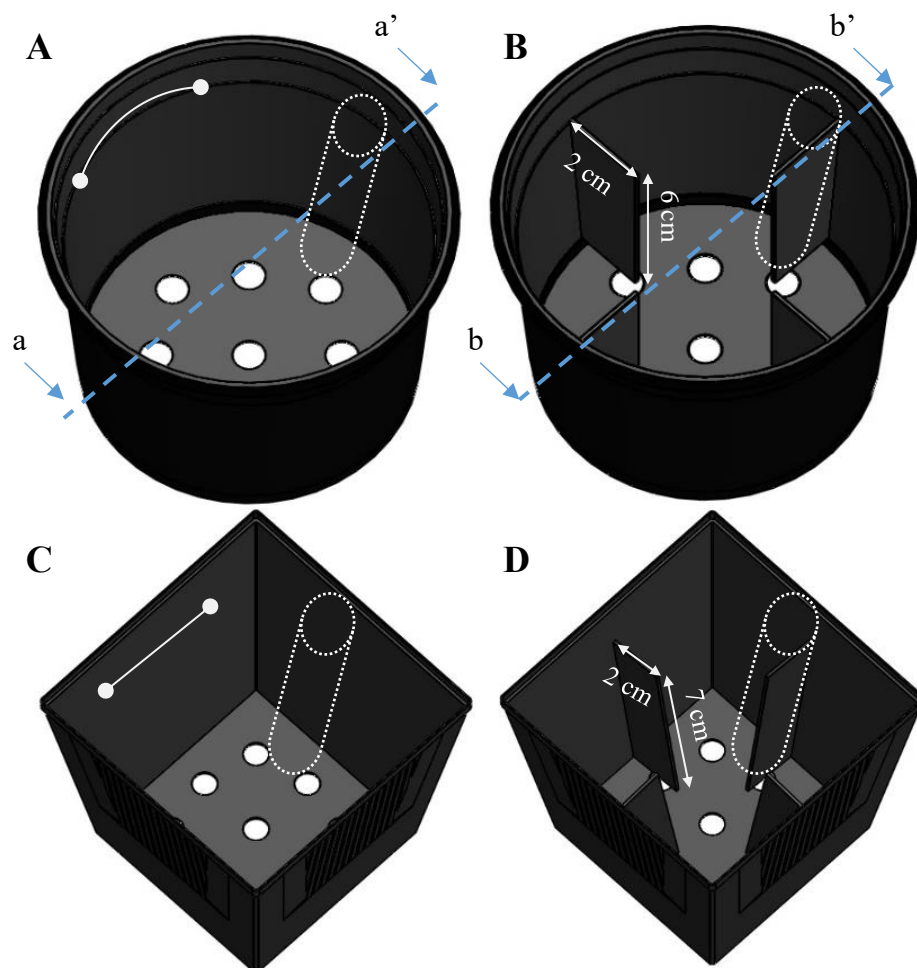


Fig. 1. (A y B) Contenedor de sección circular sin (\ominus) y con (\oplus) paredes verticales internas. (C y D) El mismo contenedor pero de sección cuadrada. Las líneas punteadas representan el área o vista de la sección transversal donde se hace el muestreo de raíces. La línea continua indica el nivel de llenado del sustrato en el contenedor (350 mL).

En la Tabla 1 se resume las especificaciones del cálculo de la superficie total de contacto (A_t) entre la altura del sustrato en relación con la morfología del contenedor expresado en cm^2 para cada tipo de contenedor.

Tabla 1. Tipos de contenedores utilizados y sus características (véase la Fig. 1).

| Tipos de contenedor | ⊖ | ⊞ | ⊕ | ⊞ |
|--|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | Cono truncado | Pirámide truncada | Cono truncado | Pirámide truncada |
| Sección transversal | Circular | Cuadrada | Circular | Cuadrada |
| Volumen total del contenedor (mL) | 462 | 521 | 462 | 521 |
| Volumen de sustrato (mL) | 350 | 350 | 350 | 350 |
| Número de paredes verticales internas | - | - | 4 | 4 |
| Área individual de cada pared vertical con el sustrato (cm^2) | - | - | 24,55 | 28,64 |
| Área de contacto entre la raíz y el contenedor (cm^2) | 216 | 247 | 314 | 362 |

3.2.3. Sistema de fertilización

Se utilizó una solución nutritiva estándar (Tabla 2) para una CE 2,2 (dS/m) de acuerdo con el balance iónico nutritivo recomendado por Sonneveld y Straver (1994). El pH se ajustó a 5,8 con la adición de ácido nítrico diluido. La aplicación del fertirriego se realizó manualmente una vez agotado el 10% de agua fácilmente disponible en el sustrato, más el volumen necesario para obtener un drenaje del 20% al 30%, y se ajustó la programación de fertirrigación para monitorear los parámetros de riego, porcentaje de drenaje, pH y CE de acuerdo con los requerimientos del cultivo (Rodríguez et al., 2015; Urrestarazu et al., 2019).

Tabla 2. Solución nutritiva utilizada en los cultivos durante la evaluación agronómica.

| CE (dS/m) | pH | Macronutrientes (mM) | | | | | | | Micronutrientes (μM) | | | | | |
|-----------|-----|----------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|---|-------------------------------|-----------------------------------|----|------|----|----|-----|
| | | K ⁺ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Fe | Mn | Cu | Zn | B | Mo |
| 2,2 | 5,8 | 7,0 | 0,5 | 3,8 | 1,0 | 10,5 | 1,5 | 2,5 | 15 | 10 | 0,75 | 5 | 30 | 0,5 |

Basado en Sonneveld y Straver (1994)

3.2.4. Parámetros de crecimiento de los cultivos

A los 30 d posteriores al trasplante, los parámetros de crecimiento vegetativo se midieron en un estado promedio de 10 hojas verdaderas en pepino, 15 hojas en pimiento y 11 hojas en tomate. Se midieron los parámetros de área foliar ($\text{cm}^2/\text{planta}$, medidos con la captura de imágenes mediante una cámara réflex digital alpha 58, Japón), similar a lo mencionado por (Bignami y Rossini, 1996) y procesadas en AutoCAD[®] (2016) (Fig. 4).

Las plantas se separaron en hoja, tallo y raíz, y el peso fresco (g/planta) se obtuvo utilizando una balanza analítica de precisión Adventurer[®] Analytical Electronic Balance (modelo AX124/E-OHAUS), de 0,001 g de precisión. El peso seco (g/planta) de cada órgano de la planta se obtuvo colocando el material en un horno de convección forzada (Thermo Scientific[™] Heratherm[®], Alemania) a 75 °C hasta peso constante y se midió similar al peso fresco.

3.2.5. Superficie radical de absorción por volumen de sustrato

En todos los tratamientos se extrajo una muestra de raíz de manera perpendicular al contenedor y en su caso de manera paralela a la pared vertical interna (en los contenedores que las tenían), con un sacabocado cilíndrico de 9,2 cm de altura y un radio de 0,5 cm (Fig. 1). Las muestras de raíces se colocaron en placas Petri de 140 mm (Thermo Scientific[™] Sterilin[™]) con papel milimetrado, y el recuento individual de raíces se realizó manualmente a dos profundidades: 0 a 4 y 4 a 8 cm. Se determinó la longitud de raíz, así como el número de raíces con un grosor $\geq 0,25$ mm y $\leq 1,25$ mm, similar a lo mencionado por Urrestarazu et al. (2015).

La superficie radical de absorción (SR, expresado en cm^2/cm^3) se calculó de acuerdo con la expresión matemática de la Ecuación (6), para cada una de las muestras medidas a distintas profundidades en ambos sustratos y para cada cultivo.

$$SR = (LR \cdot 2 \pi r \cdot 0.01) / V_s \quad (6)$$

donde LR= longitud de raíz de cada muestra (mm), r= grosor de raíz (mm) y V_s = volumen del sacabocado cilíndrico (cm^3).

3.2.6. Prueba de estrés por sequía

En el segundo experimento, las plantas fueron decapitadas en el tallo a los 30 d después del trasplante, después de regar hasta saturación (capacidad de campo), se hizo un corte por encima de la segunda hoja verdadera en pepino y de la quinta hoja verdadera en pimiento y tomate (Fig. 5). Las plantas se mantuvieron durante 8 d en condiciones de invernadero sin fertirrigación hasta que el sustrato agotó el 100% del agua fácilmente disponible, antes del punto de marchitamiento permanente. Después de este período de estrés por sequía, las plantas se dividieron en hojas preexistentes, hojas nuevas, tallo, raíz y brotes axilares para su medición. También, se midió el área foliar de hojas preexistentes

y hojas nuevas $> 1 \text{ cm}^2$ (Fig. 4). La biomasa fresca y seca se calculó similar a lo descrito en el apartado 3.2.4.

3.2.7. Análisis estadístico y diseño experimental

Para cada cultivo y sustrato se realizó un diseño experimental simultáneo e independiente de cuatro bloques completamente al azar (Montgomery, 2004). Cada bloque estaba compuesto de cinco plantas por cada tratamiento y cuatro repeticiones.

Los resultados se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA), la separación de medias se hizo por un test LSD a un $P \leq 0,05$. El tratamiento matemático de los datos se realizó utilizando el paquete Statgraphics Centurion[®] XVIII (2018) y Excel de Microsoft Office (2016).

Se realizó una regresión lineal simple con su coeficiente de correlación (R^2) entre la superficie total de contacto del contenedor (Tabla 1) en relación con el área foliar ($\text{cm}^2/\text{planta}$) y el peso seco (g/planta) de los nuevos brotes (Fig. 6) (Gallegos-Cedillo et al., 2016).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Parámetros de crecimiento de diferentes cultivos hortícolas con respecto al tipo de contenedor y al sustrato

3.3.1.1. Efecto de la forma externa del contenedor

La morfología del contenedor no ejerció ningún efecto claro sobre los parámetros de crecimiento de las plantas medidas en los diferentes cultivos y en ambos sustratos (Table 3). En un estudio sobre plantas de tomate, Liptay y Edwards (1994) observaron que la morfología de las paredes del contenedor en plántulas de tomate afectaba al crecimiento radical, mientras que Heller et al. (2015) no encontraron importantes diferencias en plantas de lechuga cuando trabajaban con diferentes morfologías de contenedor con un mismo método de fertirrigación.

3.3.1.2. Efecto de las paredes dentro del contenedor

La presencia de paredes verticales en el interior de los contenedores ejerció un efecto claro y significativo en la mayoría de los parámetros de crecimiento medidos. El área foliar del pepino aumentó en un 10% para ambos sustratos en los contenedores con paredes internas (Fig. 4). En el caso del pimiento y tomate, se registró un aumento

significativo solo cuando se utilizó perlita (Tabla 3). En cuanto a los parámetros de crecimiento de las raíces, este aumento fue similar en ambos sustratos 20% para todos los cultivos, mientras que la biomasa total aumentó sólo un 10%. Liptay y Edwards (1994) encontraron diferencias significativas en el crecimiento de raíces, mientras que no hubo un efecto claro en el crecimiento de los brotes. Rune (2003) encontró resultados diferentes al trabajar con pino silvestre en función de la fertilización aplicada cuando utilizaba contenedores con nervaduras vertical que promueven un mejor crecimiento de las raíces.

Tabla 3. Área foliar (cm²/planta) y biomasa (g/planta) de varios cultivos hortícolas versus contenedor y sustrato.

| | | Pepino | | Pimiento | | Tomate | |
|-------------|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita |
| Área foliar | ⊙ | 1883 b | 1239 b | 797 a | 348 c | 1152 a | 905 ab |
| | ◻ | 1757 b | 1233 b | 835 a | 375 b | 1049 a | 875 b |
| | ⊕ | 1995 a | 1334 ab | 817 a | 416 a | 1083 a | 985 a |
| | ⊞ | 2008 a | 1377 a | 835 a | 392 ab | 1095 a | 917 ab |
| Peso fresco | | | | | | | |
| Hojas | ⊙ | 79,31 b | 54,26 c | 26,23 c | 10,76 d | 30,02 a | 28,19 ab |
| | ◻ | 71,55 b | 55,55 bc | 28,38 ab | 11,59 c | 27,61 a | 30,47 a |
| | ⊕ | 89,48 a | 58,31 ab | 27,76 b | 13,43 a | 27,50 a | 30,11 a |
| | ⊞ | 86,71 a | 59,80 a | 28,75 a | 12,57 b | 29,51 a | 27,22 b |
| Tallo | ⊙ | 35,08 c | 24,50 b | 17,25 b | 6,70 c | 29,34 a | 22,65 a |
| | ◻ | 36,24 cb | 22,96 b | 16,50 c | 7,11 c | 27,50 a | 24,48 a |
| | ⊕ | 37,18 b | 28,99 a | 17,56 ab | 9,03 a | 28,59 a | 24,50 a |
| | ⊞ | 40,98 a | 28,84 a | 19,24 a | 7,94 b | 27,77 a | 22,47 a |
| Raíz | ⊙ | 17,76 c | 16,27 c | 19,07 b | 8,74 b | 10,09 c | 8,45 b |
| | ◻ | 22,47 b | 17,38 c | 20,03 ab | 9,69 b | 10,77 bc | 9,32 b |
| | ⊕ | 32,44 a | 22,24 a | 18,80 b | 11,37 a | 12,90 a | 10,32 a |
| | ⊞ | 31,62 a | 19,94 b | 21,81 a | 9,90 b | 12,07 ab | 9,85 ab |
| Total | ⊙ | 132,15 b | 95,03 b | 62,55 b | 26,20 c | 69,44 a | 59,29 b |
| | ◻ | 130,26 b | 95,90 b | 64,90 b | 28,40 bc | 65,88 a | 64,26 ab |
| | ⊕ | 159,10 a | 109,54 a | 64,11 b | 33,83 a | 69,00 a | 64,94 a |
| | ⊞ | 159,31 a | 108,58 a | 69,80 a | 30,41 b | 69,35 a | 59,54 b |
| Peso seco | | | | | | | |
| Hojas | ⊙ | 7,07 b | 4,55 ab | 2,94 c | 1,35 c | 2,87 a | 2,85 b |
| | ◻ | 6,95 b | 4,33 b | 3,31 a | 1,48 c | 2,47 b | 3,09 a |
| | ⊕ | 7,62 a | 5,14 a | 3,11 bc | 1,82 a | 2,59 ab | 3,14 a |
| | ⊞ | 7,82 a | 5,20 a | 3,22 ab | 1,66 b | 2,86 a | 2,76 b |
| Tallo | ⊙ | 1,92 b | 1,43 b | 1,86 b | 1,11 bc | 2,30 a | 2,35 c |
| | ◻ | 1,89 c | 1,28 b | 1,89 b | 1,06 c | 2,02 a | 2,60 ab |
| | ⊕ | 2,12 a | 1,97 a | 2,05 a | 1,43 a | 2,14 a | 2,70 a |
| | ⊞ | 2,11 ab | 1,66 ab | 2,13 a | 1,25 b | 2,23 a | 2,38 bc |
| Raíz | ⊙ | 2,53 b | 1,96 c | 1,60 b | 0,66 b | 1,09 c | 0,88 c |
| | ◻ | 2,63 b | 2,14 bc | 1,64 b | 0,76 b | 1,29 b | 0,99 bc |
| | ⊕ | 4,50 a | 2,53 ab | 1,27 c | 0,97 a | 1,59 a | 1,15 ab |
| | ⊞ | 4,49 a | 2,86 a | 1,73 a | 0,83 ab | 1,44 ab | 1,19 a |
| Total | ⊙ | 11,52 b | 7,94 b | 6,40 c | 3,13 c | 6,27 a | 6,07 c |
| | ◻ | 11,47 b | 7,75 b | 6,83 b | 3,31 c | 5,79 a | 6,68 ab |
| | ⊕ | 14,24 a | 9,65 a | 6,43 c | 4,23 a | 6,32 a | 6,99 a |
| | ⊞ | 14,42 a | 9,72 a | 7,07 a | 3,74 b | 6,54 a | 6,32 bc |

⊙ = contenedor circular; ◻ = contenedor cuadrado; ⊕ = contenedor circular con paredes verticales internas; ⊞ = contenedor cuadrado con paredes verticales internas. Letras diferentes en la columna indican una diferencia significativa $P < 0,05$ de acuerdo con la prueba LSD.

Amoroso et al. (2010) no encontraron diferencias significativas en la biomasa de los brotes en las plántulas de Littleleaf linden (*Tilia cordata* Mill.) y Field elm (*Ulmus minor* Mill.); sin embargo, al comparar las paredes lisas (en contenedores circulares) con los contenedores con paredes verticales (en contenedores cuadrados), aparecieron escasas diferencias en la biomasa de las raíces a favor de las paredes lisas, mientras que las raíces deformadas eran significativamente menos comunes en los contenedores con paredes verticales. Los beneficios de la presencia de las paredes verticales internas parecen claros para 1) la mejora de las raíces de las plantas (Eg. Liptay y Edwards, 1994; Amoroso et al., 2010), 2) la potencial ruptura de los canales preferentes que se forman en el patrón de flujo de la fertirrigación en el interior del contenedor (Urrestarazu et al., 2017), y 3) el patrón de flujo en un sustrato saturado o semisaturado en respuesta al movimiento de la fertirrigación dentro del sustrato (De Rijck y Schrevens, 1998).

3.3.2. Superficie radical de absorción de acuerdo con la forma de contenedor y el sustrato

3.3.2.1. Efecto de la morfología del contenedor

Los datos de distribución media de la superficie de raíz por unidad de volumen de sustrato fueron coincidentes con los datos que desde muy antiguo se conocen para plantas hortícola (pepino) en cultivo sin suelo en lana de roca (Van Noordwijk y Raats, 1980) (Table 4). Salvo algunas excepciones en el cultivo de pimiento y tomate en favor de los contenedores cuadrados, la morfología de los contenedores ejerció poca influencia en la superficie radical tanto en todo el volumen de sustrato como en la capa superficial (0-4 cm) e inferior (4-8 cm) (Fig. 2).

En ambas morfologías, el muestreo más profundo del contenedor registró un mayor crecimiento radical a mayor profundidad, tendencia similar a la que ya se ha reportado desde muy antiguo en plantas de tomate en cultivo en suelo tradicional (Reid et al., 1996) y en cultivo sin suelo (Urrestarazu et al., 2015). Además, la variación de la temperatura en las profundidades del suelo puede modificar el patrón de crecimiento de las raíces (Kaspar y Bland, 1992).

3.3.2.2. Efecto de la presencia de las paredes dentro del contenedor

En el caso de una misma morfología de contenedor siempre se registró un aumento de la superficie de raíces, independientemente del sustrato, de la profundidad medida y tipo de cultivo (mayor al 34%) en los contenedores con paredes internas en el interior (Tabla 4; Fig. 2). La mayor distribución de raíces entorno a las paredes confirma los resultados descritos en la Tabla 3, en la que había una mayor biomasa de raíces en aquellos contenedores que disponían de paredes verticales en su interior, y que pueden derivar de la diversidad de canales preferentes en el sustrato y homogeneidad en el suministro de la solución nutritiva (SN) (Fig. 3). Sin embargo, la identificación de la arquitectura del sistema radicular es de vital importancia para garantizar el éxito productivo (Mansoorkhani et al., 2014), porque permite hacer un fertirriego más eficiente y eficaz, dada la existencia de los patrones de distribución del bulbo de humidificación en diferentes condiciones de fertirrigación y tipos de sustratos (Urrestarazu, 2015; Urrestarazu et al., 2017).

Tabla 4. Área de raíz (cm^2/cm^3) a diferentes profundidades del contenedor, medida según la posición de las paredes verticales internas frente al tipo de contenedor y sustrato.

| Centímetros desde la cara superior | | Pepino | | Pimiento | | Tomate | |
|------------------------------------|---|---------|---------|----------|---------|--------|---------|
| | | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita |
| 0-4 | ⊙ | 5,14 b | 4,21 b | 1,51 c | 0,57 b | 0,87 c | 1,71 a |
| | ◻ | 4,02 b | 4,73 b | 2,13 b | 0,51 b | 0,82 c | 1,30 b |
| | ⊕ | 6,52 a | 7,21 a | 2,09 b | 0,82 a | 1,24 b | 1,90 a |
| | ⊞ | 7,41 a | 6,77 a | 2,65 a | 0,95 a | 1,83 a | 1,60 ab |
| 4-8 | ⊙ | 7,32 b | 5,73 b | 1,96 c | 0,64 d | 0,93 b | 2,00 b |
| | ◻ | 6,57 b | 5,93 b | 2,19 bc | 0,85 c | 1,05 b | 1,90 b |
| | ⊕ | 9,91 a | 9,64 a | 2,33 b | 1,10 b | 1,74 a | 2,75 a |
| | ⊞ | 9,65 a | 8,69 a | 2,72 a | 1,32 a | 1,80 a | 2,95 a |
| Total | ⊙ | 12,46 b | 9,94 b | 3,47 c | 1,21 c | 1,79 c | 3,71 b |
| | ◻ | 10,59 b | 10,66 b | 4,32 b | 1,36 c | 1,87 c | 3,20 b |
| | ⊕ | 16,43 a | 16,85 a | 4,41 b | 1,92 b | 2,98 b | 4,65 a |
| | ⊞ | 17,06 a | 15,46 a | 5,36 a | 2,27 a | 3,63 a | 4,55 a |

⊙ = contenedor circular; ◻ = contenedor cuadrado; ⊕ = contenedor circular con paredes verticales internas; ⊞ = contenedor cuadrado con paredes verticales internas. Letras diferentes en la columna indican una diferencia significativa $P < 0,05$ de acuerdo con la prueba LSD.

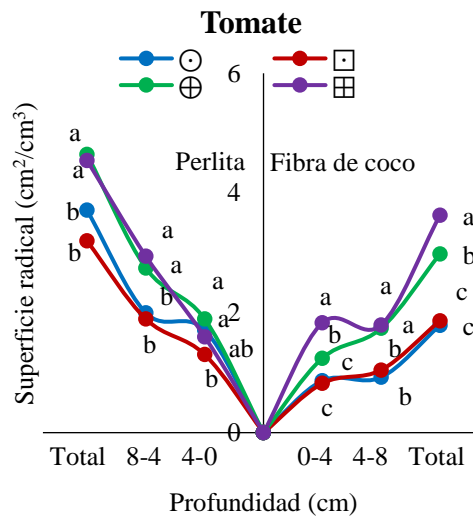
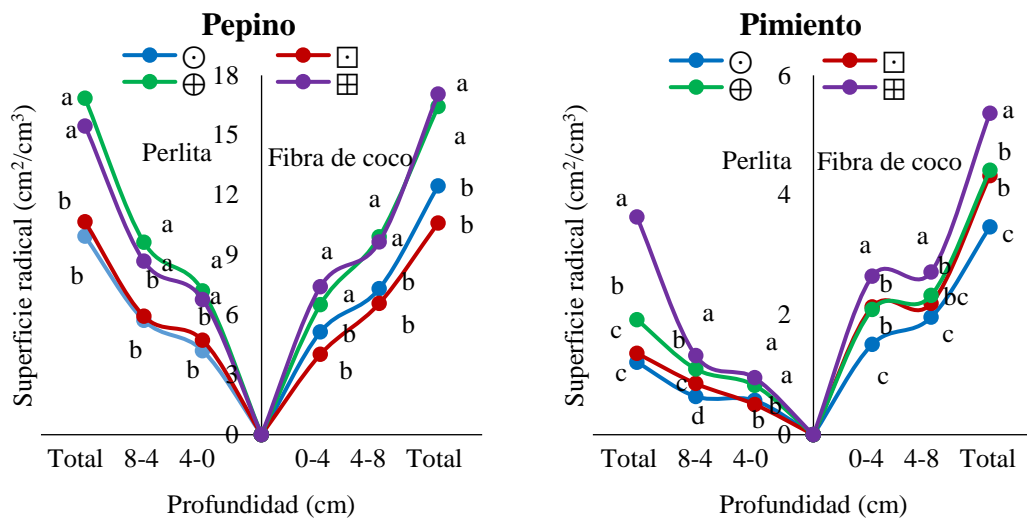


Fig. 2. Superficie radical de absorción (cm^2/cm^3) a diferentes profundidades del contenedor, medida en la ubicación media de la pared en pepino, pimiento y tomate. **A.** Detalle de la sección de raíz de pimiento en fibra de coco T0 (Sin PVI) y T1 (Con PVI). \odot = contenedor circular; \square = contenedor cuadrado; \oplus = contenedor circular con paredes verticales internas; \boxplus = contenedor cuadrado con paredes verticales internas. Letras diferentes indican una diferencia significativa $P < 0,05$ de acuerdo con la prueba LSD.

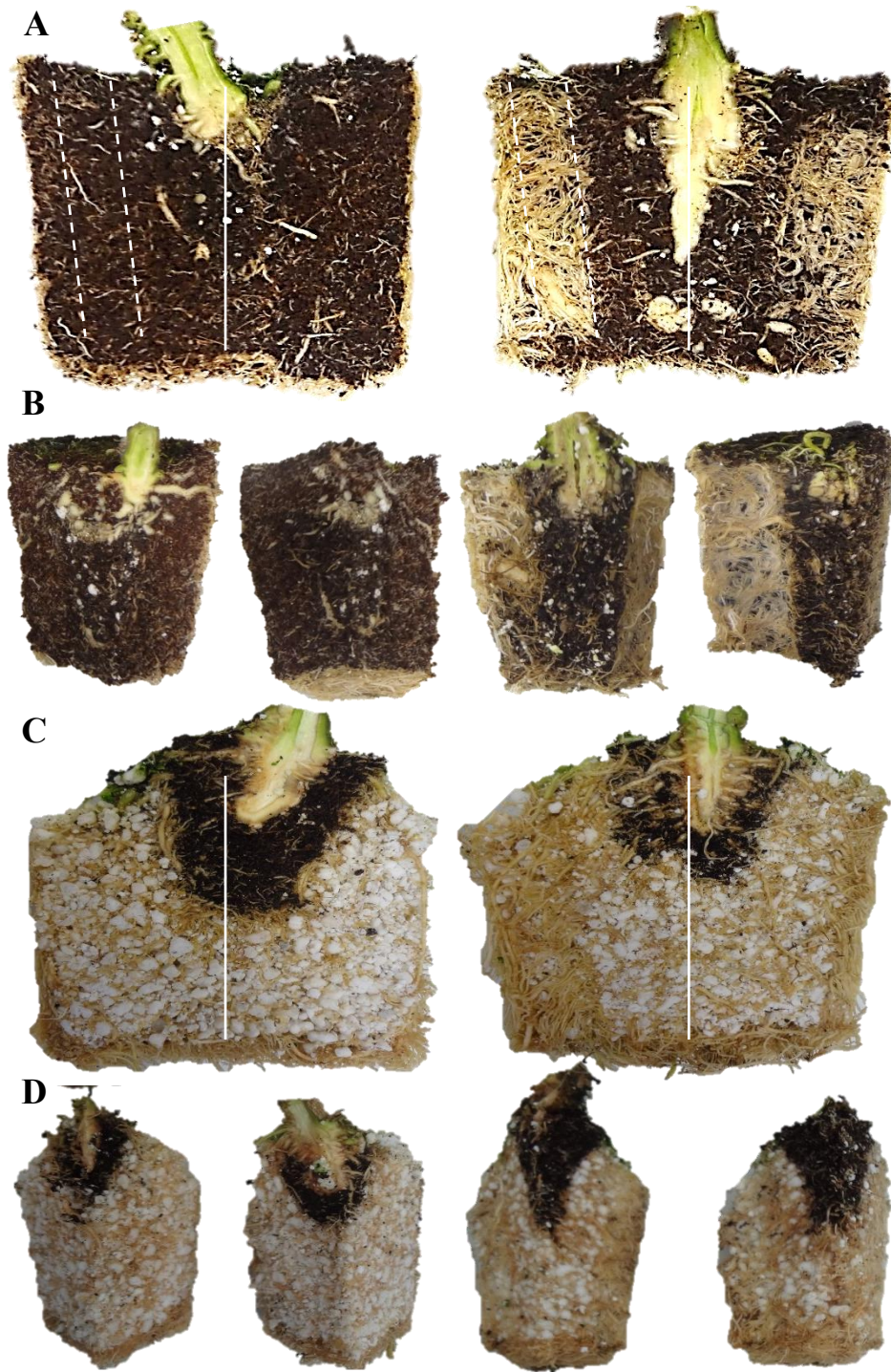


Fig. 3. Sección vertical de raíz sin (Izquierda) y con (Derecha) paredes verticales internas en fibra de coco “tomate” (A) y perlita “pimiento” (C) de acuerdo con la sección vertical a-a’ y b-b’ en los contenedores A y B de la Fig. 1. B y D son los detalles del corte donde se ubicaban convenientemente las PVI (línea vertical continua) y proporcionan una vista interna de la acumulación de raíces dentro de ambos sustratos en los contenedores.

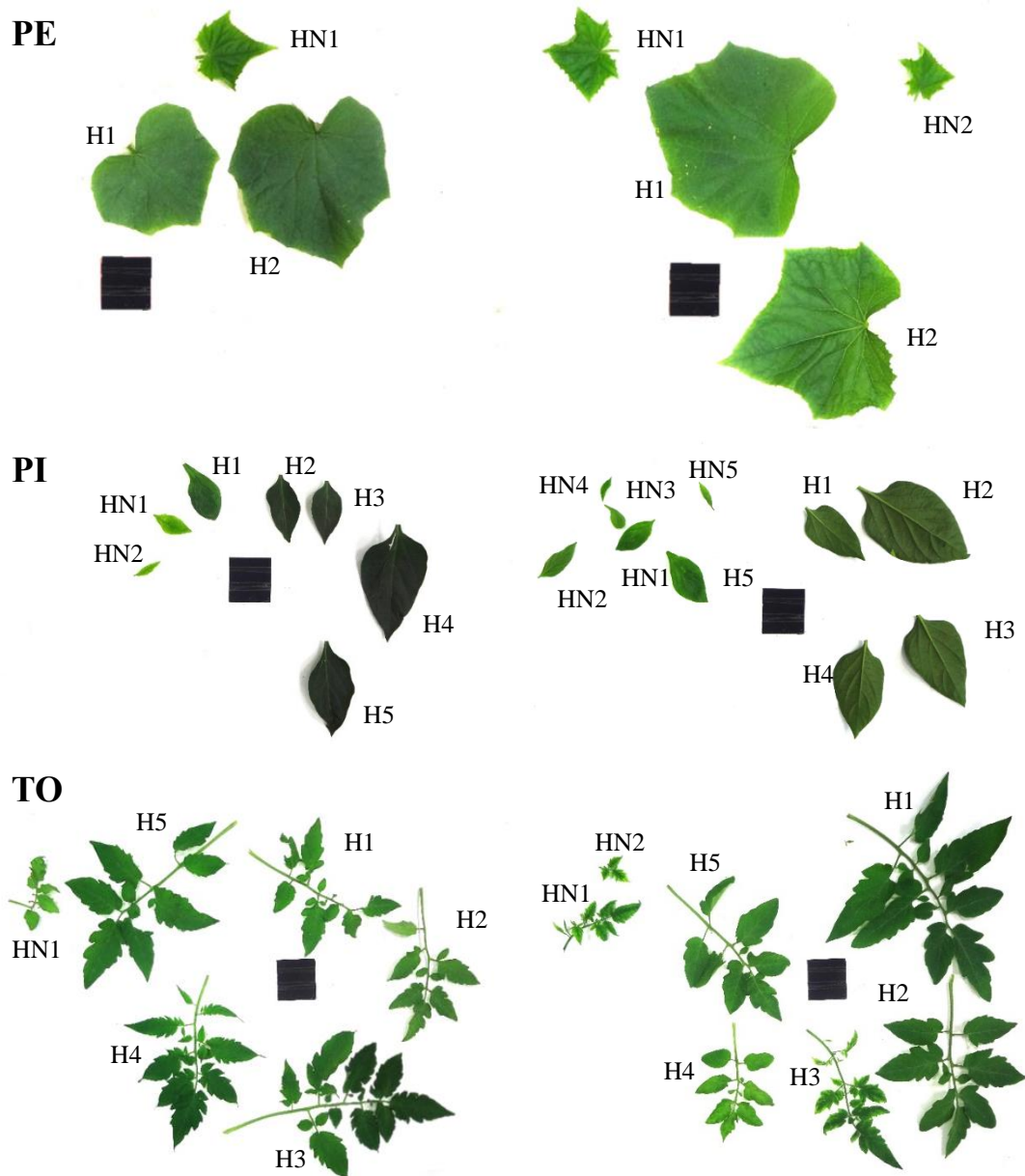


Fig. 4. Área foliar de pepino (**PE**), pimienta (**PI**) y tomate (**TO**) sin (**izquierda**) y con paredes verticales internas (**derecha**) medida después de 8 días bajo estrés hídrico. H1, H2, H3, H4 y H5, son la primera, segunda, tercera, cuarta y quinta hoja verdadera, respectivamente. HN1, HN2, HN3, HN4 y HN5 son las hojas nuevas, el recuadro negro es la referencia de 25 cm².

3.3.3. *Parámetros de crecimiento después de un período de estrés por sequía*

3.3.3.1. *Efecto de la morfología del contenedor*

En la Tabla 5 se muestran los resultados de los datos de biomasa del experimento de estrés por sequía. Se presentan las mismas tendencias que se registraron en la Tabla 3 para los valores de crecimiento vegetativo de plantas completas. Los parámetros de crecimiento de las raíces fueron similares en ambos sustratos; esta tendencia puede ser consecuencia del uso del mismo volumen de sustrato y del ajuste previo del manejo del fertirriego a las características del sustrato, de acuerdo con lo reportado desde antiguo por ej. en García et al. (1997), Mascarini et al. (2012) para sustratos minerales o Verlodt y Kamoun (1981) en sustratos orgánicos.

3.3.3.2. *Efecto de las paredes dentro del contenedor*

En la parte preexistente previa al decapitado de los tres cultivares y sustratos la tendencia fue muy similar a lo descrito en la Tabla 3 para plantas completas. Las raíces que crecían en contenedores con paredes registraron mayor biomasa; el pepino y el pimiento aumentaron un 50% en promedio en comparación con el control (biomasa en fresco y seco), y el tomate incrementó un 15% en ambos sustratos (Tabla 5).

El área foliar de las hojas nuevas, el peso fresco y seco de los brotes después de la decapitación y el estrés por sequía duplicaron su valor en los contenedores con paredes verticales en su interior (Tabla 5, Fig. 5). Este importante incremento significativo fue muy similar en los tres cultivares y en los dos sustratos. Amoroso et al. (2010) observaron que la biomasa de los brotes no se vio afectada por el tipo de contenedor al final de la primera etapa de crecimiento, ni tampoco la biomasa de las raíces al final del segundo año; sin embargo, sugieren que la tipología de contenedores con nervaduras verticales tiene una fuerte influencia en la conformación y calidad del sistema radical de las plantas.

Con excepción del área foliar de las hojas nuevas en pepino, se registraron claras correlaciones entre la superficie total de contacto del contenedor con el área foliar de las hojas nuevas y el peso seco de los brotes después de la decapitación y del estrés por sequía (Fig. 6). Aunque no se observó una correlación clara de estos parámetros en el pepino con la superficie de contacto, entre el contenedor y las raíces, la superficie foliar fue mayor en los dos tratamientos con paredes verticales internas en comparación con los contenedores sin paredes verticales internas.

Table 5. Área foliar (cm²/planta) y biomasa (g/planta) de varios cultivos hortícolas vs contenedor y sustrato después de la decapitación parcial y estrés hídrico.

| | | Pepino | | Pimiento | | Tomate | |
|----------------------|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita | Fibra | Perlita |
| Área de hojas viejas | ⊙ | 180,47 b | 208,20 a | 205,49 b | 148,52 c | 399,19 ab | 327,42 a |
| | ⊠ | 166,22 c | 168,39 b | 228,52 a | 167,67 ab | 386,92 b | 328,61 a |
| | ⊕ | 211,32 a | 212,97 a | 221,29 ab | 161,83 bc | 409,25 ab | 355,01 a |
| | ⊞ | 202,87 a | 204,08 a | 233,60 a | 178,23 a | 423,82 a | 351,86 a |
| Área de hojas nuevas | ⊙ | 11,72 c | 10,32 c | 6,72 d | 4,01 d | 7,97 c | 5,06 b |
| | ⊠ | 9,71 c | 7,50 c | 8,46 c | 5,68 c | 7,40 c | 6,08 b |
| | ⊕ | 35,13 a | 32,34 a | 14,20 b | 8,65 b | 27,34 b | 15,26 a |
| | ⊞ | 20,40 b | 18,98 b | 21,80 a | 12,92 a | 41,08 a | 14,42 a |
| Peso seco Hojas | ⊙ | 1,30 b | 1,48 a | 0,88 b | 0,71 c | 1,31 a | 1,14 b |
| | ⊠ | 1,19 b | 0,95 c | 0,97 ab | 0,79 b | 1,35 a | 1,21 ab |
| | ⊕ | 1,67 a | 1,66 a | 0,99 ab | 0,84 ab | 1,38 a | 1,29 a |
| | ⊞ | 1,51 a | 1,25 b | 1,13 a | 0,88 a | 1,38 a | 1,35 a |
| Tallo | ⊙ | 1,88 a | 0,80 ab | 1,40 a | 1,35 b | 1,09 ab | 1,03 a |
| | ⊠ | 0,89 c | 0,75 b | 1,58 a | 1,49 ab | 1,08 b | 1,00 a |
| | ⊕ | 1,95 a | 0,85 a | 1,61 a | 1,46 ab | 1,17 ab | 1,01 a |
| | ⊞ | 1,20 b | 0,84 a | 1,73 a | 1,65 a | 1,22 a | 1,27 a |
| Raíz | ⊙ | 3,78 b | 3,20 bc | 2,04 b | 1,81 b | 1,05 b | 1,17 c |
| | ⊠ | 3,41 b | 2,98 c | 1,99 b | 1,79 b | 1,14 b | 1,16 c |
| | ⊕ | 5,75 a | 4,43 a | 2,83 a | 2,20 a | 1,42 a | 1,33 b |
| | ⊞ | 5,21 a | 3,98 b | 2,55 ab | 2,44 a | 1,48 a | 1,48 a |
| Brotes nuevos | ⊙ | 0,51 c | 0,41 b | 0,04 b | 0,03 b | 0,02 c | 0,01 b |
| | ⊠ | 1,09 b | 0,49 b | 0,04 b | 0,03 b | 0,05 b | 0,02 b |
| | ⊕ | 1,22 b | 1,04 a | 0,09 a | 0,09 a | 0,06 b | 0,04 a |
| | ⊞ | 1,53 a | 0,86 a | 0,10 a | 0,06 a | 0,12 a | 0,06 a |
| Total | ⊙ | 7,48 bc | 5,89 c | 4,36 b | 3,89 c | 3,48 c | 3,35 b |
| | ⊠ | 6,59 c | 5,17 d | 4,58 b | 4,10 bc | 3,61 bc | 3,39 b |
| | ⊕ | 10,59 a | 7,97 a | 5,52 a | 4,58 ab | 4,03 ab | 3,67 b |
| | ⊞ | 9,45 ab | 6,94 b | 5,50 a | 5,02 a | 4,19 a | 4,17 a |

⊙ = contenedor circular; ⊠ = contenedor cuadrado; ⊕ = contenedor circular con paredes verticales internas; ⊞ = contenedor cuadrado con paredes verticales internas. Letras diferentes en la columna indican una diferencia significativa $P < 0,05$ de acuerdo con la prueba LSD.

En resumen, un incremento significativo promedio de la biomasa ($\approx 20\%$) (Tabla 3) y de la superficie de absorción de las raíces ($\approx 30-35\%$) (Tabla 4) duplicó o triplicó los parámetros de crecimiento de los brotes al ser sometida a un estrés por sequía (Tabla 5, Fig. 5), lo que se confirma por la clara asociación de las variables analizadas con los modelos de regresión lineal simple descrito en ambos sustratos (Fig. 6).

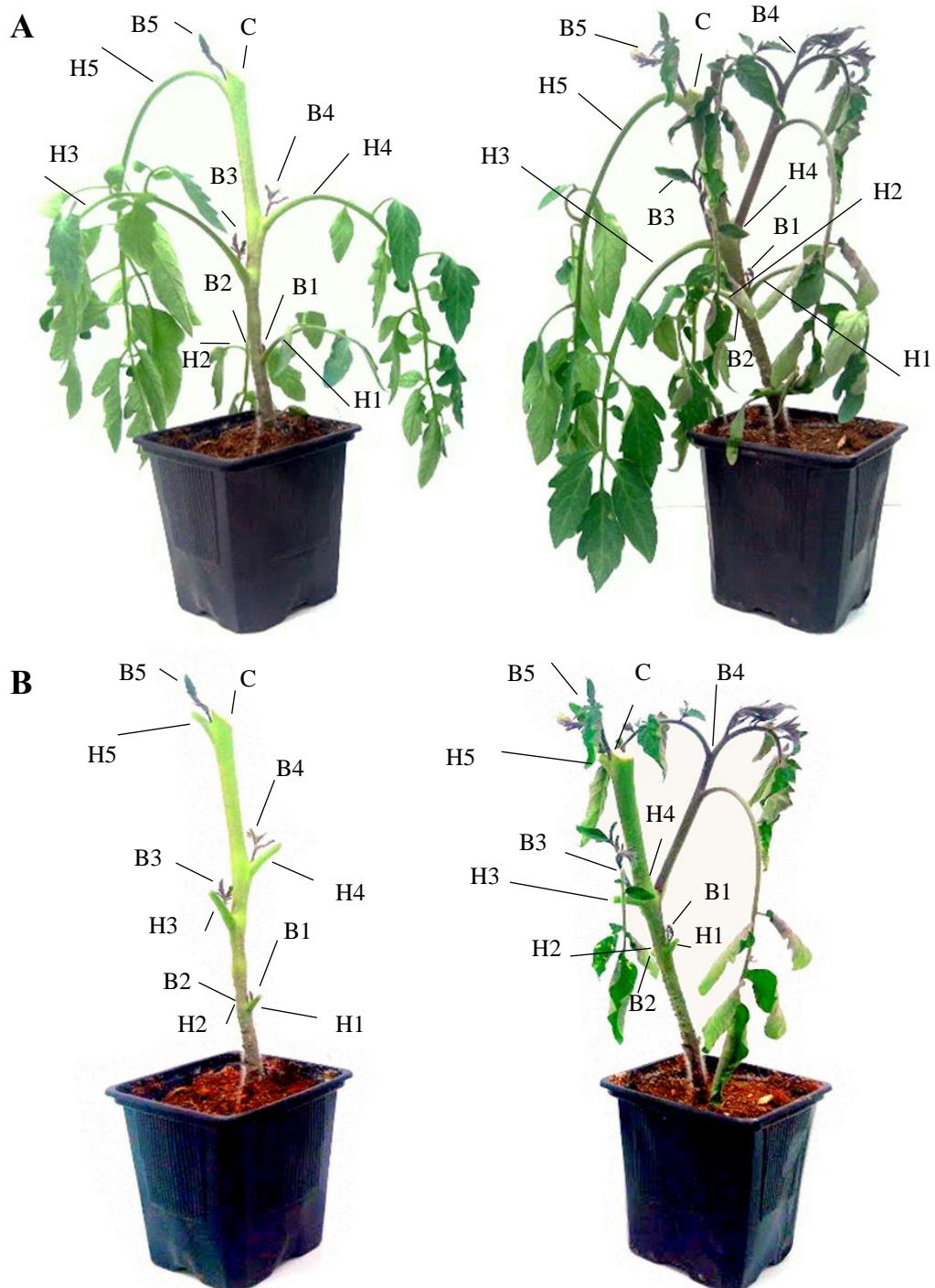


Fig. 5. **A.** Plantas de tomate sin (Izquierda) y con (Derecha) paredes verticales internos en el contenedor tras un período de estrés hídrico de 8 días. **B.** Las mismas plantas de **A** tras el corte de las hojas verdaderas preexistentes. **C** es el punto de corte en el tallo. H1, H2, H3, H4 y H5, son la primera, segunda, tercera, cuarta y quinta hoja verdadera, respectivamente. B1, B2, B3, B4 y B5 son los brotes foliares axilares de las hojas verdaderas primera, segunda, tercera, cuarta y quinta, respectivamente.

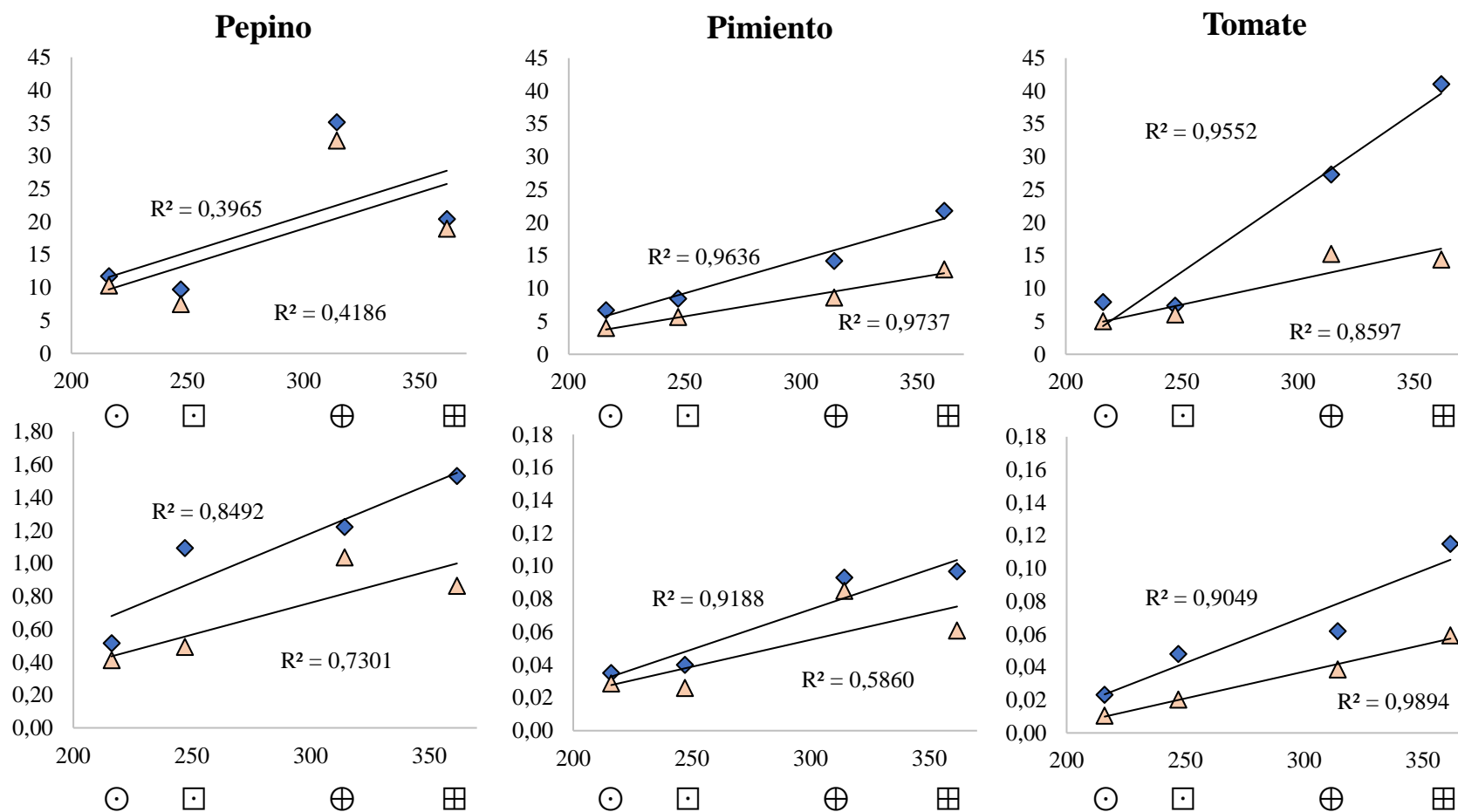


Fig. 6. Correlación lineal entre la superficie de contacto en el contenedor (cm^2) y el área foliar ($\text{cm}^2/\text{planta}$, fila superior) y el peso seco (g/planta , fila inferior) de los nuevos brotes después de la decapitación y supresión del fertirriego. Los diamantes y los triángulos indican los contenedores con fibra de coco y perlita, respectivamente. \odot = contenedores de sección circular sin PVI; \oplus = contenedores de sección circular con PVI; \square = contenedores de sección cuadrada sin PVI; \boxplus = contenedores de sección cuadrada con PVI.

3.4. Conclusiones

Las paredes en el interior de los contenedores no solo refuerzan los contenedores o macetas desde una perspectiva mecánica, sino que también impiden que las raíces se muevan en forma espiralada. Además de disminuir la deformación de raíces, que afecta potencialmente al anclaje de las raíces después del trasplante y reduce el crecimiento de brotes. Las paredes verticales internas también favorecen la producción de biomasa en las plantas hortícolas y aumentan sustancialmente el peso total de las raíces, lo que aumenta la capacidad de las plantas para hacer frente al estrés por sequía y, por lo tanto, superar el posible estrés postrasplante en ambos sustratos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por su apoyo financiero a este trabajo.

3.5. Literatura citada

- Álvaro, J.E., S. Moreno, F. Diánez, M. Santos, G. Carrasco, y M. Urrestarazu. 2009. Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables. *J. Food Eng.* 95:11-15.
- Amoroso, G., P. Frangi, R. Piatti, F. Ferrini, A. Fini, y M. Faoro. 2010. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience* 45:1824-1829.
- Ansorena, M.J. 1994. *Sustratos: propiedades y caracterización*. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Aphalo, P. y R. Rikala. 2003. Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New For.* 25:93-108.
- Araki, H. y M. Iijima. 2001. Deep rooting in winter wheat: rooting nodes of deep roots in two cultivars with deep and shallow root systems. *Plant Prod. Sci.* 4:215-219.
- Armitage, A.M. y P.M. Gross. 1996. Copper-treated plug flats influence root growth and flowering of bedding plants. *HortScience* 31:941-943.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33:27-40.

- Bignami, C. y F. Rossini. 1996. Image analysis estimation of leaf area index and plant size of young hazelnut plants. *J. Hort. Sci.* 71:113-121.
- Bilderback, T.E. y W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5:180-182.
- Biran, I. y A. Eliassaf. 1980. The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Scientia Hort.* 12:183-193.
- Bokmiller, D., M. Moon, R. Gumpf, S. Mullins, M. Blomerley, y S. Pavelka. 2000. Nest and stack plant pot. U.S. Patent No. 6,134,832. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Brass, T.J., G.J. Keever, D.J. Eakes, y C.H. Gilliam. 1996. Styrene-lined and copper-coated containers affect production and landscape establishment of red maple. *HortScience* 3:353-356.
- Chirino, E., A. Vilagrosa, E.I. Hernández, A. Matos, y V.R. Vallejo. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *For. Ecol. Mgt.* 256:779-785.
- Cooley, J.N. 2011. Plant container. U.S. Patent No. 7,954,277 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- De Rijck, G. y E. Schrevens. 1998. Distribution of nutrients and water in rockwool slabs. *Scientia Hort.* 72:277-285.
- Dixon, G.R. 2019. Horticultural science-a century of discovery and application. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 94:550-572.
- Domínguez-Lerena, S., N.H. Sierra, I.C. Manzano, L.O. Bueno, J.P. Rubira, y J.P. Mexal. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *For. Ecol. Mgt.* 221:63-71.
- Ferrand, M. 1971. Plant container. U.S. Patent No. 3,557,489. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Gallegos-Cedillo, J. 2017. Estudio de la morfología del contenedor para mejorar la eficiencia del cultivo sin suelo. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Almería, España.

- Gallegos-Cedillo, J., R. Arteaga-Ramírez, M.A. Vázquez-Peña, y J. Juárez-Méndez. 2016. Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ing. Agri. Biosist.* 8:3-16.
- García, M., M. Guzmán, M. Urrestarazu, M. Salas, y I. Escobar. 1997. Evaluation of different parameters in perlite substrate by some vegetables in crop protection. *Acta Hort.* 18:519-525.
- Gilman, E.F., J. Grabosky, A. Stodola, y M.D. Marshall. 2003. Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Arboric. J.* 29:231-236.
- Guggenheim, T.L. y R.R. Odle. 2016. Methods to grow, deliver, and plant young trees in a removable tubular container. U.S. Patent No. 9,414,547 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- Heller, H., A. Bar-Tal, S. Assouline, K. Narkis, S. Suryano, A. de la Forge, M. Barak, H. Alon, M. Bruner, S. Cohen, y D. Tsohar. 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study. *Irrig. Sci.* 33:53-65.
- Insalaco, C.J. 1975. Nursery pot having improved drainage. U.S. Patent No. 3,896,587. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Kaspar, T.C. y W.L. Bland. 1992. Soil temperature and root growth. *Soil Sci.* 154:290-299.
- Keever, G.J. y G.S. Cobb. 1987. Effects of container volume and fertility rate on growth of two woody ornamentals. *HortScience* 22:891-895.
- Kreizel, J. 2002. Planter and method of manufacturing same. U.S. Patent No. 6,360,484 B1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Landis, T.D., T. Luna, y R.K. Dumroese. 2014. Containers, p. 123-140. In: K.M. Wilkinson, T.D. Landis, D.L. Haase, B.F. Daley, y R.K. Dumroese (eds.). *Tropical nursery manual: A guide to starting and operating a nursery for native and traditional plants.* Agriculture Handbook 732. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.

- Landis, T.D. 1990. Containers and growing media, p. 41-85. In: T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, y J.P. Barnett (eds.). The container tree nursery manual, vol. 2. Agricultural Handbook 674. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Lemaire, F. y J.L. Papin. 1989. Influence of the physical characteristics of substrate on the root systems of ornamental plants grown in pots and containers. *Agronomie* 9:795-801.
- Lemaire, F., A. Dartigues, L.M. Riviére, S. Charpentier, y P. Morel. 2005. Cultivos en macetas y contenedores. Principios agronómicos y aplicaciones. 2nd ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Liptay, A. y D. Edwards. 1994. Tomato seedling growth in response to variation in root container shape. *HortScience* 29:633-635.
- Lüken, R. y A. Sieverding. 2009. Flower pot. U.S. Patent No. 7,610,717 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Mansoorkhani, F., G.B. Seymour, R. Swarup, H.M. Moeiniyan-Bagheri, R.J.L. Ramsey, y A.J. Thompson. 2014. Environmental, developmental, and genetic factors controlling root system architecture. *Biotechnol. Genet. Eng.* 30:95-112.
- Mascarini, L., G. Lorenzo, H. Svartz, S. Pesenti, y S. Amado. 2012. Container size and growing media affects water use efficiency in a *Gerbera jamesonii* cut flower crop. *Rev. Bras. Hort. Ornam.* 18:71-77.
- Montgomery, D.C. 2004. Design and analysis of experiments. 2nd ed. John Wiley & Sons, Phoenix, AZ, USA.
- Neddo, K.S., G.M. Alder, y J.L. Gwilliam. 1977. Seedling plant propagation container. U.S. Patent No. 4,006,558. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Nichols, T.J. y A.A. Alm. 1983. Root development of container-reared, nursery-grown, and naturally regenerated pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 13:239-245.
- Nilsson, T. y U. Fransson. 2017. Pluggtrainer. U.S. Patent No. 9,795,090 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.

- Ortega, U., J. Majada, A. Mena-Petite, J. Sánchez-Zabala, N. Rodríguez-Iturrizar, K. Txarterina, J. Azpitarte, y M. Duñabeitia. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New For.* 31:97-112.
- Park, G.B. 1966. Plant shipping container. U.S. Patent No. 3,284,949. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Pemán, J., J. Voltas, y E. Gil-Pelegrin. 2006. Morphological and functional variability in the root system of *Quercus ilex* L. subject to confinement: consequences for afforestation. *Ann. For. Sci.* 63:425-430.
- Quan, T.Z., J.H. Wu, y X. Wang. 2011. Nursery container. U.S. Patent No. 0,232,187 A1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-13.
- Reid, J., D. Winfield, I. Sorensen, y A. Kale. 1996. Water deficit, root demography, and the causes of internal blackening in field-grown tomatoes: (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Ann. Appl. Biol.* 129:137-149.
- Rodríguez, D., J. Reca, J. Martínez, R. López-Luque, y M. Urrestarazu. 2015. Development of a new control algorithm for automatic irrigation scheduling in soilless culture. *Appl. Math. Inf. Sci.* 9:47-56.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fenn.* 37:333-342.
- Sánchez-Aguilar, H., A. Aldrete, J. Vargas-Hernández, y V. Ordaz-Chaparro. 2016. Influence of container type and color on seedling growth of pine in nursery. *Agrociencia* 50:481-492.
- Schmidt, G. 2009. Plastic plant pot. U.S. Patent No. 7,624,535 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-08.
- Schromm, F. 2009. Container with plant identification tag slot. U.S. Patent No. 7,624,536 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-10.
- Salter, P.J. 1961. The irrigation of early summer cauliflower in relation to stage of growth, plant spacing and nitrogen level. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 36:241-263.
- Sieverding, L.A. 2007. Plant pot made from deep-drawn plastic. U.S. Patent No. 7,204,056 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.

- Skinner, R.B. 2002. Container and tag assembly. U.S. Patent No. 6,463,696 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.
- Sonneveld, C. y N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates, p. 1-45. 10th Proefstation voor Tuinbouw Onder Glas te Naaldwijk, Naaldwijk.
- South, D.B., S.W. Harris, J.P. Barnett, M.J. Hains, y D.H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. For. Ecol. Mgt. 204:385-398.
- Spencer, H.A. 1972. Planting from the book. For. Chron. 48:240-241.
- Spencer, H.A. 1977. Container for seedlings. U.S. Patent No. 4,057,932. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-16.
- Spencer, H.A. 1991. Book-Type container for raising seedlings. U.S. Patent No. 4,998,378. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Staby, G.L. 1979. Container with raised indentations for aeration and drainage. U.S. Patent No. 4,173,097. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Stockdale, W.D. 1961. Plastic flower pot. U.S. Patent No. 3,009,603. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Trinidad, O.S., H.J. Vargas, A. Aldrete, U.J. López, y G.A.M. Fierros. 2015. Substrate and container size over the development of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. at the nursery. Rev. Mex. Cienc. For. 6:94-113.
- Urrestarazu, M. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía, p. 1-267. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Urrestarazu, M., V. Gallegos, y J.E. Álvaro. 2017. The use of thermography images in the description of the humidification bulb in soilless culture. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 48:1595-1602.
- Urrestarazu, M., V.M. Gallegos-Cedillo, F. Ferrón-Carrillo, J.L. Guil-Guerrero, M.T. Lao, y J.E. Álvaro. 2019. Effects of the electrical conductivity of a soilless culture system on gamma linolenic acid levels in borage seed oil. PLoS One 14:e0207106.

- Urrestarazu, M., I. Morales, T. La Malfa, R. Checa, A.F. Wamser, y J.E. Álvaro. 2015. Effects of fertigation duration on the pollution, water consumption, and productivity of soilless vegetable cultures. *HortScience* 50:819-825.
- Urrestarazu, M., M. Salas, D. Valera, A. Gómez, y P.C. Mazuela. 2008. Effects of heating nutrient solution on water and mineral uptake and early yield of two cucurbits under soilless culture. *J. Plant Nutr.* 31:527-538.
- Van Noordwijk, M. y P.A.C. Raats. 1980. Drip and drainage systems for rockwool cultures in relation to accumulation and leaching of salts. *Proc. 5th Intl. Congr. Soilless Cult.* 279-287.
- Verlodt, H. y S. Kamoun. 1981. Influence of the volume of the growth bags and the addition of well-made manure to a compost of the seagrass *Posidonia oceanica* L. Del. on the behavior of tomato crop under plastic greenhouse. *Acta Hort.* 126:263-272.
- Yano, T., A. Morisaki, S. Ito, y M. Kitano. 2018. A generalized linear model to predict the growth of potted seedlings of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marcow.) under different initial plant conditions, environmental conditions, and pot size. *Hort. J.* 87:490-498.

IV. CAPÍTULO 2

*Efecto de la morfología del contenedor
sobre la producción de cultivos hortícolas
en cultivo sin suelo*



2

Efecto de la morfología del contenedor sobre la producción de cultivos hortícolas en cultivo sin suelo

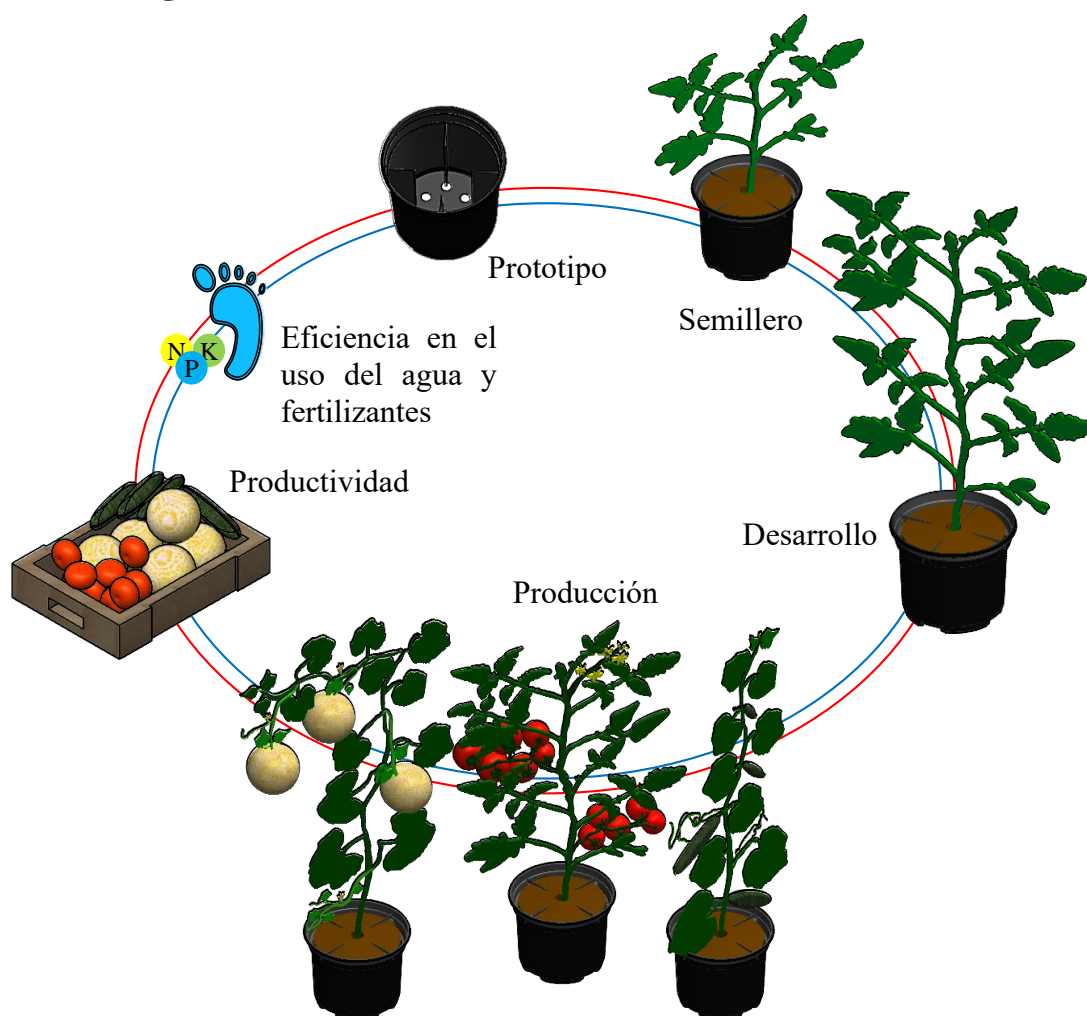
Jesús Gallegos ^{a*}, Miguel Urrestarazu ^a Juan E. Álvaro ^b

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, E-04120 Almería, España

^bPontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Calle San Francisco s/n, La Palma, Quillota, Chile

Artículo enviado a revista

Resumen gráfico



Resumen

El diseño de contenedores ha incrementado las ventajas del mismo sistema de cultivo sin suelo y respecto a otros sistemas de cultivo, permitiendo obtener mayor potencial productivo, mejor calidad de fruta y planta, equilibrio de la humedad en el medio de cultivo, minimizar problemas de raíz y favorecer la gestión de los parámetros de nutrición mineral. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto dos tipos de contenedores sobre los parámetros de fertirrigación, de crecimiento, de calidad de raíz, de rendimiento, de calidad de fruta, de los indicadores de productividad y de calidad de plantas hortícolas en sistema de cultivo sin suelo. Se utilizaron contenedores comerciales circulares (T0) sobre los que se añadió tabiques como piezas plásticas convenientemente ensambladas en su interior (T1). En cada contenedor se trasplantó una plántula de pepino y melón en un estado de dos hojas verdaderas, y dos plántulas de pimiento y tomate con cuatro hojas verdaderas, en sustrato fibra de coco. A lo largo del ciclo del cultivo y de acuerdo con el estado de madurez comercial de los frutos, se cosechó y clasificó por categoría de fruta, y se midieron los parámetros de calidad externa e interna de fruto. Al final del ciclo de producción se midió el área foliar, biomasa fresca y seca, la eficiencia en el uso del agua y el índice de cosecha. Los contenedores con tabiques verticales en el interior, en los cuatro cultivos estudiados, presentaron un incremento significativo promedio en la absorción de agua (10%), en el rendimiento (18%), número de frutos (16%) (comercial y total), en la eficiencia de uso del agua en las categorías comercial (17%) y total (20%), en comparación con los contenedores control. Los contenedores con PVI mostraron mayor eficiencia en el uso del agua y absorción de nutrientes, disminuyendo la emisión de nitratos al medio ambiente. Incrementan sustancialmente los parámetros de calidad de raíz (el volumen y el peso total del sistema radicular), la biomasa de planta y el rendimiento total en las plantas hortícolas. Favorecen un mayor aprovechamiento de la inversión económica al incrementar la eficiencia productiva y al mismo tiempo los beneficios económicos.

Palabras clave: pared vertical interna, rendimiento, eficiencia de uso del agua, índice de cosecha, producción, absorción de agua, morfología del contenedor, sustrato, cultivo sin suelo

4.1. Introducción

En las últimas décadas, la sostenibilidad ambiental y el uso integral y eficiente de los recursos se han convertido en el principal pilar de la visión científica moderna, donde su eje trascendental es el avance tecnológico. Múltiples estudios en mejora genética (Munck, 2016), microbiología (Syed y Tollamadugu, 2019), o en la mejora de las técnicas de producción agrícola como; tecnologías de invernaderos (Valera et al., 2016), de riego (Martínez y Reza, 2014), de fertirriego y cultivo sin suelo (Urrestarazu, 2015), luminotecnia específica (Nájera et al., 2018) y las tecnologías de la información y comunicación (TIC) concluyen que estas mejoras integradas son la base para disminuir el impacto y no comprometer el medio ambiente.

En este contexto, la agricultura protegida a pesar de hacer hincapié en la modificación del ambiente climático ha desarrollado el mejoramiento integrado de estos avances. Al respecto, la producción hortícola en invernadero es la técnica de producción de alimentos más eficiente y funcional en términos del uso de agua, energía y calidad de producto, sin la necesidad de aumentar las demandas de agua de riego (Stanghellini, 2014). Aunado a este sistema, el cultivo sin suelo ha favorecido en mayor proporción a incrementar la eficiencia en el uso del agua y nutrientes, y disminuir la contaminación por iones nutritivos (Gallegos-Cedillo et al., 2016; Blok, 2017), reemplazando el suelo tradicional por sustratos orgánicos (turba, fibra de coco, espuma de poliuretano, etc.) o minerales (perlita, lana de roca, etc.), donde la capacidad de penetración de las raíces de las plantas, las tasas de transporte de agua, nutrientes y oxígeno son más altas, debido principalmente a las características fisicoquímicas, a la curva de liberación de agua y al espacio poroso del sustrato (De Boodt et al., 1974), así como, el manejo del fertirriego y la elección apropiada de la unidad de cultivo (Urrestarazu, 2015). Actualmente, la fibra de coco es el medio de cultivo más utilizado al no implicar consideraciones ambientales y económicas importantes en el manejo (Raviv et al., 2019).

Un factor importante en el cultivo sin suelo (CSS) es la morfología del contenedor, que determina las características morfológicas y fisiológicas de las plantas, principalmente su sistema radical (Spencer, 1972; Liptay y Edwards, 1994; Rune, 2003). Se ha demostrado que el diseño de contenedores ha incrementado las ventajas del sistema de cultivo sin suelo (Gallegos et al., 2020), permitiendo potenciar mayores rendimientos (Blok et al., 2017), mejoras en la calidad de planta (CP), equilibrio de la humedad en el

medio de cultivo, minimizar problemas de la zona de raíz (Spencer, 1972), permitir la gestión de los parámetros de nutrición mineral y favorecer la ruptura de los canales preferentes de distribución de la solución nutritiva (Urrestarazu et al., 2017).

Aunque es bien sabido que existe una importante variedad de formas de contenedores para cultivos hortícolas, ornamentales, plantas forestales e incluso para horticultura urbana (Raviv et al., 2019). La mayoría son diseñados para contener el sustrato y la planta, y cumple objetivos específicos. Desde muy antiguo, Spencer (1972) añadió ranuras orientadas verticales en el interior del contenedor, para evitar las raíces en espiral. Stockdale (1961) incluyó un solo agujero que servía de drenaje. Skinner (2002) y Quan et al. (2011) proporcionaron rigidez y agarre en el reborde superior, para evitar la deformación radial y axial. Por su parte, Landis et al. (1990) indica que el contenedor perfecto aún está lejos de ser desarrollado, porque este depende del cultivo y el propósito específico. En la actualidad, los contenedores de sección circular y cuadrada ahusados de arriba a abajo son los más utilizados en el mercado de contenedores.

Estudios en plantas de vivero forestal reportan que las ranuras, nervios, hendiduras, costillas, impedimentos mecánicos, crestas, surcos orientados verticalmente o nervaduras en las superficies interiores de los contenedores (Rune, 2003) disminuyen la espiralización de raíces (Spencer, 1972), favorecen la conformación eficiente de raíz y mejora la calidad de las plantas (Amoroso et al., 2010). En cultivos hortícolas, Liptay y Edwards (1994) encontraron que la superficie interna lisa de los contenedores afectaba el crecimiento de las raíces en plántulas de tomate, respecto a contenedores de superficie interna rugosa. En la actualidad Gallegos et al. (2020) trabajando con distintas familias de plantas hortícolas con fibra de coco y perlita, encontraron que la adición de tabiques al interior de diferentes morfologías de contenedores no solo disminuye los problemas mecánicos de las raíces, sino que además favorecen la producción de biomasa e incrementan sustancialmente el crecimiento y el peso total del sistema radicular, permitiendo una mayor capacidad de resistencia frente a estrés hídrico. Además, se ha comprobado que las raíces a menudo crecen dentro de los límites espaciales y a lo largo de la superficie de los contenedores, y la adición de tabiques en el interior de los contenedores aumenta la superficie de contacto entre el contenedor y la raíz, lo que indica que, una gran superficie puede sugerir un aumento sustancial del crecimiento de raíces y beneficiar la eficiencia de producción de las especies hortícolas. Sin embargo, no existen

estudios que desarrollen evaluaciones sobre el comportamiento potencial en ámbito productivo de las plantas hortícolas. Tomando de referencia lo anterior. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de dos unidades de cultivo con y sin paredes verticales internas sobre los parámetros de calidad de raíz, el rendimiento, la calidad de frutos, el uso eficiente de agua y iones nutritivos en cuatro especies hortícolas en cultivo sin suelo.

4.2. Materiales y métodos

El experimento se realizó en un invernadero de conformación estructural tipo Almería “raspa y amagado” de características similares a las descritas por Valera et al. (2016), ubicado en las coordenadas 36°49’36” N y 02°24’19” O, con orientación noreste-sureste, al igual que las líneas de cultivo, en las instalaciones de la Universidad de Almería, España.

4.2.1. Material vegetal

El material vegetal empleado fue plantas de tomate, pimiento, pepino y melón, las características de los cultivares se describen en la Tabla 1. El medio de cultivo utilizado fue fibra de coco (compuesto por 85% fibra y 15% turba) con un volumen estandarizado de 15 L por contenedor en cada cultivo. Las propiedades fisicoquímicas de la fibra de coco Pelemix® fueron descritas por Rodríguez et al. (2014) y Urrestarazu et al. (2019). En cada contenedor se trasplantó una plántula de pepino y melón en un estado de dos hojas verdaderas, y dos plántulas de pimiento y tomate cuando se tenía cuatro hojas verdaderas, el tamaño promedio de plántula fue de 10-12 cm. Los cultivos se desarrollaron bajo el sistema de cultivo sin suelo con un marco de plantación de 1,60 m entre líneas y 0,5 m entre plantas, para una densidad de plantación de 1,25 plantas/m² en pepino y melón, y 2,5 plantas/m² en pimiento y tomate. El sistema de tutorado fue tipo vertical u holandés. El manejo de los cultivos se realizó de acuerdo con las necesidades específicas del ciclo de cada cultivo, siguiendo los métodos comúnmente utilizados en el modelo intensivo de producción hortícola de la provincia de Almería, España.

Tabla 1. Descripción de las especies cultivadas por ciclo de cultivo.

| Cultivo | Especie | Variedad | Tipo | Fecha de trasplante | Fin de cosecha |
|----------|--------------------------------|---------------|------------|---------------------|----------------|
| Tomate | <i>Solanum lycopersicum</i> L. | Granoval | Pera | 20/10/2017 | 09/02/2018 |
| Pepino | <i>Cucumis sativus</i> L. | SV0091CE | Holandés | 31/10/2017 | 15/03/2018 |
| Melón | <i>Cucumis melo</i> L. | Terral-Clause | Galia | 27/02/2018 | 23/06/2018 |
| Pimiento | <i>Capsicum annuum</i> L. | Top Arnon | California | 05/12/2017 | 07/07/2018 |

4.2.2. Tratamientos

Los tratamientos consistieron en comparar dos morfologías de contenedores, durante todo el ciclo productivo de cuatro cultivos hortícolas analizados de forma independiente. Se utilizaron contenedores comerciales circulares (Pöppelmann TEKU[®], Alemania) serie MCC ahusados de la parte superior a inferior de 20 L, sobre los que se añadió los tabiques como piezas plásticas convenientemente ensambladas para incrementar la superficie de contacto radical en el interior de los contenedores (Fig. 1). Los contenedores de sección circular sin tabiques verticales internos se utilizaron como tratamiento control (T0= ⊖) y los contenedores de sección circular con tabiques verticales internos como tratamiento a evaluar (T1= ⊕) (Tabla 2). La modificación del contenedor se hizo a partir de un diseño realizado en el software SólidWorks[®] (2018). Las dimensiones de cada tabique utilizado en el tratamiento (T1) fue de 19,5 x 6 cm, colocados de manera equidistante con un ángulo de 90°.

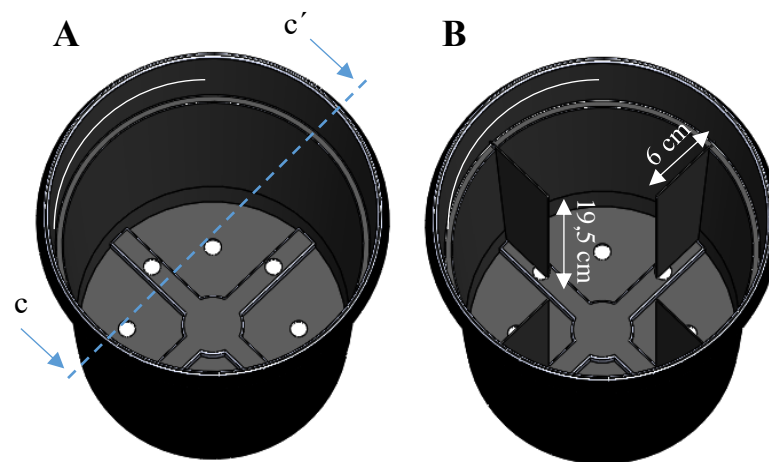


Fig. 1. Tratamientos: **A.** Contenedor control (T0), **B.** Contenedor con tabiques verticales internos (T1). Diseños realizados en SolidWorks[®] (2018).

La línea continua indica el nivel de llenado de sustrato en el contenedor (15 L).

Para cada morfología de contenedor se calculó la superficie total de contacto (A_t , expresado en cm^2) de acuerdo con las especificaciones del contenedor, el volumen de sustrato aplicado y la superficie de contacto de los cuatro tabiques internos perpendiculares al eje longitudinal del contenedor, similar a lo descrito por Gallegos et al. (2020).

$$At (\odot) = \pi r^2 + \pi \left(\sqrt{(R-r)^2 + h^2} \right) (R+r) \quad (1)$$

$$At_t = 4 h (b + 2 a) \quad (2)$$

$$At (\oplus) = \pi r^2 + \pi \left(\sqrt{(R-r)^2 + h^2} \right) (R+r) + At_t \quad (3)$$

donde h es la altura desde la base del contenedor hasta la superficie de sustrato (cm), R y r son el radio de la base superior e inferior de la sección circular (cm), a y b son el largo y ancho de la sección de la pared vertical interna (cm).

En la Tabla 2 se resume las especificaciones del cálculo de la superficie total de contacto (At) entre la altura del sustrato para cada morfología de contenedor expresado en cm², donde At (\odot) = 2560 cm²; At (\oplus) = 3507 cm².

Tabla 2. Características de los tipos de contenedores utilizados (véase la **Fig. 1**).

| Forma | Tipo de contenedor | Sección transversal | Volumen total del contenedor (L) | Volumen de sustrato (L) | Número de paredes verticales internas | Área individual de cada pared vertical con el sustrato (cm ²) | Área de contacto entre la raíz y el contenedor (cm ²) |
|--------------|--------------------|---------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|---|---|
| T0: \odot | truncocónico | circular | 20 | 15 | - | - | 2560 |
| T1: \oplus | truncocónico | circular | 20 | 15 | 4 | 236,93 | 3507 |

4.2.3. Programación de la fertirrigación

En ambos tratamientos se utilizó una solución nutritiva estándar para una CE 2,2 (dS/m) de acuerdo con el balance iónico nutritivo recomendado por Sonneveld y Straver (1994) (Tabla 3). El pH se ajustó a 5,8 con la adición de ácido nítrico diluido. La aplicación del fertirriego se realizó una vez agotado el 10% de agua fácilmente disponible en el sustrato, más el volumen necesario para obtener entre un 20-30% de drenaje (Rodríguez et al., 2015; Gallegos-Cedillo et al., 2018).

Tabla 3. Solución nutritiva estándar empleada durante el ciclo de cultivo.

| CE (dS/m) | pH | Macronutrientes (mM) | | | | | | | Micronutrientes (μ M) | | | | | |
|-----------|-----|----------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------------------|---|-------------------------------|----------------------------|----|------|----|----|-----|
| | | K ⁺ | NH ₄ ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | NO ₃ ⁻ | H ₂ PO ₄ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Fe | Mn | Cu | Zn | B | Mo |
| 2,2 | 5,8 | 7,0 | 0,5 | 3,8 | 1,0 | 10,5 | 1,5 | 2,5 | 15 | 10 | 0,75 | 5 | 30 | 0,5 |

Basado en Sonneveld y Straver (1994)

Diariamente se registraron los parámetros de la solución nutritiva suministrada y del volumen de drenaje, para ajustar y modificar la programación de fertirrigación en función de las necesidades de cada cultivo (Urrestarazu, 2015). Un recipiente de control y dos bandejas de recogida de drenaje para cada tratamiento y cultivo sirvieron como punto de referencia para monitorear la fertirrigación suministrada y la respuesta de absorción (Fig. 2). Se midió el volumen (L, con una probeta graduada de polipropileno Thermo Scientific™ Nalgene™, USA), el pH y CE (dS/m) utilizando un conductivímetro y un potenciómetro Crison MM40⁺ (LPV2500.98.0002; Hach, Vizcaya, España), los nitratos y potasio con microelectrodos específicos LAQUAtwin-Horiba, Japón, B-742 y B-731, respectivamente, y se cuantificó la absorción (mmol/m^2) y emisión (g/m^2) de nitratos y potasio.

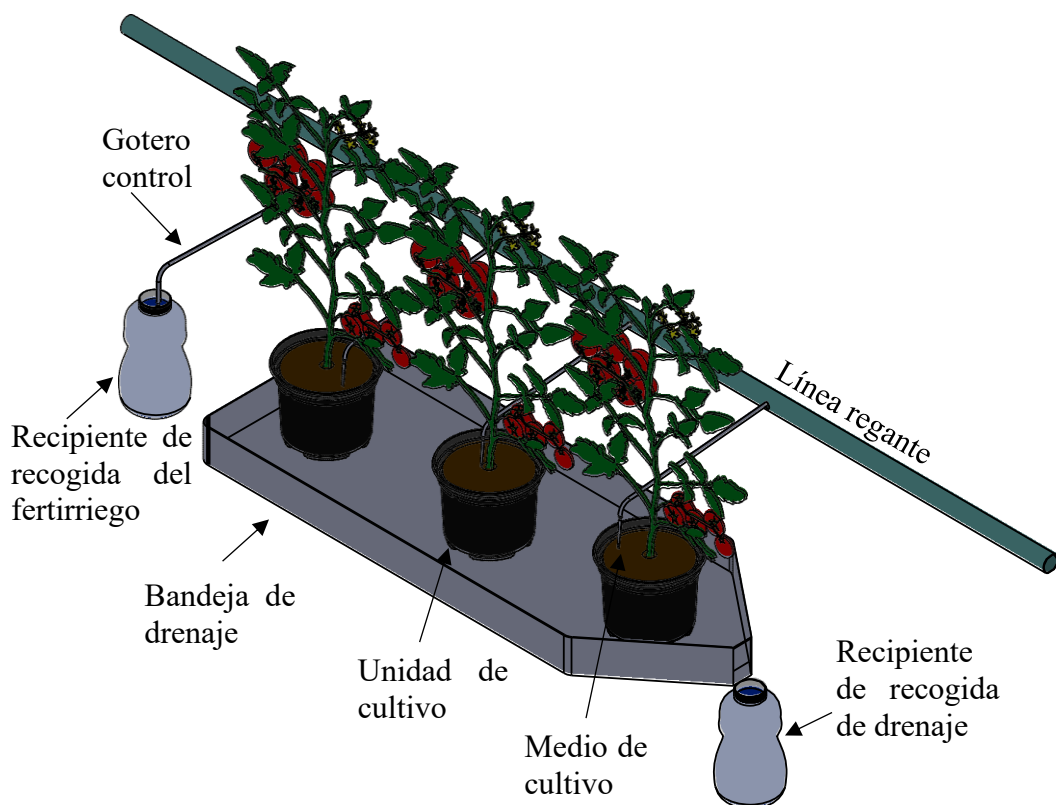


Fig. 2. Sistema de control de fertirriego.

4.2.4. *Parámetros de crecimiento vegetal*

Al final del ciclo de producción de cada cultivo, se midieron los parámetros de crecimiento vegetativos. Se midió el diámetro del tallo (mm; medido con un calibre

digital (Stainless Hardened, España)), número de hojas mayores a un cm², altura de la planta (cm), longitud de la raíz (cm; medido con una cinta métrica), volumen radical (mL; medido por desplazamiento de agua en un vaso de precipitados de 2000 mL) y el área foliar (cm²/planta, medido con el análisis de imagen con la cámara digital réflex alpha 58, Japón), similar a lo mencionado por (Gallegos et al., 2020) y calculado por planimetría en AutoCAD® (2016).

Las plantas fueron separadas en hoja, tallo, raíz y total, se obtuvo el peso fresco (g/planta, con una balanza analítica de precisión (Adventurer® Analytical-OHAUS modelo AX124/E, USA)), de 0,001 g de precisión. El peso seco (g/planta) de cada órgano de la planta se obtuvo colocando el material en un horno de convección forzada (Thermo Scientific™ Heratherm®, Alemania) a 75 °C hasta peso constante y se midió similar al peso fresco.

4.2.5. Control de producción

Se recolectaron frutos individuales de acuerdo con el estado de madurez correspondiente a cada cultivo. La recolección de fruta se realizó de forma manual y se clasificaron por la categoría de fruta comercial predominante atendiendo a las normas del reglamento DOUE (2000) y DOUE (1999), utilizando las tablas de clasificación por calibre y peso de fruto para diferentes cultivos hortícolas descritas por Domene y Segura (2014a) y por la Alhóndiga La Unión, referencia de la mayoría de las cooperativas agrícolas en Almería (Tabla 4). El rendimiento de cada tamaño se agrupó a lo largo del ciclo de cultivo y los valores medios se muestran en las Fig. 4, 5, 6 y 7. Se contabilizó el número de frutos por planta para cada cultivo y se determinó la producción total, producción comercial, producción no comercial, producción por categorías y peso medio del fruto comercial expresados en kg/m², estos parámetros se midieron con una balanza analítica de precisión (0,001 g) (Adventurer® Analytical-OHAUS modelo AX124/E, USA).

Tabla 4. Clasificación de hortalizas por calibres y pesos.

| Tomate | Pepino | Melón | Pimiento |
|----------------|----------------|-----------------------|----------------|
| GGG > 102 (g) | 16 250-300 g | Calibre 3 1300-1950 g | GGG 130-110 mm |
| GG 80-120 (g) | 14 300-350 g | Calibre 4 1150-1300 g | GG 110-90 mm |
| G 60-80 (g) | 12P 350-400 g | Calibre 5 850-1150 g | G 90-70 mm |
| D No comercial | 12M 400-500 g | Calibre 6 700-850 g | M 70-50 mm |
| | 12G 500-600 g | Calibre 7 600-700 g | D No comercial |
| | 10 600-800 g | Calibre 8 550-600 g | |
| | D No comercial | Calibre 9 500-550 g | |
| | | Calibre 10 450-500 g | |

4.2.6. *Parámetros de calidad de la fruta*

Para cada cultivo y tratamiento se midieron los parámetros de calidad externa e interna de los frutos (Domene y Segura, 2014b).

Calidad interna de fruto. De cada cosecha y cultivo, se utilizó una submuestra de cuatro frutos para hacer una solución homogeneizada (en melón se realizó abarcando el gradiente interno para obtener una medida representativa) para medir el pH, la CE (medido con un potenciómetro Crison MM40⁺ LPV2500.98.0002; Hach, Vizcaya, España), el contenido de sólidos solubles (expresados en °Brix) (medido con un refractómetro de mano, USA), y la cantidad de nitratos y potasio del fruto (medido con electrodos específicos B-742 y B-731, respectivamente, LAQUAtwin-Horiba, Japón).

Medidas morfométricas de los frutos. En los cuatro cultivos se realizó clasificación por calibre y peso, y de manera simultánea, los pepinos se clasificaron de acuerdo con su longitud (cm; medido con una cinta métrica) y diámetro ecuatorial (mm, medido con un calibre digital (Stainless Hardened, España)), y los melones acorde con su longitud transversal y longitudinal (cm; medido con una cinta métrica). La firmeza de los frutos se determinó utilizando el método tradicional (destrutivo) con un penetrómetro de mano (Kg, medido con penetrómetro de mano Effegi (Facchini, Alfonsine, Italia)). En tomate, pimiento y pepino se utilizó el puntal de 8 mm de diámetro recomendado para frutos duros (equivale a una superficie de 0,5 cm²) y en melón el puntal de 11 mm (1 cm²), recomendado para frutos blandos. En pimiento y melón se realizaron tres mediciones en la zona ecuatorial, en pepino una medición en la zona peduncular y distal, y en tomate en dos puntos opuestos diametralmente situados en la zona ecuatorial del fruto similar a los descrito por Nájera et al. (2018).

Contenido de humedad o sólidos totales (materia seca). Se recolectó una muestra de frutos de cada cultivo y tratamiento para la evaluación del contenido de humedad y materia seca (100 - % humedad). El método empleado se basó en el principio operacional del secado en estufa que consiste en la pérdida de peso de la muestra por evaporación del agua del fruto a una determinada temperatura. Para cada cultivo se tomaron 200 g de muestra fresca medido con una balanza analítica de precisión (Adventurer[®] Analytical-OHAUS modelo AX 124/E, USA) de 0,001 g de precisión. El peso seco de la muestra (g) se obtuvo después de secar los frutos en una estufa de aire forzado bajo condiciones

normalizadas (ThermoScientific Heratherm[®], Alemania) para su secado a 70 °C hasta peso constante con una precisión de una centésima de gramo.

4.2.7. Indicadores de calidad de planta

Se analizó el crecimiento de las plantas utilizando medidas directas de crecimiento tomando como variables base la biomasa seca y el área foliar de cada especie y tratamiento, al final del ciclo agrícola. La materia seca se determinó por la diferencia entre masa fresca y seca. El área foliar se obtuvo de la medida de la superficie de las hojas fotosintéticamente activas. Se calcularon los índices biométricos de calidad de planta con las expresiones matemáticas; 4) La razón Altura/Diámetro (RAD), que relaciona la resistencia de la planta con la capacidad fotosintética de la misma, el rango óptimo para una mejor calidad de planta se presenta entre 5 y 10, donde valores superiores indican una planta muy alta respecto al diámetro y valores inferiores indican una planta de poca altura respecto al diámetro de tallo, 5) La razón Diámetro/Altura (RDA) donde el rango óptimo varía entre 0,01 y 0,02, 6) La razón Tallo/Raíz (ITR) (Iverson, 1984), determina el balance entre la superficie de transpiración y la superficie absorbente de la planta, valores cercanos a 1 indican un equilibrio de ambas superficies y presentan mayor probabilidad de supervivencia en zonas secas, 7) La razón Altura/Tallo (RAT), 8) La razón Tallo/Altura (RTA), 9) El Índice de Calidad de Dickson (ICD) es un índice que expresa el equilibrio de la distribución de la masa y la robustez, permite seleccionar plantas bien proporcionadas y con mayor vigor. Por lo tanto, valores mayores de este índice representa una mejor calidad de planta (Dickson et al., 1960; Wei et al., 2020), 10) El Área Foliar Específica (AFE) y 11) El Coeficiente de Área Foliar (CAF), un valor bajo del AFE y CAF en las plantas indica una mejor resistencia a estrés de trasplante; las ecuaciones son las siguientes:

$$\text{RAD} = \text{Altura (cm)}/\text{Diámetro de Tallo (mm)} \quad (4)$$

$$\text{RDA} = \text{Diámetro de Tallo (mm)}/\text{Altura (cm)} \quad (5)$$

$$\text{ITR} = \text{Biomasa Seca (Tallo + Hoja) (g)}/\text{Biomasa Seca de Raíz (g)} \quad (6)$$

$$\text{RAT} = \text{Altura (cm)}/\text{Biomasa Seca de Tallo (g)} \quad (7)$$

$$\text{RTA} = \text{Biomasa Seca de Tallo (g)}/\text{Altura (cm)} \quad (8)$$

$$\text{ICD} = \text{Biomasa Seca Total (g)}/(\text{RAD} + \text{ITR}) \quad (9)$$

$$AFE = \text{Área Foliar (cm}^2\text{/planta)}/\text{Biomasa Seca de Hoja (g/planta)} \quad (10)$$

$$CAF = \text{Área Foliar (cm}^2\text{/planta)}/\text{Biomasa Seca Total (g/planta)} \quad (11)$$

4.2.8. Indicadores de productividad

Para ambos tratamientos en cada uno de los cultivos estudiados, se evaluó la eficiencia o capacidad productiva de las especies cultivadas de acuerdo con el Índice de Cosecha (IC) que se define como la relación entre el rendimiento del órgano cosechable y la biomasa de la planta (Ecuación 12) (Unkovich et al., 2010; Di Benedetto y Tognetti, 2016) y la eficiencia en el uso del agua (EUA), también conocida como productividad del agua, por la relación existente entre la producción de materia seca o rendimiento en kg de producto producido por m³ de agua utilizada (Ecuación 13) (Condon y Hall, 1997; Camacho y Fernández, 2015). El índice de cosecha y la eficiencia en el uso del agua son variables directamente proporcionales, si incrementa una de ellas la otra también incrementa o viceversa (Stanghellini, 2014). Estos parámetros indican la productividad del agua y la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos por un cultivo determinado que permite evaluar el valor económico potencial del aprovechamiento de los recursos.

$$IC = \text{Rendimiento Total en Biomasa Seca (g)}/\text{Biomasa Seca Total (g)} \quad (12)$$

$$EUA = \text{Producción (kg)}/\text{Agua utilizada (m}^3\text{)} \quad (13)$$

4.2.9. Diseño experimental y análisis estadístico

Se realizaron cuatro experimentos independientes. Para cada cultivo y sustrato se realizó un diseño experimental de cuatro bloques completamente al azar (Montgomery, 2004; Gutiérrez y De la Vara, 2008). Cada tratamiento estaba compuesto de cuatro (pepino y melón) y ocho (Tomate y pimiento) plantas en cada bloque.

Los resultados fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA), la separación de medias se hizo por un test Tukey a un $P \leq 0,05$. El tratamiento matemático de los datos se realizó utilizando el paquete Statgraphics Centurion® XVIII (2018) y Excel de Microsoft Office (2016).

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Efecto sobre los parámetros de fertirriego, absorción de agua, nutrientes y emisión de nitratos.

En la Tabla 5 se describen los principales parámetros del manejo del fertirriego, la absorción de agua y la emisión de nitratos en un sistema de cultivo sin suelo en cuatro cultivos hortícolas. En todos los cultivos evaluados, el porcentaje de drenaje fue estadísticamente superior con los contenedores sin paredes verticales internas (T0), en promedio representó un incremento del 14,53% en el volumen de drenaje con respecto al tratamiento de contenedores con paredes verticales internas (T1) que registró valores más próximo a las consignas de drenaje establecidas (T0= 40,46% vs T1= 34,54%). Con relación al pH del drenaje, el T0 fue estadísticamente diferente respecto al tratamiento T1, excepto en el cultivo de pepino donde no se muestran diferencias significativas. De manera general en todos los cultivos y ambos tratamientos estudiados, los valores de pH se encuentran dentro de los valores óptimos para el crecimiento de los cultivos, el pH que se mantiene en el entorno de la raíz afecta fuertemente la disponibilidad de los nutrientes suministrados con el agua de riego (Sonneveld y Voogt, 1997, 2009). La CE de la rizosfera no muestran diferencias significativas para ninguno de los cultivos y tratamientos. El seguimiento constante de los parámetros de fertirriego y los valores obtenidos en los drenajes son necesario para ajustar las consignas de fertirriego, además que puedan dar información del comportamiento y sanidad de la rizosfera de las plantas (Urrestarazu, 2015; Gallegos-Cedillo et al., 2016).

La absorción de agua en cada uno de los cultivos evaluados con el tratamiento T1 respecto al control T0, presentó una mejora estadísticamente significativa que supuso en promedio un incremento del 10% (Table 5). Así mismo, la absorción de nutrientes en pimiento y pepino aumentó un 10 y 15% en la asimilación de NO_3^- y un 15 y 17% su capacidad de absorción de K^+ con el tratamiento diseñado con paredes verticales internas T1 respecto del tratamiento control T0. El melón y tomate no presentaron diferencias significativas en la absorción de estos nutrientes. Es bien conocido que la absorción de agua y nutrientes guardan una estrecha relación y puede estar condicionada por las condiciones de cultivo como una alta salinidad en la rizosfera de las plantas. Por otra parte, el agotamiento de los nitratos en sí mismo puede indicar un mayor crecimiento de la planta, pero lo más importante es que demuestra la capacidad de absorción de la planta,

utilizada para calcular la máxima absorción de la planta (Blok et al., 2017). Esta tendencia puede ser consecuencia de la presencia de tabiques verticales en el interior de los contenedores que mejoran la calidad y arquitectura de raíz (Liptay y Edwards, 1994; Amoroso et al., 2010; Gallegos et al., 2020) y permite una fertirrigación más eficiente y efectiva, al favorecer la ruptura potencial de los canales preferentes de distribución de bulbos de humidificación que se forman en el patrón de flujo de la fertirrigación en el interior del contenedor (Urrestarazu et al., 2017) o la mejora que pueden presentar los patrones de flujo en un sustrato saturado o semisaturado de acuerdo con su gradiente de distribución horizontal o vertical (De Rijck y Schrevens, 1998).

La emisión de NO_3^- presentan una tendencia opuesta a la absorción de nutrientes en el cultivo de pimiento, pepino y tomate, donde el tratamiento (T1) disminuyó significativamente la emisión de nitratos (NO_3^-) un 10,30% en promedio respecto al tratamiento control (T0). A excepción del cultivo de melón donde no se mostraron diferencias estadísticas. La contaminación de los acuíferos es una de las principales preocupaciones en la horticultura protegida y según la normativa europea el umbral límite de nitratos en el agua de riego debe ser de 50 mg L. En investigaciones recientes Moya et al. (2017) trabajando con plantas de tomate en fibra de coco obtuvieron valores similares en absorción de agua y nutrientes NO_3^- y K^+ (en mol/m²), sin embargo, reportan en el tratamiento control (2,2 dS/m) una emisión de nitratos mayor (>167 g/m²) que los obtenidos en este estudio (Tabla 5).

4.3.2. Efecto sobre los parámetros vegetativos, biomasa fresca y seca.

El área foliar se vio significativamente incrementada en torno al 11,80% en los cultivos de pimiento, melón y tomate con el tratamiento T1 en los contenedores con tabique vertical en el interior respecto a los contenedores testigo T0, con excepción del cultivo de pepino donde no se registró un incremento estadístico (Tabla 6). Los valores del diámetro de tallo en pimiento y tomate fueron en promedio mayores (9,48%) cuando se cultivaron en los contenedores del tratamiento T1 respecto a los cultivados con el tratamiento control, a excepción de los cultivos pepino y melón que no presentaron resultados estadísticos significativos. Un mayor diámetro indica mejor capacidad de transporte de agua y nutrientes a la parte aérea de la planta. Así mismo, el volumen radical de las plantas presentó un aumento promedio del 29,72% con el tratamiento T1 respecto al tratamiento control (Tabla 6), lo que conduce a una mayor capacidad de absorción, aumento en la

estabilidad de la planta y un mejor equilibrio de la superficie de transpiración y superficie absorbente para mantener su estado hídrico, tanto la salud como el vigor de las raíces también son importantes en cultivos con riego deficitario o en condiciones de escasez de regadío (Fererres y González-Dugo, 2009). La mejor distribución del sistema radicular a lo largo de los cuadrantes externos e internos de la superficie de contacto del medio de cultivo (Fig. 3) en el tratamiento T1, puede ser debido a la diversidad de canales preferentes en el sustrato, la mayor homogeneidad en el suministro de la solución nutritiva en el contenedor, expresándose en un incremento en el crecimiento y rendimiento del cultivo.

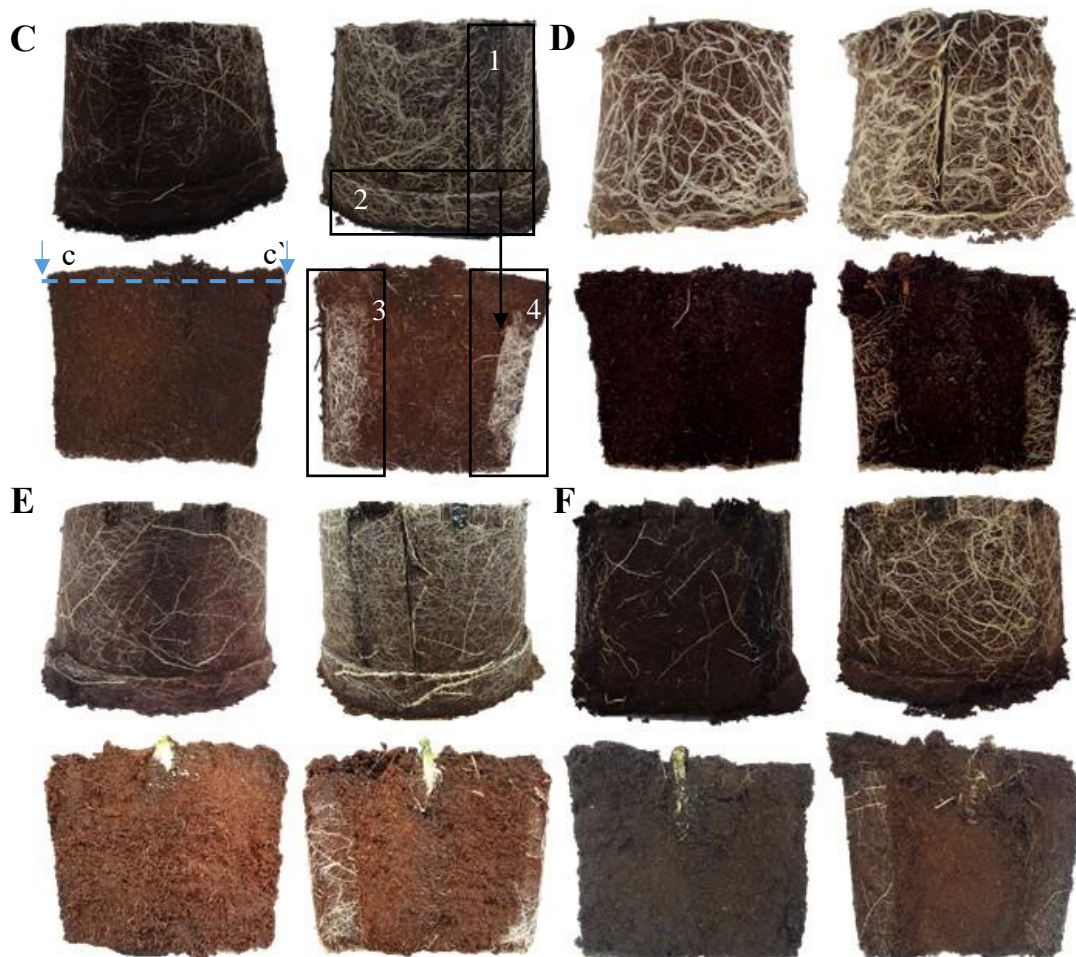


Fig. 3. Unidad de crecimiento de tomate (C), pimiento (D), pepino (E) y melón (F). c-c' sección transversal (ver Fig. 1) en fibra de coco en los contenedores control (T0) (izquierda) y con tabiques verticales (T1) (derecha). Recuadros 1 (ubicación de los PVI), 2, 3 y 4 indican las zonas de alta incidencia en raíz.

Tabla 5. Parámetros de fertirrigación y emisión de nutrientes al medio ambiente en dos tipos de contenedores circulares y en sustrato fibra de coco, para diversos cultivos hortícolas durante el ciclo de cultivo.

| Cultivo | Drenaje | | | | | | | | Absorción | | | | Emisión | | | |
|----------|---------|---------|--------|--------|-----------|--------|--------------------------|----------|--|--------|--------------------------------------|--------|--|----------|------------------------------------|---------|
| | % | | pH | | EC (dS/m) | | Agua (L/m ²) | | NO ₃ ⁻ (mol/m ²) | | K ⁺ (mol/m ²) | | NO ₃ ⁻ (g/m ²) | | K ⁺ (g/m ²) | |
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Pimiento | 41,44 a | 36,25 b | 5,68 a | 5,55 b | 3,29 a | 3,05 a | 351,75 b | 382,15 a | 3,65 b | 4,01 a | 2,15 b | 2,47 a | 183,76 a | 161,45 b | 68,38 a | 55,98 b |
| Pepino | 43,81 a | 36,39 b | 5,03 a | 4,82 a | 4,05 a | 3,92 a | 238,56 b | 268,10 a | 2,87 b | 3,29 a | 1,57 b | 1,83 a | 200,56 a | 174,52 b | 71,38 a | 61,03 a |
| Melón | 37,52 a | 33,64 b | 5,87 a | 5,52 b | 2,31 a | 2,24 a | 217,62 b | 231,17 a | 1,81 a | 1,85 a | 1,05 a | 1,15 a | 58,75 a | 56,22 a | 35,82 a | 31,99 b |
| Tomate | 39,07 a | 31,90 b | 6,17 a | 6,05 b | 3,62 a | 3,60 a | 187,55 b | 208,73 a | 2,49 a | 2,56 a | 1,65 a | 1,78 a | 74,48 a | 70,19 b | 51,55 a | 46,39 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

Tabla 6. Parámetros de crecimiento vegetativo en diferentes cultivos hortícolas.

| Cultivo | Altura (m) | | Número de hojas | | Volumen radical (mL) | | Diámetro de tallo (mm) | | Longitud de raíz (cm) | | Área foliar (m ² /planta) | |
|----------|------------|--------|-----------------|----------|----------------------|-----------|------------------------|---------|-----------------------|---------|--------------------------------------|--------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Pimiento | 1,96 a | 1,97 a | 216,31 b | 233,81 a | 1014,64 b | 1215,00 a | 22,07 b | 22,54 a | 31,06 a | 31,19 a | 1,30 b | 1,45 a |
| Pepino | 2,97 a | 2,96 a | 39,31 a | 40,06 a | 344,45 b | 452,71 a | 13,20 a | 13,62 a | 35,81 a | 36,75 a | 1,29 a | 1,34 a |
| Melón | 3,19 a | 3,26 a | 45,00 a | 45,69 a | 265,84 b | 340,01 a | 15,51 a | 15,76 a | 37,67 a | 38,42 a | 0,87 b | 0,96 a |
| Tomate | 1,41 a | 1,44 a | 18,81 a | 18,94 a | 673,40 b | 941,41 a | 7,67 b | 8,96 a | 41,63 a | 45,25 a | 0,60 b | 0,68 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

La presencia de tabiques verticales en el interior del contenedor ejerció un claro y significativo efecto en la biomasa fresca de raíz (16,62%) y total (8,88%) (Tabla 7), así como en la biomasa seca de hoja (10,86%), raíz (22,91%) y total (14,50%) de los cultivos hortícolas estudiados (Tabla 8). Resultados similares son reportados por Gallegos et al. (2020) al trabajar en cultivo sin suelo con plántulas de pepino, pimiento y tomate, encontraron que la adición de tabiques al interior de diferentes morfologías de contenedores favorece la producción de biomasa en plantas hortícolas e incrementan sustancialmente el crecimiento total del peso radical que permite una importante capacidad de afrontar un estrés hídrico. Liptay y Edwards (1994) encontraron que la superficie interna lisa de los contenedores afectaba el crecimiento de raíz, mientras que una superficie rugosa daba lugar a un crecimiento de raíz más gruesa, pero esto no tenía efecto en el crecimiento de los brotes. Heller et al. (2015) describen que la morfología del contenedor (mismo volumen y diferente geometría) o la frecuencia de riego no afectaba el peso fresco de lechuga, aunque, insidiosa sobre otros aspectos como son el régimen de agua y temperatura. En plantas forestales, Rune (2003) al trabajar con pino escoces obtuvo que ni el diseño ni el volumen de contenedor afectaron la altura y el diámetro del tallo de los árboles, sin embargo, las plántulas cultivadas en contenedores de paredes de nervaduras verticales (pared ranurada) tenían una mayor superficie de raíces en proporción al diámetro del tallo, menos espirales de raíces y promueven una morfología de raíz más natural en comparación con los árboles cultivados en contenedores de pared sólida. Amoroso et al. (2010) trabajando con tilo de hoja pequeña y olmo de campo reportaron un nulo efecto sobre la biomasa de los brotes, escasa producción de biomasa de raíz, disminución de la deformación de raíz, no obstante, sugieren mejor calidad de raíz al utilizar contenedores con impedimentos mecánicos o ranuras en la pared interna respecto a contenedores de pared lisa “tradicionales”. Ruter (1994) y Gilman et al. (2003), mencionan que plantas que crecen en contenedores lisos durante un ciclo de producción dan como resultado un mayor número de raíces deformadas y deterioro de la vitalidad de la planta.

Tabla 7. Biomasa fresca (g/planta) de diferentes cultivos hortícolas.

| Cultivo | Hoja | | Tallo | | Raíz | | Total | |
|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Pimiento | 764,36 b | 807,53 a | 888,83 a | 929,01 a | 1647,91 b | 1918,59 a | 3301,11 b | 3655,13 a |
| Pepino | 563,86 a | 560,03 a | 621,13 a | 612,46 a | 552,65 b | 695,81 a | 1737,64 b | 1868,30 a |
| Melón | 468,36 a | 472,89 a | 569,53 b | 601,66 a | 421,50 b | 436,94 a | 1459,39 b | 1511,49 a |
| Tomate | 398,73 b | 422,35 a | 148,87 a | 149,57 a | 747,09 b | 900,16 a | 1294,69 b | 1472,09 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

Tabla 8. Biomasa seca (g/planta) de diferentes cultivos hortícolas.

| Cultivo | Hoja | | Tallo | | Raíz | | Total | |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Pimiento | 125,92 b | 140,26 a | 191,80 a | 204,81 a | 158,56 b | 190,47 a | 476,28 b | 535,53 a |
| Pepino | 86,55 b | 91,85 a | 46,85 a | 46,84 a | 62,04 b | 77,76 a | 195,44 b | 216,46 a |
| Melón | 96,50 b | 105,51 a | 39,79 a | 41,82 a | 48,77 b | 55,60 a | 185,05 b | 202,93 a |
| Tomate | 49,47 b | 57,68 a | 18,33 a | 18,81 a | 118,70 b | 156,90 a | 186,50 b | 233,39 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

4.3.3. Efecto sobre los parámetros de calidad de fruto

La adición de tabiques verticales en el interior de los contenedores no presentó una clara tendencia sobre los parámetros de calidad interna de fruta en ninguno de los cultivos estudiados (Tabla 9). Estos resultados pueden ser consecuencia principalmente a que los factores (régimen de riego, manejo de cultivo, temperaturas (Toor y Savage, 2006), intensidad y calidad de luz (Urrestarazu et al., 2016; Nájera et al., 2018), y fertirrigación (Moya et al., 2017) que afectan el desarrollo del cultivo y la calidad de fruta fueron iguales en ambos tratamientos y acorde con las especificaciones de cada cultivo. De manera particular, en pimiento se registró un incremento significativo en el valor del contenido de sólidos solubles cuando se utilizaron contenedores con tabiques verticales, contrario a lo registrado en el pH cuando se cultivaron con contenedores sin tabiques internos, estos valores son similares a los valores de referencia descritos por (Domene y Rodríguez, 2014b). En melón se obtuvo un incremento significativo en pH, CE y K^+ al utilizar contenedores con tabiques verticales y un valor de NO_3^- estadísticamente mayor al utilizar los contenedores sin tabiques verticales. Los cultivos de pepino y tomate no presentaron diferencias estadísticas en la calidad interna de la fruta por la modificación en la morfología del contenedor.

En los cuatro cultivos el porcentaje del contenido de materia seca y de humedad no mostraron diferencias estadísticas significativas al utilizar los contenedores del tratamiento T1 en comparación con el tratamiento control T0. En caso particular, el melón incrementó sus valores del contenido de materia seca y disminuyó el porcentaje de humedad cuando se midieron estos parámetros considerando la corteza de fruto, aunque no evidenció diferencia significativa entre tratamientos. Tendencia similar se registró con los valores de firmeza de fruto, a excepción del cultivo de pepino con valores superiores al utilizar los contenedores testigo T0 respecto a los contenedores T1.

Tabla 9. Parámetros de calidad de fruta en diferentes especies hortícolas.

| Parámetros | Pimiento | | Pepino | | Melón | | Tomate | |
|---------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Firmeza (kg) | 4,81 a | 4,90 a | 7,61 a | 7,35 b | 1,96 a | 1,85 a | 2,23 a | 2,18 a |
| °Brix | 7,36 b | 7,74 a | 3,92 a | 3,97 a | 12,78 a | 13,20 a | 4,10 a | 4,22 a |
| pH | 5,00 a | 4,92 b | 5,83 a | 5,77 a | 6,55 b | 6,84 a | 4,25 a | 4,30 a |
| CE | 3,25 a | 3,39 a | 2,97 a | 2,93 a | 7,76 b | 8,78 a | 4,09 a | 3,65 a |
| NO ₃ ⁻ (mmol/L) | 5,95 a | 5,81 a | 3,03 a | 2,93 a | 4,29 a | 3,62 b | - | - |
| K ⁺ (mmol/L) | 34,86 a | 36,30 a | 41,51 a | 41,72 a | 67,83 b | 75,48 a | - | - |
| % cont. de materia seca | 7,20 a | 7,30 a | 4,37 a | 4,36 a | 6,31 a | 6,31 a | 4,95 a | 4,78 a |
| % de humedad | 92,80 a | 92,65 a | 95,63 a | 95,64 a | 93,69 a | 93,69 a | 95,05 a | 95,22 a |
| % cont. de materia seca (C/C) | | | | | 6,39 a | 7,07 a | | |
| % de humedad (C/C) | | | | | 93,61 a | 92,93 a | | |

*(C/C) Medida con corteza

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

4.3.4. Efecto sobre la producción

En todos los cultivos estudiados se registró un incremento significativo en el rendimiento (18%) y número de frutos (16%) cosechados en las categorías de producción comercial y total cuando los contenedores contenían en su interior los tabiques verticales con respecto de los contenedores control (Fig. 4, 5, 6 y 7). Así mismo, en pimiento la categoría de fruta GGG y GG indicaron un incremento estadísticamente significativo en el rendimiento y en el número de frutos al utilizar los contenedores con tabiques verticales (Fig. 4). Tendencia similar se presentó en el cultivo de pepino como se muestra en la Fig. 5 en los calibres 12G y 12M, y un decremento significativo en promedio del 27,53% de producto no comercial. Al igual que con los frutos de tomate donde se reportó un aumento en el rendimiento y número de frutos por categoría comercial 80-120 (g) del 21,85% y 26,56% cuando se utilizó contenedores del tratamiento T1 (Fig. 7). En el cultivo de melón no se mostró de forma clara diferencia estadística significativa en las categorías de fruta comercial predominante (Fig. 6). Estudios recientes reportan que las soluciones nutritivas de CE moderadamente alta disminuyen el rendimiento total y comercial del cultivo de tomate (Moya et al., 2017). Por su parte, Sonneveld y Van der Burg (1991) describen que el rendimiento máximo para el cultivo de tomate en los sistemas de cultivo sin suelo se obtiene cuando la CE se establece en el rango 2,5 - 2,9 dS/m.

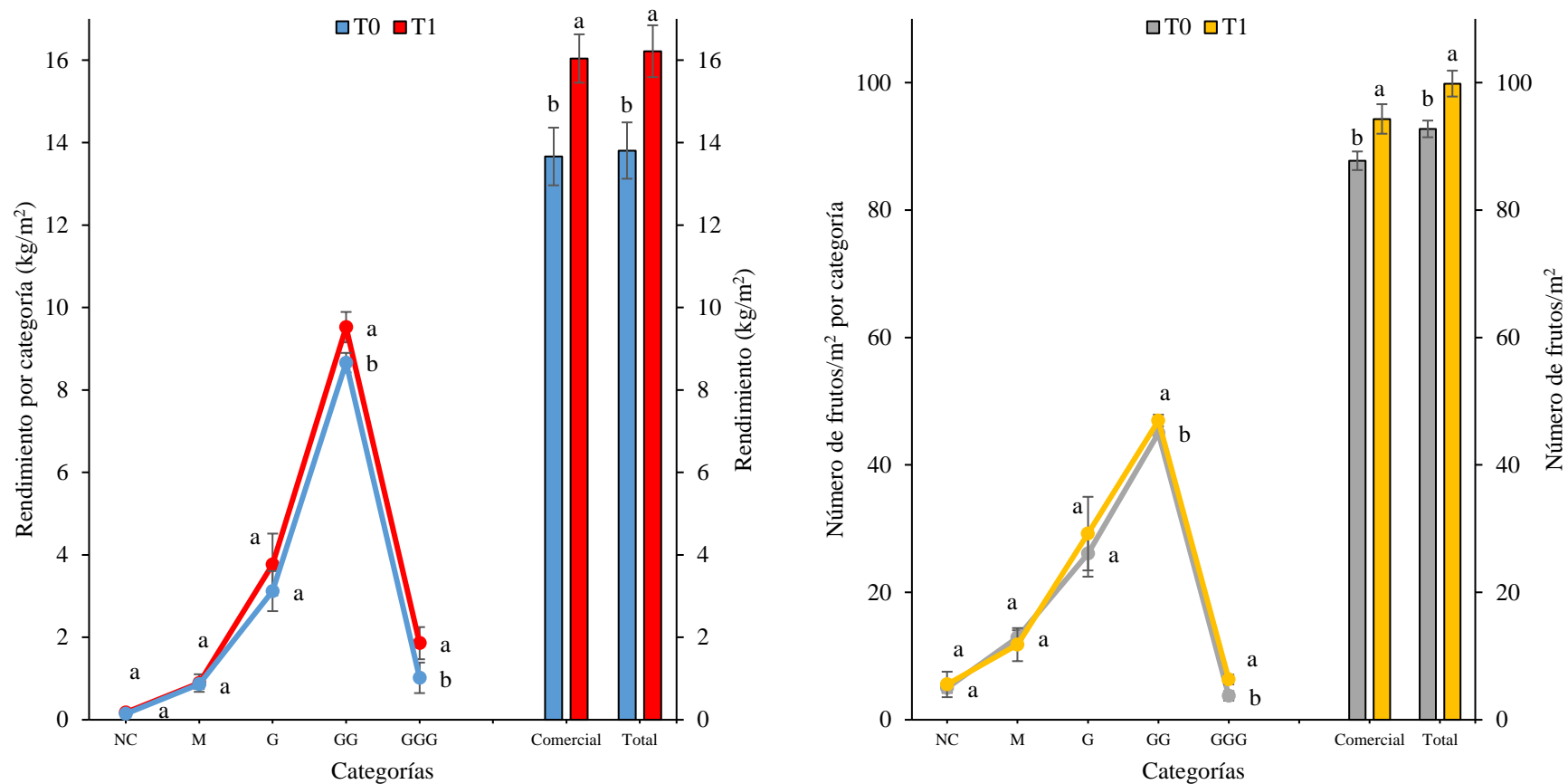


Fig. 4. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en pimiento.

Categorías: NC (No comercial); M (50-70); G (70-90); GG (90-110); GGG (110-130).

Distintas letras indican diferencias significativas entre tratamientos, a una prueba Tukey al 95%.

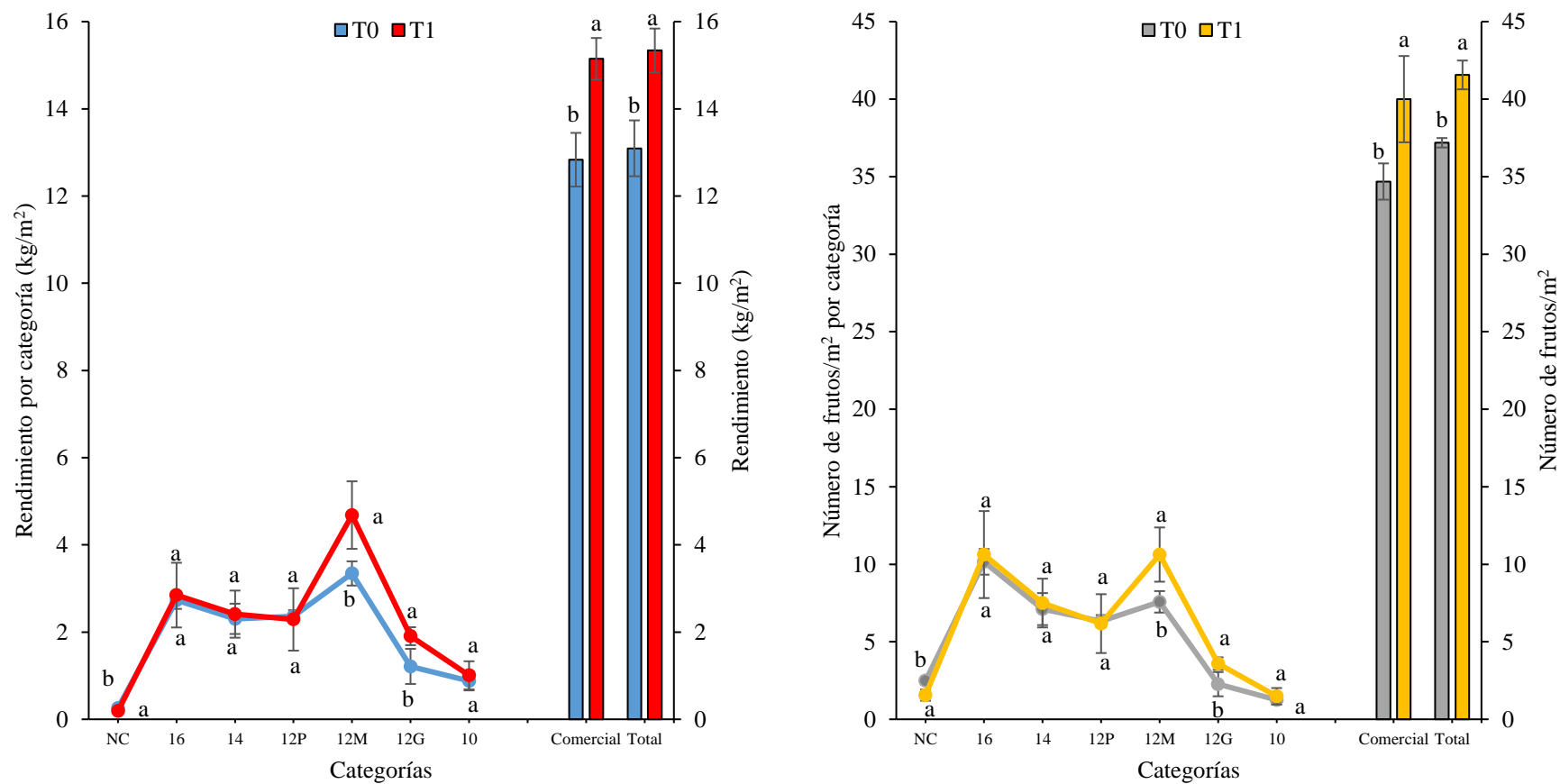


Fig. 5. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en pepino.

Categorías: NC (No comercial); 16 (250-300); 14 (300-350); 12P (350-400); 12M (400-500); 12G (500-600); 10 (600-800).

Distintas letras indican diferencias significativas entre tratamientos, a una prueba Tukey al 95%.

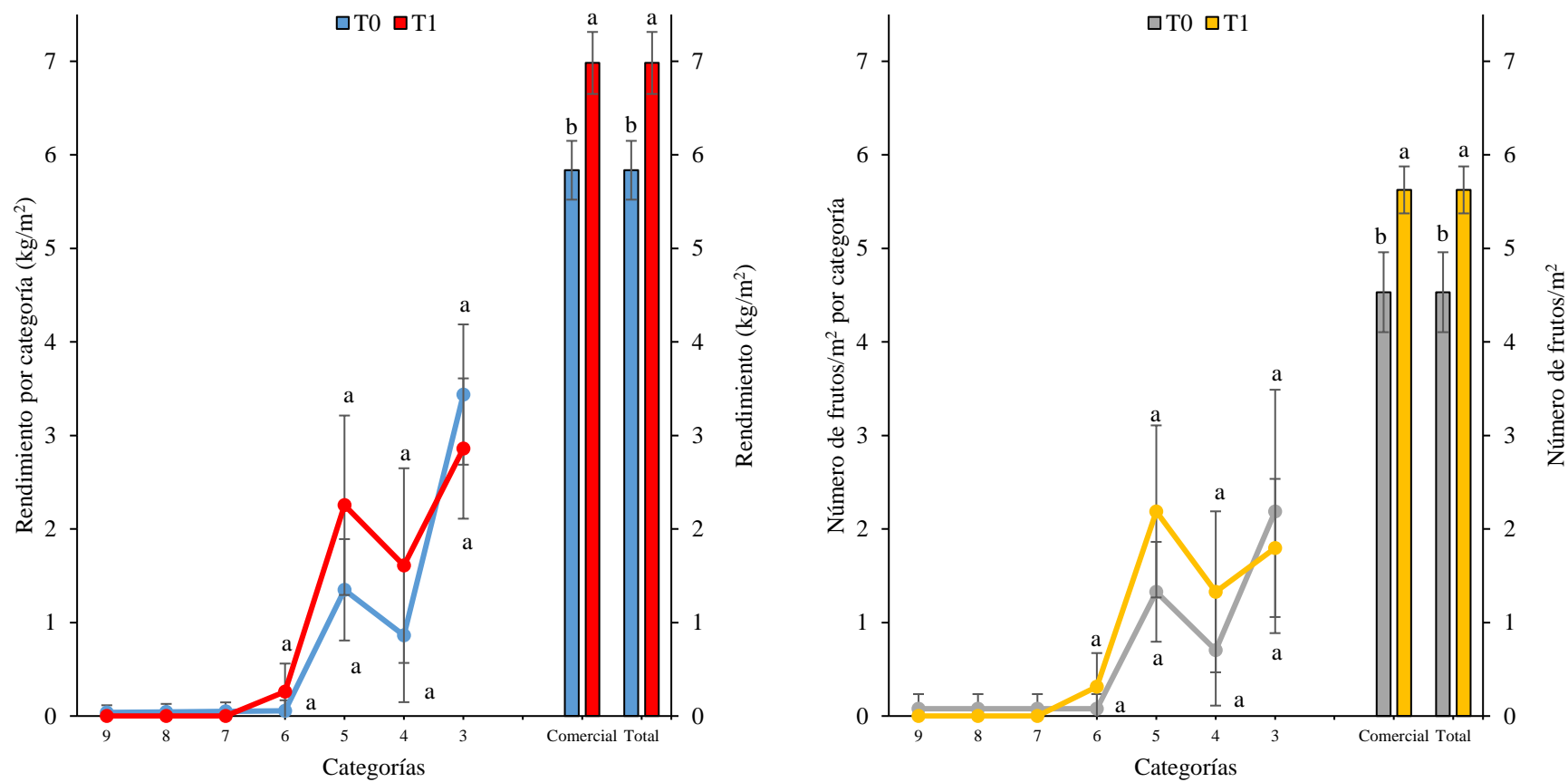


Fig. 6. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en melón.

Categorías: 9 (500-550); 8 (550-600); 7 (600-700); 6 (700-850); 5 (850-1150); 4 (1150-1300); 3 (1300-1950).

Distintas letras indican diferencias significativas entre tratamientos, a una prueba Tukey al 95%.

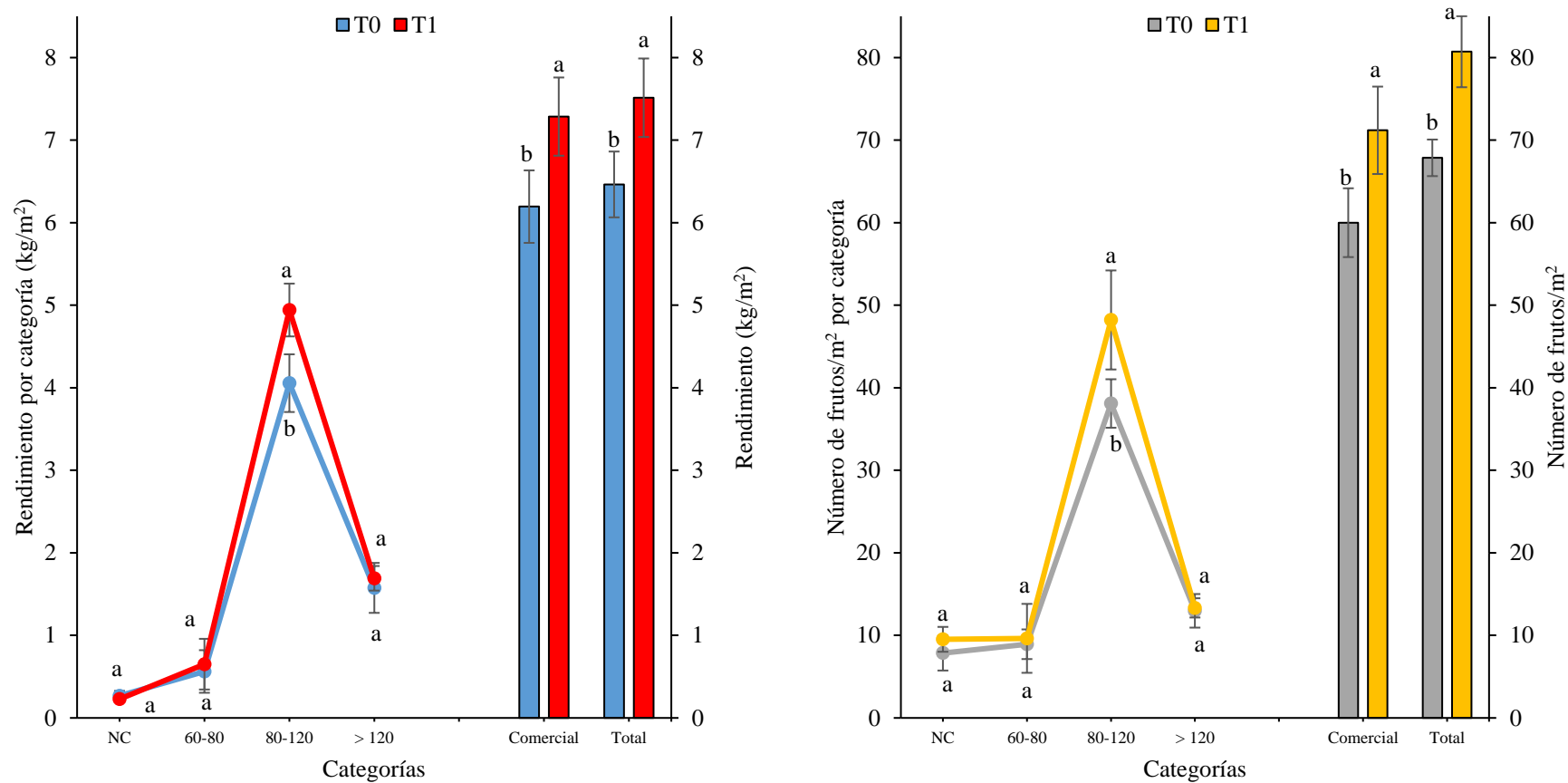


Fig. 7. Efecto de la modificación del contenedor en el rendimiento y número de frutos por categoría en tomate.

Categorías: NC (No comercial); 60-80 g; 80-120 g; > 120 g.

Distintas letras indican diferencias significativas entre tratamientos, a una prueba Tukey al 95%.

La longitud y el diámetro ecuatorial de los frutos de pepinos (Tabla 10), y el diámetro transversal y longitudinal de los frutos de melón (Tabla 11) no mostraron diferencias significativas claras en las categorías de fruto al comparar los dos tipos de contenedores. Sin embargo, en pepino la clase 12P y 16 del diámetro ecuatorial y en melón la categoría 5 del diámetro longitudinal presentaron valores superiores al utilizar los contenedores con las paredes verticales respecto al tratamiento testigo.

Tabla 10. Efecto de la modificación de morfología del contenedor en la longitud y diámetro ecuatorial de fruto por área en el cultivo de pepino.

| Categoría | Longitud (cm) | | Diámetro ecuatorial (mm) | |
|-----------------------------|---------------|---------|--------------------------|---------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 |
| 10 (600-800) | 40,47 a | 40,27 a | 51,63 a | 52,75 a |
| 12G (500-600) | 36,63 a | 35,81 a | 47,89 a | 49,17 a |
| 12M (400-500) | 34,55 a | 33,95 a | 45,33 a | 45,82 a |
| 12P (350-400) | 32,80 a | 32,68 a | 41,86 b | 43,19 a |
| 14 (300-350) | 31,63 a | 31,37 a | 40,90 a | 40,59 a |
| 16 (250-300) | 29,79 a | 29,93 a | 37,76 b | 38,40 a |
| No comercial | 24,31 a | 24,91 a | 30,79 a | 30,62 a |
| Producto comercial promedio | 34,31 a | 34,00 a | 44,23 a | 44,99 a |
| Producto promedio | 33,06 a | 32,86 a | 42,55 a | 43,19 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

Tabla 11. Efecto de la modificación de morfología del contenedor en el diámetro transversal y longitudinal de fruto por área en el cultivo de melón.

| Categoría | Diámetro transversal (mayor) (cm) | | Diámetro longitudinal (menor) (cm) | |
|----------------------|--------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 |
| 3 (1300-1950 g) | 15,23 a | 15,42 a | 14,68 a | 14,74 a |
| 4 (1150-1300 g) | 14,86 a | 14,19 b | 13,66 a | 13,72 a |
| 5 (850-1150 g) | 13,78 a | 14,16 a | 12,99 b | 13,49 a |
| 6 (700-850) | 13,31 a | 13,44 a | 11,56 a | 12,33 a |
| 7 (600-700 g) | 12,00 | - | 11,88 | - |
| 8 (550-600 g) | 11,38 | - | 11,00 | - |
| 9 (500-550 g) | 10,00 | - | 9,00 | - |
| 10 (450-500 g) | - | - | - | - |
| Producción comercial | 14,29 a | 14,30 a | 13,22 a | 13,57 a |
| Producción total | 14,29 a | 14,30 a | 13,22 a | 13,57 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

4.3.5. Efecto sobre los indicadores de calidad de planta

La Tabla 12 muestra los resultados de los indicadores de calidad de planta al final del ciclo de producción de los cuatro cultivos hortícolas. No se reporta una tendencia clara en los valores de los índices en ambos tratamientos. Sin embargo, el Índice de Calidad de Dickson (ICD) reporta un valor superior del 21,12% estadísticamente significativo en todas las especies estudiadas al utilizar la morfología de contenedores T1 respecto al

tratamiento control, lo que representa a plantas de mejor calidad. Valores altos del índice de Dickson está asociado a plantas de calidad y con alto potencial de rendimiento, originalmente utilizado en plantas forestales. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que es una herramienta muy importante para la caracterización de plantas hortícolas, como sandía (Bantis et al., 2019a; Wei et al., 2020), calabaza (Bantis et al., 2019b), berenjena (Neto et al., 2017), pepino (Guisolfi et al., 2018), melón (Vendruscolo et al., 2018) y tomate (Costa et al., 2012) en etapa de semillero. Wei et al. (2020) al trabajar con plántulas de sandía injertada reportaron valores superiores del índice de calidad de Dickson cuando se utilizó iluminación artificial suplementaria de 12 y 16h en un período de 10 días. Bantis et al. (2019a) encontraron una importante correlación entre la calidad de planta por categoría (óptima, aceptable y no aceptable) y el índice de calidad de Dickson, cuando trabajaron con plántulas de sandía injertada.

Tabla 12. Indicadores de calidad de planta.

| Parámetros | Pimiento | | Pepino | | Melón | | Tomate | |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| R. Altura/Diam (RAD) | 8,89 a | 8,74 a | 22,52 a | 21,79 a | 20,57 a | 20,71 a | 18,44 a | 16,18 b |
| R. Diam/Altura (RDA) | 0,11 a | 0,11 a | 0,04 a | 0,05 a | 0,05 a | 0,05 a | 0,05 b | 0,06 a |
| R. Tallo/Raíz (ITR) | 2,06 a | 1,84 a | 2,21 a | 1,80 a | 2,82 a | 2,68 a | 0,59 a | 0,50 b |
| R. Altura/Tallo (RAT) | 1,03 a | 0,97 b | 6,35 a | 6,35 a | 8,08 a | 7,92 a | 7,83 a | 7,70 a |
| R. Tallo/Altura (RTA) | 0,98 b | 1,04 a | 0,16 a | 0,16 a | 0,12 a | 0,13 a | 0,13 a | 0,13 a |
| I.C. de Dickson (ICD) | 43,83 b | 50,77 a | 7,94 b | 9,20 a | 7,93 b | 8,69 a | 9,86 b | 14,12 a |
| Á.F. Específica(AFE) | 102,92 a | 103,03 a | 149,66 a | 146,78 a | 90,25 a | 90,97 a | 120,65 a | 118,74 a |
| Coef. Á. Foliar (CAF) | 27,26 a | 27,04 a | 66,34 a | 62,09 a | 47,03 a | 46,86 a | 32,44 a | 29,43 a |

Distintas letras indican diferencias significativas de acuerdo con una prueba Tukey ($P \leq 0,05$).

4.3.6. Efecto sobre los indicadores de productividad: Eficiencia en el Uso del Agua e Índice de Cosecha

En los cuatro cultivos estudiados, la relación del rendimiento de fruto por cada m³ de agua utilizada en la categoría comercial y total mejoró en promedio entre un 17 y 20% cuando se utilizaron tabiques verticales en el interior de los contenedores en comparación con los contenedores control (Tabla 13). El valor promedio comercial de la eficiencia en el uso del agua (EUA) obtenidos con el tratamiento control en pimiento, pepino, melón y tomate fueron 22,81, 30,29, 16,75 y 20,87 kg/m³, inferiores a los valores obtenidos con el tratamiento T1 26,78, 35,75, 20,04 y 24,26 kg/m³. Resultados similares a los valores obtenidos en este estudio, fueron publicados en estudios recientes en diferentes sistemas de cultivo sin suelo por Rodríguez-Ortega et al. (2019) al trabajar con plantas de tomate reportaron que los valores de consumo de agua necesarios (solución nutritiva) para

obtener un kg de fruta, son 36 L en DFT (técnica de flujo profundo), 46 L en NFT (técnica de film de nutrientes), o 46 L en (perlita) por sus siglas en inglés. Por su parte, Cámara-Zapata et al. (2019) utilizando los mismos sistemas de cultivo en tomate obtuvieron valores semejantes de 28,2; 22,0 y 21,5 kg/m³ en DFT, NFT y perlita, respectivamente. Sin embargo, los valores de la eficiencia en el uso del agua pueden variar a consecuencia de numerosos factores (cultivo al aire libre o invernadero, composición de la solución nutritiva, ciclo de cultivo, etc.) o por las condiciones objetivo del caso de estudio. De acuerdo con, Pardossi et al. (2004) y Salazar-Moreno et al. (2014) la eficiencia en el uso del agua en invernaderos en países de la región mediterránea y Holanda en tomate, pepino y pimiento se encuentran entre 21,8, 14,0 y 30,3 kg/m³ y 58,2, 28,0 y 77,0 kg/m³ respectivamente; en este estudio, al utilizar los contenedores con el tratamiento T1 se obtuvo valores ligeramente superiores a los valores promedio de la región mediterránea y tan solo en el caso del pepino valores similares a los obtenidos en Holanda (Tabla 13). Cultivos bajo niveles elevados de CO₂ aumentará el EUA en un 30-40%, debido a un aumento en la asimilación de C y una disminución en la transpiración.

En el cultivo de pimiento, pepino y melón siempre se registró un valor superior del índice de cosecha (IC) del 6, 6 y 21% en ambas categorías (total y comercial) con los contenedores con paredes verticales internas del tratamiento T1 respecto a los contenedores del tratamiento control T0 (Tabla 13), y a excepción del cultivo de tomate cuando se utilizaron los contenedores del tratamiento testigo. Resultados similares de IC fueron reportados por Gianfagna et al. (1998) y Logendra et al. (2001) al trabajar con plantas de tomate y controlar de manera selectiva la producción de brotes y la altura de la planta, y el número de racimos respectivamente, en condiciones de invernadero. De acuerdo con Stanghellini (2014) un bajo índice de cosecha resulta en una baja eficiencia en el uso del agua o viceversa, esta aseveración se confirma con los resultados obtenidos en este estudio. Por su parte, Van der Ploeg et al. (2007) indica que el índice de cosecha no es un rasgo destacado de mejora en los cultivos hortícolas, da por hecho que los invernaderos a lo largo del ciclo de cultivo incrementan automáticamente el índice de cosecha de todos los cultivos, como tomate, pimiento y pepino. Hay (1995) señala que el índice de cosecha de una variedad determinada es en gran parte genético y responde a factores ambientales, como: enriquecimiento de CO₂, mejora del control de plagas y enfermedades, eliminación selectiva de hoja y brotes, y sistema de tutorado vertical.

Tabla 13. Indicadores de productividad.

| Especie | Eficiencia en el uso del agua (EUA) (kg/m ³) | | | | Índice de cosecha (IC) | | | |
|----------|--|-------|-----------|-------|------------------------|------|-----------|------|
| | Total | | Comercial | | Total | | Comercial | |
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Pimiento | 23,05 | 27,07 | 22,81 | 26,78 | 0,83 | 0,88 | 0,83 | 0,87 |
| Pepino | 30,90 | 36,20 | 30,29 | 35,75 | 2,34 | 2,47 | 2,29 | 2,44 |
| Melón | 16,75 | 20,04 | 16,75 | 20,04 | 1,61 | 1,95 | 1,61 | 1,95 |
| Tomate | 20,00 | 23,53 | 20,87 | 24,26 | 0,66 | 0,60 | 0,69 | 0,62 |

4.3.7. Análisis económico de dos tipos de contenedores sobre la productividad de diferentes cultivos hortícolas

En la Tabla 14 se muestra el balance económico relativo de los costes de inversión en los contenedores utilizados en los tratamientos (T0 y T1). Los gastos, independientemente del cultivo fueron similares. Sin embargo, los costes de los contenedores de los tratamientos (T0 y T1) tuvieron una diferencia de 1,05 € por contenedor, siendo los del T1 superiores a los del tratamiento T0. Esto fue debido a la adaptación con PVI que tuvieron los contenedores del tratamiento T1. El valor económico diferencial de las cosechas del ciclo de cultivo habría amortizado la diferencia de costes generados en los cultivos donde se utilizaron los contenedores del T1.

Tabla 14. Balance económico en función del tipo de contenedor [con (T1) y sin (T0) adaptación] utilizado en diferentes cultivos hortícolas.

| Concepto | €/contenedor | |
|--|--------------|------|
| | T0 | T1 |
| Precio comercial por contenedor | 0,86 | 0,86 |
| Coste total de PVI | 0,00 | 1,05 |
| Coste del adhesivo de montaje por contenedor | 0,08 | 0,08 |
| Manufactura | 0,09 | 0,09 |
| Coste total por contenedor | 1,03 | 2,08 |
| Diferencia | 1,05 | |

PVI = Pared vertical interna

En la Tabla 15 se muestra el balance económico relativo por tipo de cultivo y tratamiento. El rendimiento por cultivo, utilizando contenedores del tratamiento T1, registraron un incremento promedio de 1,73 kg/m² respecto a los cultivos donde se usó el tratamiento control (T0). Por lo tanto, los ingresos fueron superiores en la producción de cualquiera de las cuatro especies hortícolas analizadas (tomate, pepino, pimiento y melón) y cultivadas en contenedores del tratamiento T1. Resultados similares son publicados por Morales y Urrestarazu (2013) utilizando diferentes sistemas de distribución de riego y un cambio moderado de la CE en la solución nutritiva en tomate. Cámara-Zapata et al. (2019)

obtuvieron mayores rendimientos en tomate al utilizar agua de riego con salinidad intermedia, y con perlita como sustrato al compararlo con los sistemas NFT y DFT.

Tabla 15. Balance económico por cultivo hortícola.

| Cultivo | Rendimiento (kg/m ²) | | Precio* (€/kg) | Ingreso (€/m ²) | | Diferencias (€/m ²) |
|----------|----------------------------------|-------|----------------|-----------------------------|-------|---------------------------------|
| | T0 | T1 | | T0 | T1 | |
| Tomate | 6,19 | 7,29 | 0,43 | 2,66 | 3,13 | 0,47 |
| Pepino | 12,83 | 15,15 | 0,61 | 7,83 | 9,24 | 1,41 |
| Pimiento | 13,66 | 16,04 | 0,85 | 11,61 | 13,63 | 2,02 |
| Melón | 5,84 | 6,98 | 0,52 | 3,03 | 3,63 | 0,60 |

*Precio promedio publicado por el observatorio de precios y mercados 2019.

La Tabla 16 muestra el balance económico parcial de la fertirrigación con una solución nutritiva de CE de 2,0 dS/m utilizada en dos tipos de contenedores diferentes (T0 y T1) en cuatro cultivos hortícolas (tomate, pepino, pimiento y melón). El suministro del fertirriego fue el mismo, independientemente de los tratamientos y cultivos, así como también se obtuvo el mismo precio del agua de riego en todos los casos. Sin embargo, el aprovechamiento del agua de riego y absorción de fertilizantes de todos los cultivos fue mayor utilizando contenedores modificados como los del T1, en promedio 24 L/m², respecto al tratamiento control, lo que indica y justifica que al utilizar contenedores con paredes interiores proporciona una mayor capacidad productiva (Tabla 15). Por otro lado, cuando se utilizaron los contenedores del tratamiento T0, la pérdida económica reflejada en los drenajes de agua y fertilizantes en todos los cultivos incremento en promedio 14%. Por lo tanto, respecto a los costes obtenidos del agua de riego y fertilizantes, se mostró un mayor beneficio económico utilizando los contenedores del tratamiento T1, ya que se reeditúan los costes en la disminución de drenajes de los cuatro cultivos, respecto a las hortalizas producidas con los tratamientos T0. Este balance económico muestra un mayor aprovechamiento de la inversión realizada, siendo efectiva para el beneficio de los agricultores con la implementación de contenedores con paredes interiores (T1). Morales y Urrestarazu (2013) registraron resultados similares al utilizar una solución nutritiva con CE = 2,0 dS/m. Cámara-Zapata et al. (2019) encontraron que la rentabilidad se reduce en el orden perlita > NFT (Nutrient Film Technique) > DFT (Deep Flow Technique) a consecuencia de la aplicación de soluciones nutritivas con alto valor de CE y de los requerimientos específicos de manejo del sistema empleado.

Tabla 16. Balance económico en función de la solución nutritiva (agua y fertilizantes) suministrados en dos diferentes sistemas de contenedores en cuatro cultivos hortícolas.

| Concepto | Tomate | | Pepino | | Pimiento | | Melón | |
|--|--------|-------|--------|-------|----------|-------|-------|-------|
| | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 | T0 | T1 |
| Precio de AR (€/m ³)* | 0,230 | 0,230 | 0,230 | 0,230 | 0,230 | 0,230 | 0,230 | 0,230 |
| AR suministrada (L/m ²) | 309,7 | 309,7 | 423,7 | 423,7 | 599,0 | 599,0 | 348,4 | 348,4 |
| AR aprovechada (L/m ²) | 187,5 | 208,7 | 238,6 | 268,1 | 351,8 | 382,2 | 217,6 | 231,2 |
| AR drenada (L/m ²) | 122,1 | 101,0 | 185,2 | 155,6 | 247,2 | 216,8 | 130,8 | 117,3 |
| Fertilizante suministrado (kg/m ²) | 0,429 | 0,429 | 0,587 | 0,587 | 0,830 | 0,830 | 0,483 | 0,483 |
| Fertilizante aprovechado (kg/m ²) | 0,260 | 0,289 | 0,330 | 0,371 | 0,487 | 0,529 | 0,301 | 0,320 |
| Fertilizante drenado (kg/m ²) | 0,169 | 0,140 | 0,256 | 0,216 | 0,342 | 0,300 | 0,181 | 0,162 |
| Coste de AR suministrada (€/m ²)** | 0,071 | 0,071 | 0,097 | 0,097 | 0,138 | 0,138 | 0,080 | 0,080 |
| Coste de AR aprovechada (€/m ²) | 0,043 | 0,048 | 0,055 | 0,062 | 0,081 | 0,088 | 0,050 | 0,053 |
| Coste de AR drenada (€/m ²) | 0,028 | 0,023 | 0,043 | 0,036 | 0,057 | 0,050 | 0,030 | 0,027 |
| Coste de fertilizante suministrado (€/m ²) | 0,326 | 0,326 | 0,446 | 0,446 | 0,630 | 0,630 | 0,367 | 0,367 |
| Coste de fertilizante aprovechado (€/m ²) | 0,197 | 0,220 | 0,251 | 0,282 | 0,370 | 0,402 | 0,229 | 0,243 |
| Coste de fertilizante drenado (€/m ²) | 0,129 | 0,106 | 0,195 | 0,164 | 0,260 | 0,228 | 0,138 | 0,123 |

AR = Agua de riego; F = Fertilizante; SN = Solución nutritiva.

*Basado en los precios de cada litro de solución nutritiva y el volumen del ciclo utilizado.

**Cálculo realizado por cada cantidad suministrada en cada tratamiento y en cada cultivo.

4.4. Conclusiones

La modificación de la morfología del contenedor con la adición de tabiques verticales en el interior influye positivamente en las plantas hortícolas. Los tabiques verticales en el interior del contenedor 1) incrementan la absorción de agua y nutrientes, 2) disminuyen la emisión de nitratos al medio ambiente, 3) incrementan significativamente el volumen y el peso total del crecimiento radical, la producción de biomasa, fruto y el rendimiento productivo en cada cultivo; 4) mejoran la calidad de planta, más equilibrada entre la superficie del vástago y el aparato radical con el Índice de Calidad de Dickson que engloba la combinación de diferentes índices; e 5) incrementan la eficiencia en el uso de nutrientes y agua. No afectan ni mejoran los parámetros de calidad de la fruta.

Desde el punto de vista económico, es factible optar por los contenedores con paredes interiores, ya que favorecen un mayor aprovechamiento de la inversión económica al incrementar la eficiencia productiva de los cultivos hortícolas y al mismo tiempo los beneficios económicos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por su apoyo financiero a este trabajo.

4.5. Literatura citada

- Amoroso, G., P. Frangi, R. Piatti, F. Ferrini, A. Fini, y M. Faoro. 2010. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience* 45(12):1824-1829.
- Bantis, F., A. Koukounaras, A. Siomos, G. Menexes, C. Dangitsis, y D. Kintzonidis. 2019a. Assessing quantitative criteria for characterization of quality categories for grafted watermelon seedlings. *Horticulturae* 5(1):16.
- Bantis, F., A. Koukounaras, A. Siomos, K. Radoglou, y C. Dangitsis. 2019b. Optimal LED wavelength composition for the production of high-quality watermelon and interspecific squash seedlings used for grafting. *Agronomy* 9(12):870.
- Blok, C., B.E. Jackson, X. Guo, P.H. De Visser, y L.F. Marcelis. 2017. Maximum plant uptakes for water, nutrients, and oxygen are not always met by irrigation rate and distribution in water-based cultivation systems. *Front. Plant Sci.* 8:562.
- Camacho, F. y R.E. Fernández. 2005. Eficiencia en el uso del agua. *Hortic. Intl.* 1:86-89.
- Cámara-Zapata, J., J. Brotons-Martínez, S. Simón-Grao, J. Martínez-Nicolás, y F. García-Sánchez. 2019. Cost-benefit analysis of tomato in soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. *J. Sci. Food Agric.* 99(13):5842-5851.
- Condon, A.G. y A.E. Hall. 1997. Adaptation to diverse environments: variation in water-use efficiency within crop species, p. 79-116. In: L.E. Jackson (ed.). *Agricultural ecology*. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Costa, E., P. Leal, C. Benett, K. Benett, y L. Salamene. 2012. Production of tomato seedlings using different substrates and trays in three protected environments. *Eng. Agríc.* 32(5):822-830.
- De Boodt, M., O. Verdonck, y I. Cappaert. 1974. Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Hort.* 37:2054-2063.
- De Rijck, G. y E. Schrevens. 1998. Distribution of nutrients and water in rockwool slabs. *Scientia Hort.* 72:277-285.
- Di Benedetto, A. y J. Tognetti. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos. *Rev. Investig. Agropecu.* 42(3):258-282.

- Dickson, A., A. Leaf, y J. Hosner. 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *For. Chron.* 36(1):10-13.
- Domene, M. y M. Segura. 2014a. Parámetros de calidad externa en la industria agroalimentaria. CAJAMAR ADN Agro. Negocio Agroalimentario y Cooperativo. España. Ficha de Transferencia. 03:1-12.
- Domene, M. y M. Segura. 2014b. Parámetros de calidad interna de hortalizas y frutas en la industria agroalimentaria. CAJAMAR ADN Agro. Negocio Agroalimentario y Cooperativo. España. Ficha de Transferencia. 05:1-18.
- DOUE. 2000. REGLAMENTO CE No 790/2000 DE LA COMISIÓN de 14 de abril de 2000 por el que se establecen las normas de comercialización de los de los tomates. La Comisión de las Comunidades Europeas. 8 October 2013.
- Fereres, E. y V. González-Dugo. 2009. Improving productivity to face water scarcity in irrigated agriculture, p. 123-143. In: V. Sandras, y D. Calderini (ed.). *Crop physiology: applications for genetic improvement and agronomy*. Academic Press, San Diego, CA. USA.
- Gallegos, J., J.E. Álvaro, y M. Urrestarazu. 2020. Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience* 55(6):787-794.
- Gallegos-Cedillo, V.M., M. Urrestarazu, y J.E. Álvaro. 2016. Influence of salinity on transport of Nitrates and Potassium by means of the xylem sap content between roots and shoots in young tomato plants. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 16(4):991-998.
- Gallegos-Cedillo, V.M., J.E. Álvaro, T. Capatos, T. Hachmann, G. Carrasco, y M. Urrestarazu. 2018. Effect of pH and silicon in the fertigation solution on vegetative growth of blueberry plants in organic agriculture. *HortScience* 53(10):1423-1428.
- Gianfagna, T., L. Logendra, E. Durner, y H. Janes. 1998. Improving tomato harvest index by controlling crop height and side shoot production. *Life Support Biosph. Sci.* 5(2):255-261.
- Gilman, E.F., J. Grabosky, A. Stodola, y M.D. Marshall. 2003. Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Arboric. J.* 29(4):231-236.

- Guisolfi, L., P. Monaco, I. Haddade, M. Krause, L. Meneghelli, y K. Almeida. 2018. Production of cucumber seedlings in alternative substrates with different compositions of agricultural residues. *Rev. Caatinga* 31(3):791-797.
- Gutiérrez, H. y R. De la Vara. 2008. *Análisis y diseño de experimentos*, p.1-564. 2da ed. McGraw-Hill/Interamericana, Guanajuato, México.
- Hay, R.K.M. 1995. Harvest index: a review of its use in plant breeding and crop physiology. *Ann. Appl. Biol.* 126(1):197-216.
- Heller, H., A. Bar-Tal, S. Assouline, K. Narkis, S. Suryano, A. de la Forge, M. Barak, H. Alon, M. Bruner, S. Cohen, y D. Tsohar. 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study. *Irrig. Sci.* 33(1):53-65.
- Iverson, R.D. 1984. Planting-stock selection: meeting biological needs and operational realities, p. 261-266. In: M.L. Duryea, T.D. Landis, C.R. Perry (eds.). *Forestry nursery manual: production of bareroot seedlings*. Forestry Sciences, vol 11. Springer, Dordrecht, Holanda.
- Landis, T.D. 1990. Containers and growing media, p. 41-85. In: T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, y J.P. Barnett (eds.). *The container tree nursery manual*, vol. 2. *Agricultural Handbook 674*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Liptay, A. y D. Edwards. 1994. Tomato seedling growth in response to variation in root container shape. *HortScience* 29(6):633-635.
- Logendra, L., T. Gianfagna, D. Specca, y H. Janes. 2001. Greenhouse tomato limited cluster production systems: crop management practices affect yield. *HortScience* 36(5):893-896.
- Martínez, J. y J. Reza. 2014. Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative subsurface drip irrigation method. *J. Irrig. Drain. Eng.* 140(10):04014030.
- Montgomery, D.C. 2004. *Design and analysis of experiments*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Phoenix, AZ, USA.

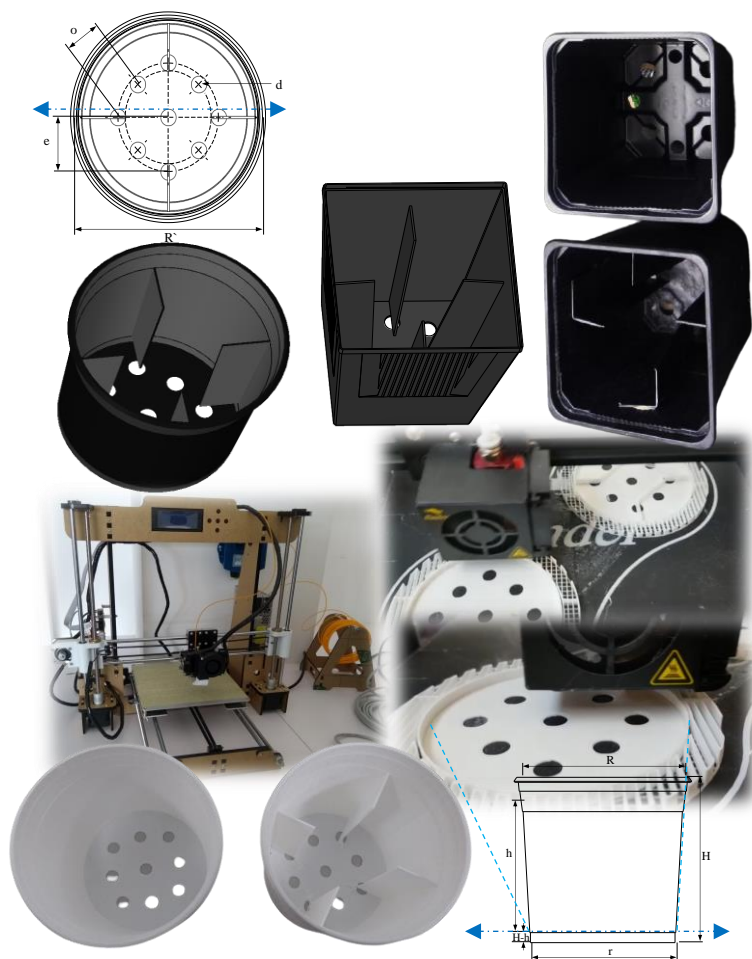
- Moya, C., E. Oyanedel, G. Verdugo, M.F. Flores, M. Urrestarazu, y J.E. Álvaro. 2017. Increased electrical conductivity in nutrient solution management enhances dietary and organoleptic qualities in soilless culture tomato. *HortScience* 52(6):868-872.
- Munck, L. 2016. Sustainable grain production and utilization, p. 04:144-153. In: C. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, y J. Faubion (eds.). *Encyclopedia of food grains*. 2nd ed. Academic Press.
- Nájera, C., J.L. Guil-Guerrero, L.J. Enríquez, J.E. Álvaro, y M. Urrestarazu. 2018. LED-enhanced dietary and organoleptic qualities in postharvest tomato fruit. *Postharv. Biol. Technol.* 145:151-156.
- Neto, F., S. Dalanhol, M. Machry, A. Pimentel, J. Rodrigues, y E. Ono. 2017. Effects of plant growth regulators on eggplant seed germination and seedling growth. *Aust. J. Crop Sci.* 11(10):1277.
- Pardossi, A., F. Tognoni, y L. Incrocci. 2004. Mediterranean greenhouse technology. *Chron. Hortic.* 44(2):28-34.
- Quan, T.Z., J.H. Wu, y X. Wang. 2011. Nursery container. U.S. Patent No. 0,232,187 A1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-13.
- Raviv, M., J.H. Lieth, y A. Bar-Tal. 2019. *Soilless culture. Theory and practice*. 2nd ed. Academic Press.
- Rodríguez, D., J. Reca, J. Martínez, M.T. Lao, y M. Urrestarazu. 2014. Effect of controlling the leaching fraction on the fertigation and production of a tomato crop under soilless culture. *Scientia Hort.* 179:153-157.
- Rodríguez, D., J. Reca, J. Martínez, R. López-Luque, y M. Urrestarazu. 2015. Development of a new control algorithm for automatic irrigation scheduling in soilless culture. *Appl. Math. Inf. Sci.* 9:47-56.
- Rodríguez-Ortega, W., V. Martínez, M. Nieves, I. Simón, V. Lidón, J. Fernández-Zapata, J. Martínez-Nicolas, J. Cámara-Zapata, F. García-Sánchez. 2019. Agricultural and physiological responses of tomato plants grown in different soilless culture systems with saline water under greenhouse conditions. *Sci. Rep.* 9(1):1-13.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fenn.* 37(3):333-342.

- Ruter, J.M. 1994. Growth responses of four vigorous-rooted tree species in cupric hydroxide-treated containers. *HortScience* 29(9):1089-1089.
- Salazar-Moreno, R., A. Rojano-Aguilar, y I. López-Cruz. 2014. Water use efficiency in controlled agriculture. *Tecnol. Cienc. Agua* 5(2):177-183.
- Schmidt-Vogt, H. 1980. Characterization of plant material, p. 314. In Röhring E, HA Gussone eds. *Waldbau. Zweiter Band. Sechste Auflage, Neubearbeitet*. Hamburg and Berlin, Germany.
- Skinner, R.B. 2002. Container and tag assembly. U.S. Patent No. US 6,463,696 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.
- Sonneveld C. y M. Van der Burg. 1991. Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Neth. J. of Agr. Sci.* 39(2):115-122.
- Sonneveld, C. y N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates, p. 01-45. 10th Proefstation voor Tuinbouw Onder Glas te Naaldwijk, Naaldwijk.
- Sonneveld, C. y W. Voogt. 1997. Effects of pH value and Mn application on yield and nutrient absorption with rockwool grown gerbera. *Acta Hort.* 450:139-147.
- Sonneveld, C. y W. Voogt. 2009. Plant nutrition in future greenhouse production, p. 393-403. In: *Plant nutrition of greenhouse crops*. Springer, Dordrecht.
- Spencer, H.A. 1972. Planting from the book. *For. Chron.* 48(5):240-241.
- Stanghellini, C. 2014. Horticultural production in greenhouses: efficient use of water. *Acta Hort.* 1034:25-32.
- Stockdale, W.D. 1961. Plastic flower pot. U.S. Patent No. 3,009,603. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Syed, S. y N.P. Tollamadugu. 2019. Role of plant growth-promoting microorganisms as a tool for environmental sustainability, p. 209-222. In: V. Buddolla (ed.). *Recent developments in applied microbiology and biochemistry*. Academic Press.
- Toor, R.K. y G.P. Savage. 2006. Changes in major antioxidant components of tomatoes during post-harvest storage. *Food Chem.* 99(4):724-727.

- Unkovich, M., J. Baldock, y M. Forbes. 2010. Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: examples from Australian agriculture, p. 105:173-219. In: *Advances in agronomy*. Academic Press.
- Urrestarazu, M. 2015. *Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía*, p. 1-267. Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Urrestarazu, M., V. Gallegos, y J.E. Álvaro. 2017. The use of thermography images in the description of the humidification bulb in soilless culture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48(13):1595-1602.
- Urrestarazu, M., V.M. Gallegos-Cedillo, F. Ferrón-Carrillo, J.L. Guil-Guerrero, M.T. Lao, y J.E. Álvaro. 2019. Effects of the electrical conductivity of a soilless culture system on gamma linolenic acid levels in borage seed oil. *PLoS One* 14(2):e0207106.
- Urrestarazu, M., C. Nájera, y M. Gea. 2016. Effect of the spectral quality and intensity of light-emitting diodes on several horticultural crops. *HortScience* 51(3):268-271.
- Valera, D.L., L.J. Belmonte, F.D. Molina, y A. López. 2016. *Greenhouse agriculture in Almería. A comprehensive techno-economic analysis*. Cajamar Caja Rural, Almería, España.
- Van der Ploeg, A., M. van der Meer, y E. Heuvelink. 2007. Breeding for a more energy efficient greenhouse tomato: past and future perspectives. *Euphytica* 158(1-2):129-138.
- Vendruscolo, E., L. Campos, L. Nascimento, y A. Seleguini. 2018. Quality of muskmelon seedlings treated with thiamine in pre-sowing and nutritional supplementation. *Sci. Agrar.* 19:164-171.
- Wei, H., M. Wang, y B.R. Jeong. 2020. Effect of supplementary lighting duration on growth and activity of antioxidant enzymes in grafted watermelon seedlings. *Agronomy* 10(3):337.

V. CAPÍTULO 3

Diseño y mejora de las unidades de cultivo en los sistemas de cultivo sin suelo. Desarrollo de una patente



3

Diseño y mejora de las unidades de cultivo en los sistemas de cultivo sin suelo. Desarrollo de una patente

Jesús Gallegos ^{a*}, Miguel Urrestarazu ^a, Juan E. Álvaro ^b

^aCentro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, E-04120 Almería, España

^bPontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Calle San Francisco s/n, La Palma, Quillota, Chile

Artículo enviado a revista

Resumen gráfico



Resumen

Este capítulo revisa algunos de los avances en tecnología y diseño de contenedores para la investigación de plantas en contenedores en el ámbito hortícola, ornamental, forestal e incluso en horticultura urbana, aunque también útiles en otros campos de estudio. El objetivo fue conseguir un contenedor de cultivo (CC) tipo que reúna la totalidad de las funciones y exigencias que incluyen otros sistemas de forma aislada y que debe reunir un contenedor de cultivo. Se consultaron diversas bases de datos como: United States Patent and Trademark Office (USPTO), World Intellectual Property Organization (WIPO), European Patent Office (EPO), entre otras instituciones de origen asiático (China, Japón, Corea, India, Otras) y Sudamericano (Chile). Se desarrollaron dos diseños de contenedores de sección circular y cuadrada. El diseño consistió en un contenedor, formado por un número de cuatro piezas de plástico que, convenientemente ensambladas en su interior, componían un modelo de contenedor, que incorpora diversas características, configuraciones de forma y de elementos funcionales. Se realizó un diagnóstico general de los avances en investigación y desarrollo de patentes que permiten mejorar las condiciones con relación al crecimiento de las plantas en el sistema de cultivo sin suelo. Los resultados de búsqueda indican que existen múltiples documentos que describen contenedores para el cultivo de plantas, y algunos de ellos muestran el uso de ranuras en la pared interna de los contenedores cuyo objetivo es dirigir las raíces y minimizar deformación radical. A pesar de lo anterior, ninguno de los documentos citados anticipa por sí solo todas y cada una de las características de los diseños propuestos. El contenedor diseñado y construido incluye importantes mejoras estructurales, así como las ventajas de otros sistemas, integra funciones operativas para promover equilibrio en la relación raíz-biomasa aérea, e incluye funciones de manejo como rigidez, resistencia, economía de espacio, remoción, transporte, etc. El diseño puede ser reproducido y utilizado en diversas configuraciones tanto para el cultivo de plantas, como para producir plantas de calidad en diversidad de campos de estudio.

Palabras clave: diseño de contenedor, horticultura, cultivo sin suelo, base de datos, calidad de planta

5.1. Introducción

El estudio de plantas en contenedores en cultivo sin suelo se desarrolló a finales del siglo XVII (Woodward, 1699; Hewitt, 1966). Sin embargo, la producción comercial de plantas hortícolas y ornamentales en contenedores comenzó hasta 1960 (Cantliffe, 2008). Durante los siguientes años y a través de patentes industriales, se han examinaron diversas conformaciones de contenedores (circulares, rectangulares, piramidales, hexagonales, cilíndricos, cuadrados, ahusados de arriba abajo, etc.) y materiales de fabricación natural o artificial (proveniente de arcilla, madera, petróleo (plásticos) o de sílices (vidrio)) con plantas forestales (Ferrand, 1971; Guggenheim y Odle, 2016), ornamentales (Clement, 1958; Kreizel, 2002; Lüken y Sieverding, 2009) y hortícolas (Cantliffe, 2008; Gallegos et al., 2020), concluyendo que los contenedores de material plástico de sección circular y cuadrada ahusados de arriba a abajo son los más utilizados en el mercado de contenedores, por su aspecto ligero y económico. Sin embargo, el contenedor ideal aún no ha sido desarrollado porque depende del propósito de uso y de la especie a cultivar (Landis, 1990), y de la mejora tecnológica aplicada en el diseño de contenedores (Gallegos et al., 2020).

En esa época, Todd (1972) estudió diversos diseños de contenedor (conformación piramidal y rectangular) y desarrollo la pirámide invertida contenida en bandejas de semillero que promovía más unidades de cultivo por m², fabricados con plástico de espuma de poliestireno unitario, que facilitaban la extracción de planta, resistentes, económicos y reutilizables por su consistencia robusta. Por su parte, Spencer (1972) e industrias Spencer-Lemaire identificaron escasa supervivencia en campo y problemas de espiralado de las raíces, común a todos los contenedores de paredes lisas, cuando utilizaron como material espuma de celdas abiertas de urea-formaldehído y fenol-formaldehído, y material filtro de acetato de celulosa, y que posteriormente solucionaron al probar un contenedor de poliestireno que incluye ranuras en el diseño que reducían el espiralado de las raíces y brinda otros beneficios como la economía de espacio y superar las deficiencias de otros diseños (Spencer, 1979, 1991). Otras patentes y estudios de investigación coinciden en la importancia de las modificaciones al diseño de contenedores con ranuras verticales en la superficie del contenedor, que evitan deformaciones radiculares (Neddo et al., 1977) y ayudan a dirigir las raíces de las plántulas hacia abajo a través del eje vertical del contenedor (Cooley, 2011). Se ha visto

que las paredes verticales en el interior de los contenedores de sección tanto circular como cuadrada hace que aumente y mejore el crecimiento de las raíces (Gallegos et al., 2020).

El desarrollo de una tercera generación de contenedores comenzó a principios del decenio de 1980 con diferentes soluciones de poda de raíces laterales en las plántulas de viveros forestales (Rune, 2003). Desde muy antiguo las patentes de contenedores incluían un solo agujero que servía de drenaje (Stockdale, 1961), en la actualidad es frecuente encontrar patentes en el mercado de contenedores de cultivo que presentan un gran número de agujeros tanto para el drenaje como para la aireación de las raíces. La forma y posición del o de los agujeros de drenajes en relación con las superficies interiores tanto verticales como horizontales del contenedor tienen un efecto importante en la formación de los bulbos de humidificación (Urrestarazu et al., 2017). Los agujeros superiores (agujeros de aireación) en un contenedor no contribuyen al drenaje sino que sirven de aireación del sustrato en general y por tanto de las raíces que lo colonizan (Staby, 1979; Manlove, 1995; Rose, 2005). Los orificios de drenaje inferiores permiten la poda aérea de raíces y facilitan un adecuado equilibrio de humedad en el medio de cultivo (Insalaco, 1975; Nobbe, 2013), o combinan la facilidad de poda aérea con la función clásica de Spencer (1972), satisfaciendo la deflexión mecánica al incluir nervaduras en las superficies internas del contenedor (Lehmann, 2002; Rune, 2003; Clop, 2004; Yoon et al., 2013).

El avance sincrónico de patentes en la mejora del diseño de contenedores ha contribuido con otras ventajas importantes, proporcionando mayor facilidad en el manejo, rigidez y agarre (Bokmiller et al., 2000; Schromm, 2009; Eckert, 2011; Quan et al., 2011), durabilidad, fortaleciendo el reborde superior con refuerzos en diversas morfologías contra la deformación radial y axial, y permitiendo a su vez el fácil apilamiento (Stutelberg y Anderson, 1977; Sieverding, 2007), transporte (Park, 1966; Schmidt, 2009; Nilsson y Fransson, 2017), remoción sin dañar las plantas (Spencer, 1991; Chen, 2017), etiquetado (Skinner, 2002), y para evitar la adherencia entre contenedores (Stockdale, 1961). Sin embargo, queda margen para desarrollar mejoras.

En el mercado existe una gran variedad de contenedores que reúnen una o varias de las características mencionadas y se ha demostrado que el diseño de contenedores ha incrementado las ventajas del sistema de cultivo sin suelo y otros campos de acción, permitiendo obtener mayor potencial productivo, mejor calidad de planta, equilibrio de

la humedad en el medio de cultivo, minimizar problemas de raíz y permitir la gestión de los parámetros de nutrición mineral, pero sin embargo, no existe ninguno que reúna todas esas características y sobre todo que aumente el crecimiento de las raíces por el aumento de la superficie de contacto sustrato-superficie de contenedor, y sobre todo sin disminuir como condición necesaria el volumen de sustrato en el contenedor. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue diseñar y construir un contenedor de cultivo tipo que reúna la totalidad de las funciones y exigencias que incluyen otros sistemas de forma aislada y que debe reunir un contenedor de cultivo.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Bases de datos utilizadas

Se consultaron diversas bases de datos como: United States Patent and Trademark Office (USPTO), World Intellectual Property Organization (WIPO), European Patent Office (EPO), entre otras instituciones de origen asiático (China, Japón (Japan Patent Office, JPO), Corea (Korea Intellectual Property Rights Information Service, KIPRIS), India, Otras) y Sudamericano (Instituto Nacional de propiedad industrial, INAPI-Chile), para obtener un estudio detallado de patentes e investigaciones recientes, que describen y ponen a prueba la originalidad de la idea desarrollada en este estudio.

5.2.2. Prototipos CSC-HVF

Después del estudio preliminar, se tomó como base dos tipos de contenedores comerciales de sección circular y cuadrada (Pöppelmann TEKU[®], Alemania). Y en un primer diseño, se incrementó la superficie de contacto sustrato-contenedor, que como condición necesaria contenía un mismo volumen de sustrato. Se realizó un prototipo de prueba de cada contenedor en el software SolidWorks[®] (2018) (Fig. 1, Fig. 2). Y posteriormente en la práctica, se añadieron cuatro piezas plásticas convenientemente ensambladas en su interior, situadas de manera equidistante con un ángulo de 90°. Las características geométricas y las dimensiones de cada tipo de contenedor se indican en la Fig. 1 y 2.

Las dimensiones de cada pieza colocada en los dos tipos de contenedores (sección circular (\oplus) y cuadrada (\boxplus)) fue de 2 x 6 y 2 x 7 cm, respectivamente. El cálculo de la superficie real o total de contacto (cm²) de los nuevos contenedores (considerando el

volumen de sustrato) se determinó de acuerdo con las ecuaciones matemáticas 1, 2 y 3, utilizadas para distintas configuraciones de contenedor.

$$At_t = n h (d + 2 c) \quad (1)$$

$$At (\oplus) = \pi r^2 + \pi \left(\sqrt{(R - r)^2 + h^2} \right) (R + r) + At_t \quad (2)$$

$$At (\boxplus) = 2 (a + b) \sqrt{h^2 + (a - b)^2/4} + b^2 + At_t \quad (3)$$

donde h es la altura desde la base interna del contenedor hasta la superficie de sustrato (cm), R y r son el radio formado en la base superior e inferior de la sección circular (cm), a y b son la longitud formada de la base superior e inferior de la sección cuadrada (cm), c y d son el largo y ancho de la sección de la pared vertical interna (cm) y n es el número de paredes verticales en el interior del contenedor.

El prototipo diseñado se describe como un Contenedor de Sección Circular/Cuadrada con Paredes Verticales para ser usado en Horticultura y Viveros Forestales (CSC-HVF). Los CSC-HVF1 corresponden a los contenedores de sección circular (\oplus) y CSC-HVF2 a los de sección cuadrada (\boxplus).

En ambos casos el contenedor se compone de tres partes funcionales básicas. La primera es la parte troncocónica o tronco-piramidal, no continua que constituye el cuerpo principal del contenedor de cultivo (Fig. 3). Dentro del contenedor están las paredes verticales orientadas de manera equidistante (Fig. 3.2), que generan dos superficies nuevas para el contacto del sustrato de relleno-contenedor. La parte superior del cuerpo principal contempla un reborde superior que permite una mayor resistencia mecánica, refuerzo para el transporte e incremento del número de veces de reutilización del contenedor de cultivo.

La segunda parte del contenedor está compuesta por dos configuraciones de perforaciones circulares. El primer grupo de perforaciones son los agujeros de drenaje (Fig. 3.4) colocados junto a la pared perimetral y ordenados de manera equidistante. El segundo grupo de agujeros superiores a los de drenaje son los agujeros de aireación (Fig. 3.5) colocados sobre la parte central.

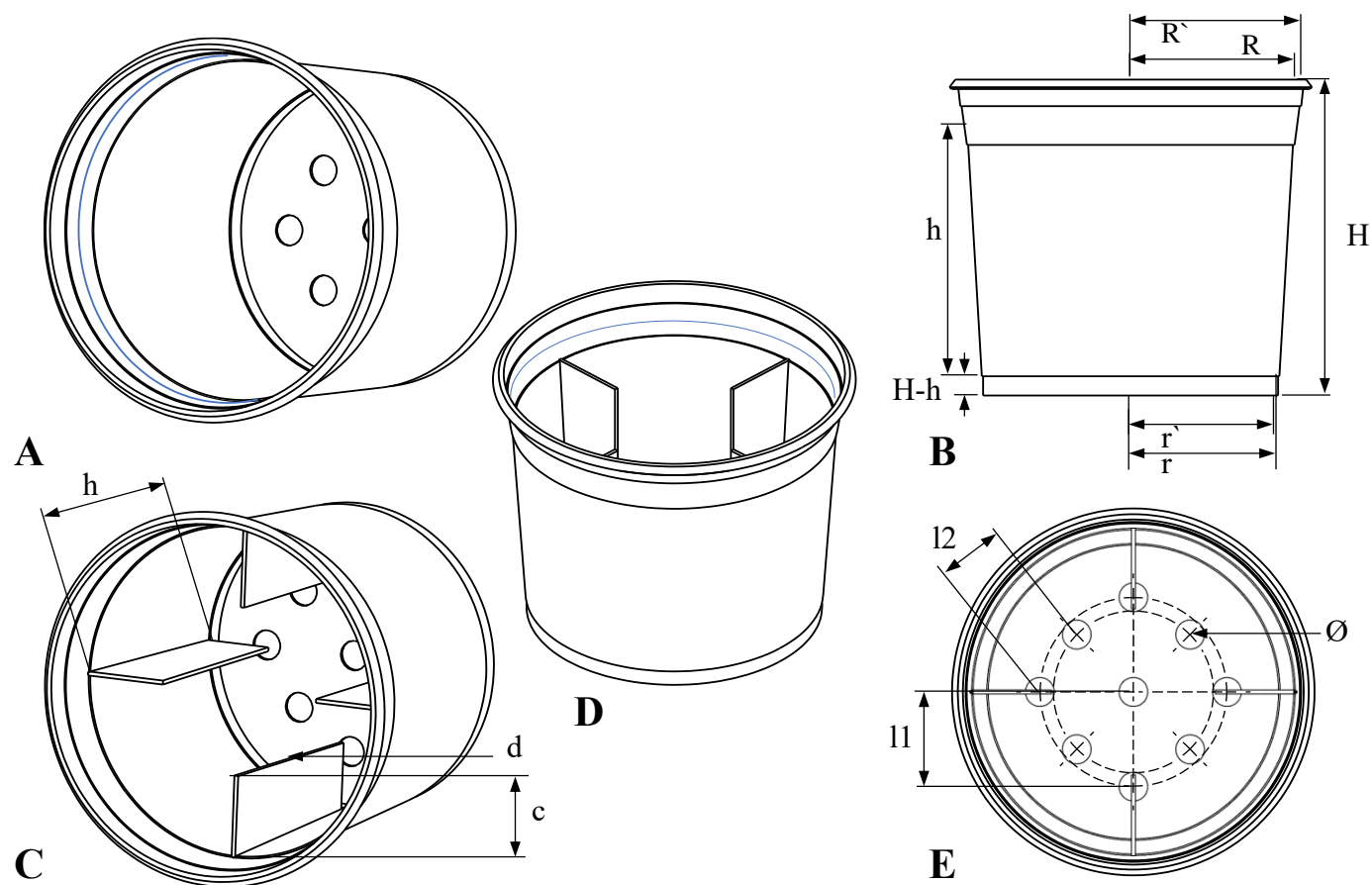


Fig. 1. Características del contenedor de sección circular (CSC-HVF1). (A) contenedor de superficie lisa. (B, C, D y E) contenedor con PVI, donde se indican los principales componentes del prototipo. H) altura total. R' y r') radio superior e inferior. H-h) altura de la base. h, c y d) dimensiones de los PVI. 11, 12 y Ø) dimensión de los agujeros de drenaje y de aireación. Línea continua azul indica el nivel de llenado del sustrato.

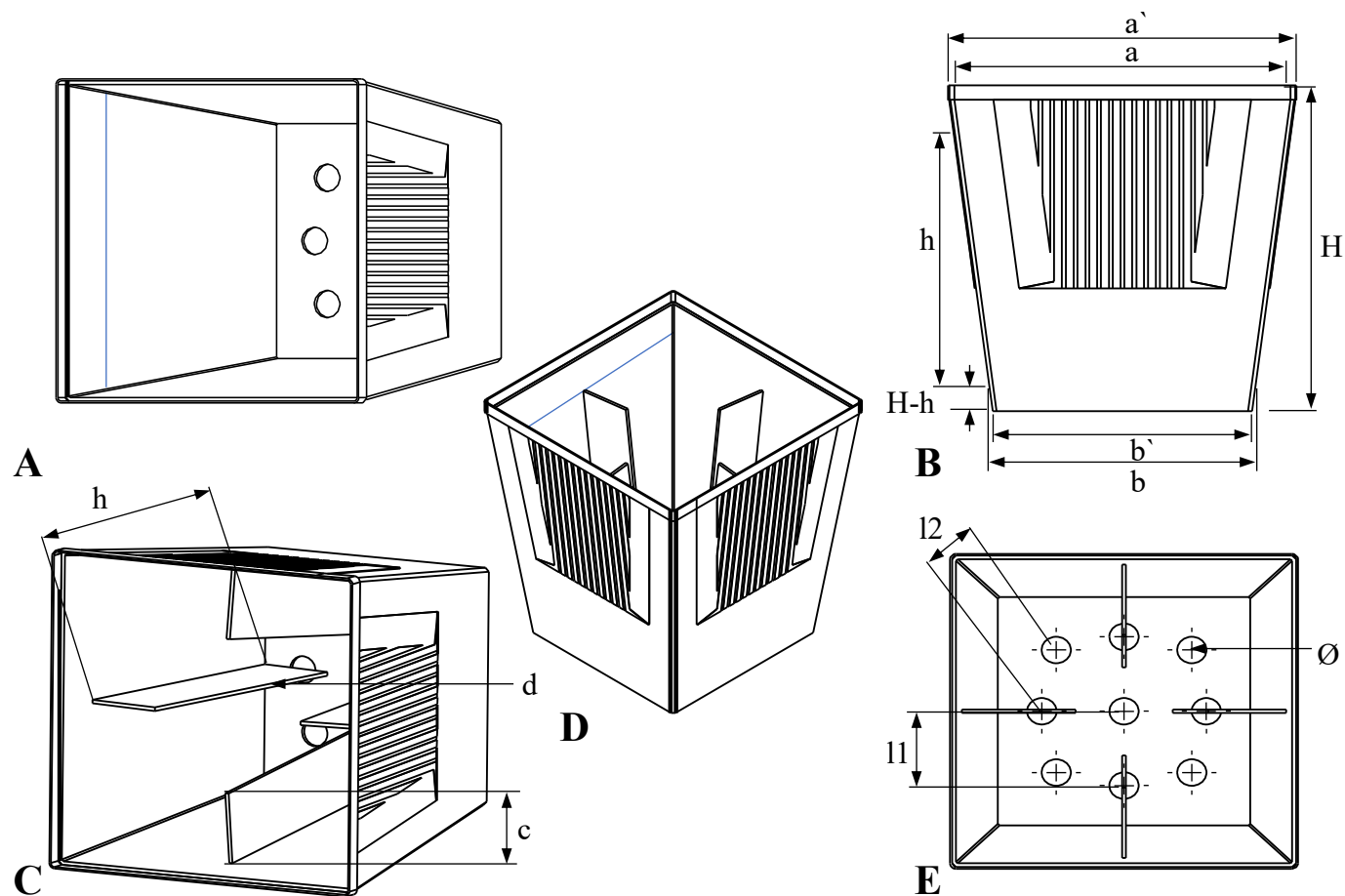


Fig. 2. Características del contenedor de sección cuadrada. (CSC-HVF2) Contenedor sin PVI. En (B, C, D y E) se observa un contenedor con PVI y las partes que lo constituyen. H) altura total. a`-b`) longitud superior e inferior. H-h) altura de la base. h, c y d) dimensiones de los PVI. l1, l2 y Ø) dimensión de los agujeros de drenaje y de aireación. Línea continua azul indica el nivel de llenado del sustrato.

La tercera parte del contenedor de cultivo del prototipo es una pieza continua de separación (Fig. 3.5) que permite el aislamiento del lugar donde se instala el cultivo con el suelo y con el flujo que sale por los agujeros de drenaje, se ubica en la base del contenedor de cultivo.

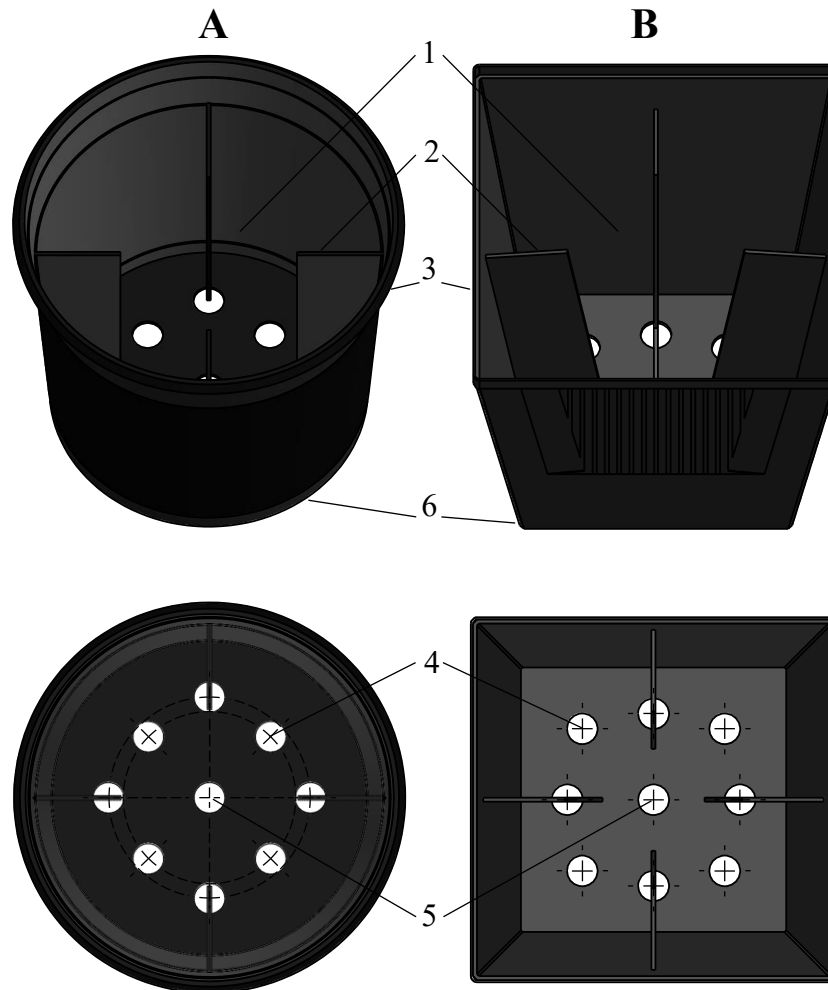


Fig. 3. Modelos de los prototipos de prueba diseñados en SolidWorks® (2018). (A) Contenedor de sección circular. (B) Contenedor de sección cuadrada. (1) cuerpo principal. (2) paredes verticales internas. (3) reborde superior. (4) orificios de drenaje. (5) orificios de aireación. (6) altura de base.

5.3. Resultados y discusión

5.3.1. Prototipos CSC-HVF

De acuerdo con los resultados de la búsqueda en las diversas bases de datos, se encontraron múltiples documentos de patentes que describen diseños de contenedores para el cultivo de plantas, muchos de ellos para controlar el agua y el crecimiento de las raíces. Algunos de ellos indican el uso de paredes verticales o pliegues internos, y otros presentaban múltiples configuración de agujeros de drenaje y aireación. Sin embargo, ninguno de los documentos citados (Fig. 4) incluye por sí solo todas y cada una de las características de las mejoras desarrolladas en el contenedor propuesto.

Los siguientes documentos de patente describen de forma aislada algunas de las características funcionales desarrolladas en el prototipo CSC-HVF. Por ejemplo, Clement (1958) describe un receptáculo económico de cartón para el cultivo de plantas de un solo uso, que se puede configurar según sea necesario con piezas de ensamblaje, incluye pliegues hacia el interior del contenedor que formaban tabiques radiales y verticales al fijar un anillo de retención cuyo objetivo fue brindar una figura troncocónica y no indica una ventaja objetiva como se describe en el modelo . El número de piezas y la resistencia de los materiales predispone su enclavamiento antes del riego.

Spencer (1972) probó un diseño de contenedor que incluía ranuras en la superficie interna cuyo objetivo era reducir el espiralado de raíz.

Stutelberg y Anderson (1977) diseñaron un contenedor apilable que permite soportar porciones periféricas de un contenedor por encima del borde superior de dos contenedores similares llenos, que están provistos con refuerzos superiores y cuatro agujeros de drenaje-aireación. Cabe indicar, que el diseño no describe paredes verticales internas y no favorece el ahorro de espacio de acuerdo con el objetivo definido.

Manlove (1995) describe un contenedor con características de poda al aire, con una base que sirve para aireación y drenaje, e indica una pluralidad de hendiduras (tabiques verticales) que sobresalen en la periferia con aberturas en parte inferior para el desarrollo de raíces laterales. De forma similar, Lehmann (2002) refiere un contenedor para el crecimiento de plantas con múltiples características. Sin embargo, no contempla un cilindro separador en la base, un cono basal o una configuración de orificios de drenaje-aireación.

Clop (2004) describe un contenedor anti-enredo que contempla gran parte de las características propuestas en el contenedor CSC-HVF, no obstante, no se indica la misma configuración-forma de los agujeros de drenaje y de aireación, si bien, incluye un conjunto de pliegues en su pared lateral, su principal función es servir de guía para el crecimiento de las raíces y no como dos superficies nuevas para el contacto del sustrato-contenedor, que se anticipa en el diseño CSC-HVF.

Rose (2005) diseñó un contenedor que se caracteriza por dos piezas separadas, una placa base de aireación-drenaje que se coloca en el fondo de un contenedor convencional (base plana), y que de manera indirecta disminuye del volumen total del contenedor, no presenta ranuras en la superficie del contenedor, en su lugar, presenta aberturas laterales para intercambio de agua y aire del interior-exterior.

Eckert (2011) describe un contenedor de plantas dividido en dos partes estructurales. Una parte externa que incluye tabiques verticales, cuyo objetivo es formar superficies de agarre para facilitar la manipulación. También, la parte interna incluye los tabiques cuyo objetivo es brindar resistencia mecánica al contenedor. Y que de forma conjunta permite su acople para formar un sistema de depósito de agua en su interior que reduciría la necesidad de riego.

Nobbe (2013) desarrolló un contenedor de forma troncocónica, de fácil apilamiento entre contenedores, provista de una configuración de anillos concéntricos de agujeros de drenaje y de ventilación, y un borde superior de refuerzo, pero de superficie lisa, que en la práctica supone importantes problemas mecánicos de raíz.

Yoon et al. (2013) diseñaron un contenedor para cultivar árboles que comprende una pluralidad de orificios para promover el crecimiento de raíces, así como tabiques radiales y verticales pequeños cuyo objetivo es evitar que se enrollen las raíces.

Por su parte, Chen (2017) refiere un contenedor para el cultivo de plantas cuyo objetivo es la extracción fácil de planta, el cual, comprende pequeños tabiques verticales en las paredes laterales del contenedor, cuyo objetivo es proporcionar aireación. La base es móvil verticalmente con una lengüeta guiada por los tabiques de ventilación. Y un sistema ordenado de agujeros de drenaje en forma de anillo que facilitan la poda aérea de raíz.

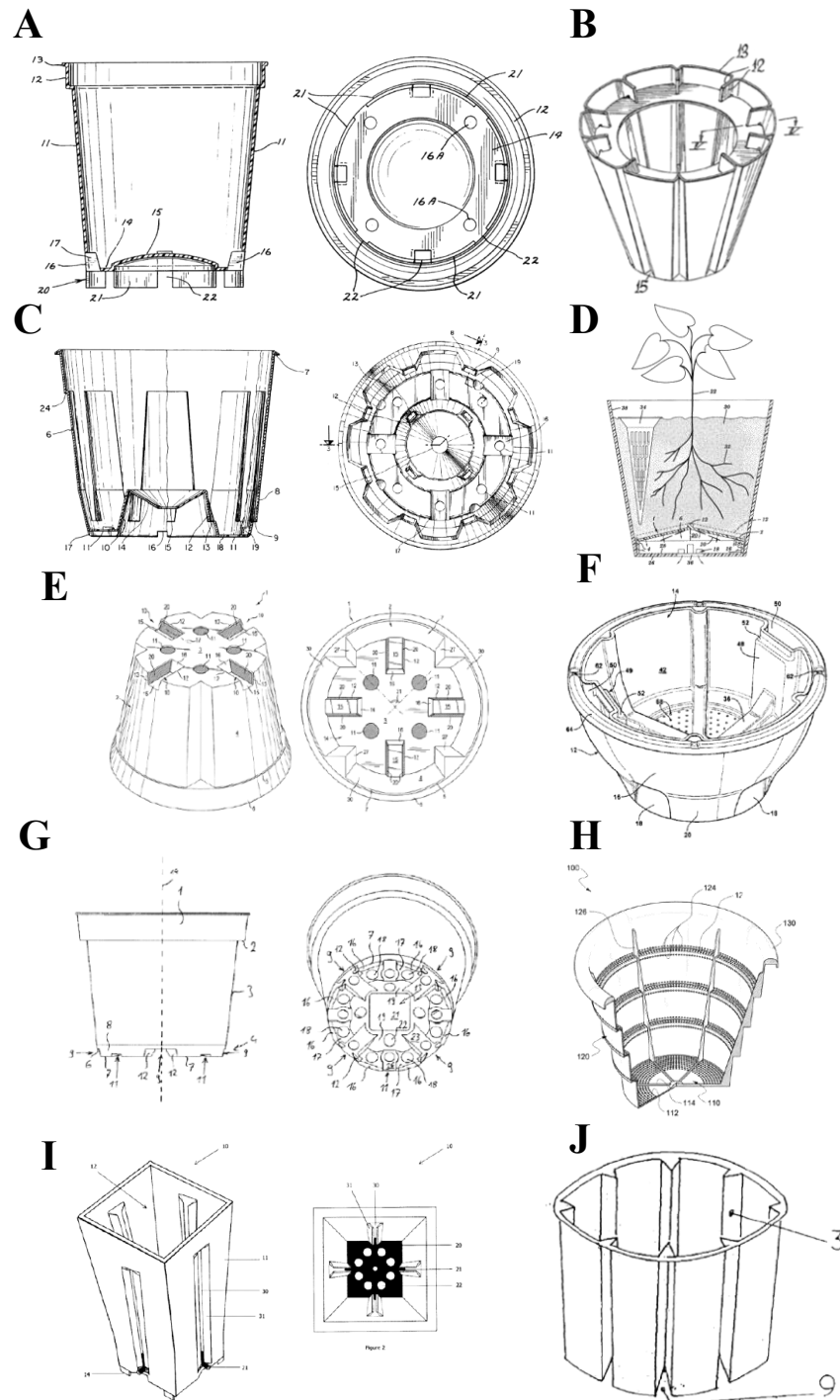


Fig. 4. Estado de la técnica de algunos de los documentos de patente analizados. **A.** Maceta apilable (Stutelberg y Anderson, 1977); **B.** Receptáculo (Clement, 1958); **C.** Contenedor de vivero (Manlove, 1995); **D.** Placa base de aireación (Rose, 2005); **E.** Dispositivo, especialmente para plantas (Lehmann, 2002); **F.** Contenedor de dos piezas con depósito de agua (Eckert 2011); **G.** Maceta (Nobbe, 2013); **H.** Maceta para cultivar un árbol (Yoon et al., 2013); **I.** Contenedor de cultivo de plantas (Chen, 2017); **J.** Maceta anti-enredo (Clop, 2014).

Estudios de investigación reportan que el diseño de contenedores, propiamente dicho, el uso de paredes verticales en el interior de estos beneficia la formación de bulbos de humidificación en los sustratos (Urrestarazu et al., 2017), favorece el crecimiento y calidad de raíz en plantas hortícolas (Liptay y Edwards, 1994; Gallegos-Cedillo, 2017) y en plantas forestales (Rune, 2003; Amoroso et al., 2010).

Si bien algunos de los documentos de patente analizados anteriormente, describen pliegues, hendiduras o paredes verticales en la superficie de los contenedores (suficientemente pequeñas), su principal función es servir de guía para el crecimiento de las raíces o minimizar los problemas de espiralización radicular (altamente conocido en el estado del arte) y no como dos superficies nuevas para el contacto del sustrato-contenedor, que favorece un incremento en la superficie de contacto dentro de un mismo volumen de contenedor, y que se anticipa en el diseño **CSC-HVF**.

El modelo desarrollado a partir del prototipo CSC-HVF (Fig. 3) provee gran parte de las características estructurales que se pretenden alcanzar, por ejemplo, su forma es troncocónica, incluye las paredes verticales en su interior, que sirven de guía para el crecimiento de raíces. Además, incluye un refuerzo estructural con reborde superior, orificios de drenaje y aireación con configuración específica, es susceptible a ser reproducido (Fig. 5), así como otras ventajas funcionales, similares a las descritas en los documentos de patente desarrollados por Clement (1958), Spencer (1972), Stutelberg y Anderson (1977), Manlove (1995), Lehmann (2002), Rose (2005), Eckert (2011), Nobbe (2013), Yoon et al. (2013), Clop (2014), Chen (2017) y Gallegos-Cedillo (2017).

En la actualidad, Gallegos et al. (2020) utilizando estos contenedores, reportan que la modificación al diseño de contenedores con la adición de las paredes verticales en el interior de los contenedores de sección tanto circular como cuadrada hace que aumente y se mejoren el crecimiento de las raíces en plantas hortícolas, y son en parte debido al beneficio de la distribución homogénea de la solución nutritiva y por su influencia en la formación de los bulbos de humidificación dentro del sustrato (Urrestarazu et al., 2017).

Liptay y Edwards (1994) al trabajar con plántulas de tomate en condición de semillero, reportaron que la morfología de la superficie del contenedor afectaba el crecimiento de las raíces.

En plantas forestales, Spencer (1972), Rune (2003) y Amoroso et al. (2010) registraron que al utilizar contenedores con ranuras verticales, se promueve un mejor crecimiento radical y menor cantidad de raíces deformadas.

En la Fig. 5 se muestra un modelo de contenedor sin PVI (Fig. 5A) y otro que incluye las paredes verticales internas (Fig. 5B), y se observa la impresión 3D del modelo obtenido del prototipo CSC-HVF, donde se identifica que es susceptible a ser reproducido y utilizado, facilita el apilamiento entre contenedores que es importante en la economía del espacio, sobre todo si es óptima.

Cada contenedor cuenta con idéntica configuración de agujeros de drenaje y de aireación que beneficia el correcto equilibrio de humedad en el sustrato. También, se describen otras características estructurales y de funcionamiento que favorecen el cultivo de plantas.

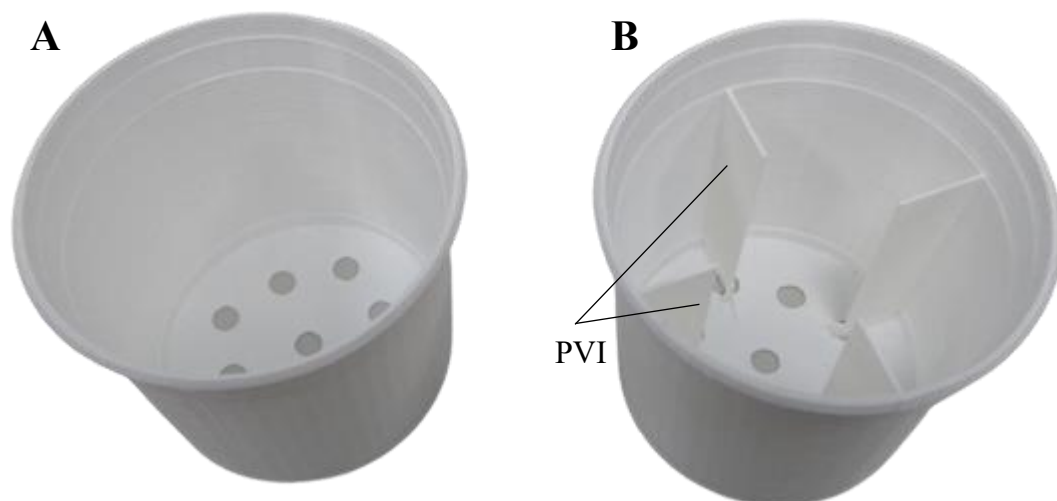


Fig. 5. Reproducción del modelo de sección circular (impresión 3D). **A)** Contenedor de superficie lisa. **(B)** Contenedor con cuatro paredes verticales internas.

El prototipo desarrollado es susceptible a ser reproducido y utilizado en diversas configuraciones para el cultivo de plantas (Fig. 5). El campo de aplicación puede ser diverso, por ejemplo, horticultura, ornamental, forestal y horticultura urbana.

En resumen y en vista de los documentos de patente analizados, se indica que ninguno de los documentos citados incluye por sí sola todas y cada una de las características desarrolladas en el contenedor CSC-HVF. En este sentido, el contenedor CSC-HVF puede ser considerado novedoso, con aplicaciones técnicas e industriales en diversos campos de investigación.

5.4. Conclusiones

Los contenedores diseñados y construidos anticipan mejoras estructurales importantes e incluye los beneficios de otros sistemas; 1) cumplen con la función primaria de contener sustrato que provee de soporte físico a la planta; 2) integran funciones operativas o requerimientos especiales para promover equilibrio en la relación raíz-biomasa aérea, 3) favorecen la inversión económica, e 4) incluyen funciones de manejo como rigidez, resistencia, economía de espacio, apilado, remoción, transporte, etc. Además, el diseño puede ser reproducido y utilizado en diversas configuraciones tanto para el cultivo de plantas, como para producir plantas de calidad en diversidad de campos de estudio.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) por su apoyo financiero a este trabajo.

5.5. Literatura citada

- Amoroso, G., P. Frangi, R. Piatti, F. Ferrini, A. Fini, y M. Faoro. 2010. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience* 45:1824-1829.
- Bokmiller, D., M. Moon, R. Gumpf, S. Mullins, M. Blomerley, y S. Pavelka. 2000. Nest and stack plant Pot. U.S. Patent No. 6,134,832. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Cantliffe, D.J. 2008. Plug technology: horticultural revolution, in: *Chronica Horticulturae. Acta Hortic.* 48(4):7-10.
- Chen, S.A. 2017. Plant cultivation container. J.P. Patent No. 521,996 A. Japan Patent Office, Japan, JP: 01-16.
- Clement, J.J. 1958. Receptacle. U.S. Patent No. 2,827,217 A. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Clop, L. 2004. Anti-tangling plant pot. U.S. Patent No. 0,237,390 A1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Cooley, J.N. 2011. Plant container. U.S. Patent No. 7,954,277 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- Eckert, K. 2011. Two-piece plant container with water reservoir. U.S. Patent No. 8,065,834 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-12.
- Ferrand, M. 1971. Plant container. U.S. Patent No. 3,557,489. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Gallegos-Cedillo, J. 2017. Estudio de la morfología del contenedor para mejorar la eficiencia del cultivo sin suelo. Trabajo Fin de Máster. Universidad de Almería, España.
- Gallegos, J., J.E. Álvaro, y M. Urrestarazu. 2020. Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience* 55(6):787-794.
- Guggenheim, T.L. y R.R. Odle. 2016. Methods to grow, deliver, and plant young trees in a removable tubular container. U.S. Patent No. 9,414,547 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.

- Hewitt, E.J. 1966. Sand and water culture methods use in the study of plant nutrition, p. 01-625. 2nd ed. Technical Communication No. 22 (revised). Commonwealth Agricultural Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Malling, Maidstone, Kent. Farnham Royal, Inglaterra.
- Insalaco, C.J. 1975. Nursery pot having improved drainage. U.S. Patent No. 3,896,587. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Kreizel, J. 2002. Planter and method of manufacturing same. U.S. Patent No. 6,360,484 B1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Landis, T.D., T. Luna, y R.K. Dumroese. 2014. Containers, p. 123-140. In: K.M. Wilkinson, T.D. Landis, D.L. Haase, B.F. Daley, y R.K. Dumroese (eds.). Tropical nursery manual: A guide to starting and operating a nursery for native and traditional plants. Agriculture Handbook 732. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Lehmann, E. 2002. Device, especially for growing plants. U.S. Patent No. US 6,339,899 B1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Liptay, A. y D. Edwards. 1994. Tomato seedling growth in response to variation in root container shape. HortScience 29:633-635.
- Lüken, R. y A. Sieverding. 2009. Flower pot. U.S. Patent No. 7,610,717 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Manlove, S.F. 1995. Nursery container. U.S. Patent No. 5,459,960 A. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-07.
- Neddo, K.S., G.M. Alder, y J.L. Gwilliam. 1977. Seedling plant propagation container. U.S. Patent No. 4,006,558. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Nilsson, T. y U. Fransson. 2017. Plugtrainer. U.S. Patent No. 9,795,090 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.
- Nobbe, N. 2013. Planting pot. U.S. Patent No. 8,434,261 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Park, G.B. 1966. Plant shipping container. U.S. Patent No. 3,284,949. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.

- Quan, T.Z., J.H. Wu, y X. Wang. 2011. Nursery container. U.S. Patent No. 0,232,187 A1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-13.
- Rose, A.D. 2005. Aerating base plate for a flowerpot. U.S. Patent No. 6,955,0008 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fenn.* 37:333-342.
- Schmidt, G. 2009. Plastic plant pot. U.S. Patent No. 7,624,535 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-08.
- Schromm, F. 2009. Container with plant identification tag slot. U.S. Patent No. 7,624,536 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-10.
- Sieverding, L.A. 2007. Plant pot made from deep-drawn plastic. U.S. Patent No. 7,204,056 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Skinner, R.B. 2002. Container and tag assembly. U.S. Patent No. 6,463,696 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.
- Spencer, H.A. 1972. Planting from the book. *For. Chron.* 48(5):240-241.
- Spencer, H.A. 1977. Container for seedlings. U.S. Patent No. 4,057,932. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-16.
- Spencer, H.A. 1991. Book-Type container for raising seedlings. U.S. Patent No. 4,998,378. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Staby, G.L. 1979. Container with raised indentations for aeration and drainage. U.S. Patent No. 4,173,097. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Stockdale, W.D. 1961. Plastic flower pot. U.S. Patent No. 3,009,603. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Stutelberg, K.R. y D.C. Anderson. 1977. Stackable flower pot. U.S. Patent No. 4,057,931 A. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Todd, G.K. 1972. Seedling Flat. U.S. Patent No. 3,667,159A. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC:01-05.

- Urrestarazu, M., V. Gallegos, y J.E. Álvaro. 2017. The use of thermography images in the description of the humidification bulb in soilless culture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48:1595-1602.
- Woodward, J. 1699. II. Some thoughts and experiments concerning vegetation. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 21(253):193-227.
- Yoon, T.S., K.E. Jang, K.J. Shin, y Y.J. EO. 2013. Pot for growing a tree. K.R. Patent No. 0,085,149 A. Korea Intellectual Property Rights Information Service, Korea del sur, KC: 01-14.

VI. CONCLUSIÓN GENERAL



Conclusión general

Capítulo 1.

Las paredes en el interior de los contenedores no solo refuerzan los contenedores o macetas desde una perspectiva mecánica, sino que también impiden que las raíces se muevan en forma espiralada. Además de disminuir la deformación radical, que afecta potencialmente al anclaje de las raíces después del trasplante y reduce el crecimiento de brotes. Las paredes verticales internas también favorecen la producción de biomasa en las plantas hortícolas y aumentan sustancialmente el peso total de las raíces, lo que aumenta la capacidad de las plantas para sobrevivir en su caso al estrés por sequía y, por lo tanto, superar el posible estrés postrasplante en ambos sustratos.

Capítulo 2.

La modificación de la morfología del contenedor con la adición de tabiques verticales en el interior influye positivamente en las plantas hortícolas. Los tabiques verticales en el interior del contenedor 1) incrementan la absorción de agua y nutrientes, 2) disminuyen la emisión de nitratos al medio ambiente, 3) incrementan significativamente el volumen y el peso total del crecimiento radical, la producción de biomasa, fruto y el rendimiento productivo en cada cultivo; 4) mejoran la calidad de planta, más equilibrada entre la superficie del vástago y el aparato radical con el Índice de Calidad de Dickson que engloba la combinación de diferentes índices; e 5) incrementan la eficiencia en el uso de nutriente y agua.

Capítulo 3.

Los contenedores diseñados y construidos mejoran estructuralmente los modelos existentes en el mercado incrementando la productividad y respetando las características técnicas relacionadas con su almacenamiento y transporte. Además, el diseño puede ser reproducido y utilizado en diversas configuraciones tanto para el cultivo de plantas, como para producir plantas de calidad en diversidad de campos de estudio.

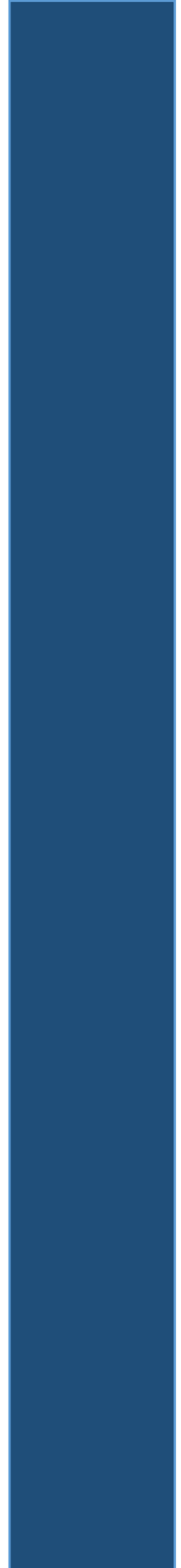
Conclusión general

Las modificaciones estructurales del interior de un contenedor pueden proporcionar una significativa mejora en el comportamiento agronómico en la producción de plantas hortícolas. Estos beneficios se registran tanto en la producción, en calidad y en cantidad, como en la mejora de los insumos y el respeto por el medio ambiente.

Desde el punto de vista económico, es factible optar por los contenedores con paredes interiores, ya que favorecen un mayor aprovechamiento de la inversión económica al incrementar la eficiencia productiva de los cultivos hortícolas y al mismo tiempo los beneficios económicos.

El contenedor de cultivo diseñado y construido es novedoso, con aplicación técnica e industrial en diversidad de campos de estudio. Por tanto, el diseño del contenedor es presentado a protección intelectual en modelo de utilidad y patente.

VII. ANEJO



Anejo

Descripción del equipo de laboratorio utilizado para medir diferentes parámetros de planta durante los experimentos realizados en esta tesis doctoral.

| Equipos utilizados | Marca y modelo | Parámetro medido |
|-----------------------------------|--|--|
| Contenedor circular y cuadrado | PÖPPELMANN TEKU® (Germany), VCG and VQB series, respectively. | Unidad de cultivo |
| Balanza analítica de precisión | Adventurer® Analytical Electronic Balance (model AX124/E-OHAUS). | Biomasa fresca y seca |
| Horno de convección forzada | Thermo Scientific™ Heratherm®, Germany. | Biomasa seca de órgano de planta |
| Placas Petri (140 mm) | Thermo Scientific™ Sterilin™. | Medición de raíz |
| Cámara réflex digital alpha 58 | Alpha 58 digital reflex camera, Japan. | Captura de imagen y determinación de Área foliar |
| Contenedor circular | Pöppelmann TEKU®, (Germany), serie MCC. | Unidad de cultivo |
| Probeta graduada de polipropileno | Thermo Scientific™ Nalgene™, USA. | Volumen de drenaje y solución control |
| Conductímetro y potenciómetro | Crison MM40+ LPV2500.98.0002; Hach, Vizcaya, España. | CE y pH, solución nutritiva, drenaje y frutos |
| Microelectrodos | electrodos específicos B-742 y B-731 respectivamente, LAQUAtwin-Horiba, Japón. | Iones nutritivos |
| Calibre digital | Stainless Hardened, España. | Diámetro de tallo |
| Flexómetro | Cinta métrica | Longitud de frutos |
| Vaso de precipitados | Vaso de precipitados (2000 mL) | Volumen radical |
| Penetrómetro | penetrómetro de mano Effegi (Facchini, Alfonsine, Italia) | Firmeza |

Descripción de los principales tipos de software utilizados para analizar y representar los parámetros agronómicos estudiados en esta tesis doctoral.

| Software utilizados | Parámetro analizado |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| SolidWorks® (2018) | Diseño de contenedores |
| AutoCAD® (2016) | Determinación de área foliar |
| Statgraphics Centurion® XVIII (2018) | Análisis estadístico |
| Paquete de Microsoft Office (2016) | Manejo de base de datos y gráficos |

CHAPTER 2

Container design affects shoot and root growth of vegetable plant

Jesús Gallegos ^{a*}, Juan E. Álvaro ^b, Miguel Urrestarazu ^a

^a Centro de Investigación en Biotecnología Agroalimentaria (CIAIMBITAL), Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, E-04120 Almería, España

^b Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Escuela de Agronomía, Calle San Francisco s/n, La Palma, Quillota, Chile

Revista: HortScience

Factor de impacto (JCR, 2020): 0,906

Categoría: Horticultura

Posición de la revista dentro de la categoría 2020: (17/36)

Cuartil: Q2

HORTSCIENCE 55(6):787–794. 2020. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14954-20>

Container Design Affects Shoot and Root Growth of Vegetable Plant

Jesús Gallegos

CIAIMBITAL Research Centre, University of Almería, Ctra. de Sacramento s/n, E-04120 Almería, Spain

Juan E. Álvaro

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, School of Agronomy, Calle San Francisco s/n, La Palma, Quillota, Chile

Miguel Urrestarazu

CIAIMBITAL Research Centre, University of Almería, Ctra. de Sacramento s/n, E-04120 Almería, Spain

Additional index words. internal vertical wall, root surface, container shape, vegetable crops, root impedance

Abstract. The response of root growth in containers has been studied in recent decades. The objective was to evaluate the effect of four types of containers on root and shoot growth. The containers were two shapes, round and square, and in some containers, internal vertical walls (IVWs) were placed that increased the internal container surface area with two substrates: perlite and coir fiber. Seedlings of cucumber, pepper, and tomato were transplanted. Two experiments were performed: vegetative growth and drought stress by partial decapitation and a period without fertigation. After decapitation, preexisting and new leaf area, dry biomass or the leaves, and stem were measured. The results revealed that the type of container had no effect, nor were there significant differences between substrates. The containers with IVWs exhibited an increase in biomass and the root surface. The total contact surface with the substrate of the four container types was closely related to the recorded plant growth. Thus, IVWs not only decrease mechanical problems of roots by preventing spiralling but also favor the production of biomass in vegetable plants and substantially increase the root, enabling the plants to manage water deficit and potentially improve posttransplant stress.

Introduction

The response of roots to mechanical impedance has intrigued horticulturists, plant biologists, and substrate physicists for at least two centuries (Araki and Iijima, 2001; Atwell, 1993), whereas the model of root growth as a function of multiple variables in a container remains far from being completely understood. Spencer-Lemaire Industries attempted to design a container that would include the benefits of other systems, and grooves were included in the design, because it was believed that they would reduce root spiralling; this was then borne out in practice (Spencer, 1972). The design of containers has increased the advantages of this technique: to produce better-quality seedlings in individual containers, minimize root deformations, mechanize production, facilitate planting, and allow the control of mineral nutrition parameters. However, improvements remain to be developed.

The substrate, fertilization, and fertigation of a culture container, there are multiple aspects that can affect root growth and, subsequently, a plant's aerial growth.

Multiple studies indicate that the size, volume, shape, depth, color, and even roughness of a container's internal walls affect the growth characteristics of plants, particularly the quality of their root system (Lemaire et al., 2005; Lemaire and Papin, 1989; Liptay and Edwards, 1994; Rune 2003; South et al., 2005; Spencer, 1972; Yano et al., 2018).

The morphology of a container is one of the primary factors to consider, because its design determines the morphological and physiological characteristics of seedlings, primarily in terms of their root systems (Aphalo and Rikala, 2003; Dominguez-Lerena et al., 2006; Landis, 1990; Sánchez-Aguilar et al., 2016; Spencer, 1972).

With identical substrate filling, containers with a predominant horizontal axis have the advantage of greater water retention because the water pressure column is smaller (Ansorena, 1994). Various studies, such as those of Heller et al. (2015) on the geometry of a container (from narrow and tall containers to wide and short containers) holding lettuce, found that shape does not affect yield when the containers are of identical volume. However, when a plant is in a container for a long period, the depth of the container determines the length of the plant's main root and therefore the plant's survival under limiting conditions, as determined from stimulating aerial and root growth after the

transplant of various woody plants (Biran and Eliassaf, 1980; Chirino et al., 2008; Pemán et al., 2006; Landis et al., 2014; Trinidad et al., 2015).

Through industrial patents, the design of containers has permitted many container shapes (round, rectangular, hexagonal or square and tapered from top to bottom) to be tested with forest plants (Ferrand, 1971; Guggenheim and Odle, 2016), with ornamentals (Kreizel, 2002; Lüken and Sieverding, 2009) and in horticulture. In early experimental tests, Spencer (1972) implemented vertically oriented crests, ribs or grooves that represented a mechanical impediment or obstacle to spiralling root growth. However, the perfect container has yet to be developed because it depends on the purposes of use and the species cultivated (Landis, 1990). Many of the modifications to the design of container properties are performed to avoid root deformations (Neddo et al., 1977) and to direct the roots of seedlings downward (Cooley, 2011), resulting in the development of the important growth of straight roots extending through the vertical axis of the container, with the addition of vertical grooves along the cell up to the opening of the drainage holes (Spencer, 1972), as described in Spencer (1991) and Spencer (1977). Some container design modifications have been developed to facilitate handling, rigidity (Bokmiller et al., 2000; Quan et al., 2011; Schromm, 2009), durability, stacking (Sieverding, 2007), transport (Nilsson and Fransson, 2017; Park, 1966; Schmidt, 2009), removal without damage to plants (Spencer, 1991), labelling (Skinner, 2002), and avoiding adhesion between containers (Stockdale, 1961). Other design functions allow for the aerial pruning of roots in drainage holes and provide an adequate balance of moisture in the culture medium (Insalaco, 1975; Staby, 1979), or they combine ease of aerial pruning with the classic function by Spencer (1972), satisfying mechanical deflection by including ribs on the internal container surfaces (Rune, 2003).

Gilman et al. (2003) and Amoroso et al. (2010) reported that plants grown in plastic containers with smooth walls during one crop cycle generate deformed roots with spiral movements, an impediment to horizontal growth. Root deformations and their influence on posttransplant growth parameters have been studied (Lemaire and Papin, 1989; Spencer, 1972) due to their importance in ornamental, vegetable, and forest crops. Root spiralling is one of the most important factors influencing vegetative and root development, in addition to field survival (Brass et al., 1996), and is a possible influence on flowering (Armitage and Gross, 1996).

Container selection should therefore be in accordance with the characteristics that are specific to 1) the root system (Keever and Cobb, 1987), 2) the duration of the intended container culture (Lemaire et al., 2005) and 3) the combination of the culture medium (Bilderback and Fonteno, 1987) with its fertigation (Urrestarazu et al., 2017).

Although there are studies on the effects of root growth, development and production of vegetable plants as a function of mineral nutrition (Dixon, 2019; Urrestarazu, 2015; Urrestarazu et al., 2008), irrigation (Salter, 1961), the internal roughness and smoothness in seedling trays on tomato plants (Liptay and Edwards, 1994), and in forest nurseries (Amoroso et al., 2010; Spencer, 1972). Roots often grow along the surface of the pots, and thus a large surface area may increase root growth; however, there is scant information on container morphology designs that result in an increase in root area for containers with the same volume that have inner vertical walls. Some benefit may be derived from incorporating an increase in the contact surface between the container and the root that grows within the spatial limits of the container walls. The aim of this study was to evaluate the effect of the morphology of four types of square and round containers, with and without internal vertical walls, on plant growth, root surface, and the response to a period of drought stress in cucumber, pepper, and tomato crops.

Materials and methods

The experiment was conducted at the University of Almeria (Spain) in a multi-tunnel plastic greenhouse located at coordinates lat. 36°49'45" N, long. 2°24'16" W. The average night and day temperatures of the greenhouse were 15 to 20 °C and 20 to 35 °C, respectively. Before cultivation, the greenhouse and containers were disinfected with 3% peracetic acid, as recommended by Álvaro et al. (2009).

Plant material

Two independent experiments were performed: one on vegetative growth and analysis of the root surface per substrate volume and one on drought stress by partial decapitation and a period of fertigation suppression. The plant material was cucumber (*Cucumis sativus* L.) cv. SV0091CE, pepper (*Capsicum annuum* L.) cv. Valenciano and tomato (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Granoval. The plants were seeded in coir fibre (composed of 85% fibre and 15% dust), and perlite Agroperl® B12, and transplanting was performed to the final container treatments at the two-true-leaf stage in cucumber and the four-true-

leaf stage for pepper and tomato. The physicochemical properties of the Pelemix® coir fibre used were described by Rodríguez et al. (2014), and the properties of perlite Agroperl® B12 were described by Urrestarazu (2015) and Urrestarazu et al. (2017).

Treatments

The treatments consisted of four types of 0.5-L containers. Two shapes of commercial containers, round and square, manufactured by Pöppelmann TEKU® (Germany) were used, with the series VCG and VQB denominations, respectively, within which walls were added as conventionally assembled plastic sheets that increased the interior container surface area (Table 1, Fig. 1). The treatments were as follows: ⊙, round containers without internal vertical walls; ⊕, round section containers with internal vertical walls; ◻, square containers without internal vertical walls; and ⊞, square containers with internal vertical walls. The dimensions of the internal walls of containers ⊕ and ⊞ were 2 x 6 and 2 x 7 cm, respectively.

The total contact surface for each container morphology (At, expressed in cm²) with 350 mL of substrate and each type of container was calculated. Table 1 summarizes the calculation specifications of the total contact surface (At) between the height of the substrate in relation to the container morphology, expressed in square centimeters for each type of container.

Table 1. Types of containers used and their characteristics (See Fig. 1).

| | Types of container | Cross section | Container total volume (mL) | Substrate volume (mL) | No. of internal vertical walls | Individual area of each vertical wall with the substrate (cm ²) | Contact area between root and container (cm ²) |
|---|--------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------|--------------------------------|---|--|
| ⊙ | Truncated cone | Circular | 462 | 350 | - | - | 216 |
| ◻ | Truncated pyramid | Square | 521 | 350 | - | - | 247 |
| ⊕ | Truncated cone | Circular | 462 | 350 | 4 | 24,55 | 314 |
| ⊞ | Truncated pyramid | Square | 521 | 350 | 4 | 28,64 | 362 |

Fertigation system

A standard nutrient solution was used for EC 2,2 (dS/m) according to the ionic nutrient balance based on Sonneveld and Straver (1994). The pH was adjusted to 5,8 with the addition of diluted nitric acid. Fertigation was performed manually once 10% of the easily

available water in the substrate was exhausted and the volume necessary to obtain 20% to 30% drainage was reached, and fertigation programming was adjusted for monitoring the drainage %, pH and EC parameters according to the crop (Rodríguez et al., 2015; Urrestarazu et al., 2019).

Crop growth parameters

At 30 d post-transplant, vegetative growth parameters were measured at the 10-true-leaf stage in cucumber, the 15-true-leaf stage in pepper, and the 11-true-leaf stage in tomato. The leaf area parameters were measured (cm^2/plant , measured with image capture using an Alpha 58 digital reflex camera, Japan), similar to that described by Bignami and Rossini (1996), and processed in AutoCAD[®] (2016) (Fig. 2).

Plants were separated into leaves, stems, and roots, and the dry weight (grams/plant) was obtained using an OHAUS Adventurer[®] Analytical Precision Analytical Balance (model AX124/E), with a precision of 0,001 g. The dry weight (g/plant) of each plant part was obtained by placing the material in a forced air oven (Thermo Scientific Heratherm[®], Germany) at 75 °C until constant weight was achieved.

Root surface by volume of substrate

In all treatments, a root sample was extracted perpendicular to the container and another parallel to the internal vertical walls (in the containers that had them) using a 9,2-cm-high cylindrical punch with a radius of 0,5 cm (Fig. 1). Root samples were placed on 140-mm petri dishes (Thermo Scientific[™] Sterilin[™]) with graph paper, and the individual root count was performed manually at two depths: 0 to 4 and 4 to 8 cm. The root was determined, as was the number of roots with root thickness ≥ 0.25 mm and ≤ 1.25 mm, similar to that reported by Urrestarazu et al. (2015). The root surface (RS, expressed in cm^2/cm^3) was calculated according to the following equation (1) for each of the samples measured at different depths in both substrates and for each crop:

$$RS = (RL 2 \pi r 0.01)/V_p \quad (1)$$

where RL is the root length of each sample (mm), r is the root thickness (mm), and V_p corresponds to the cylindrical punch volume (cm^3).

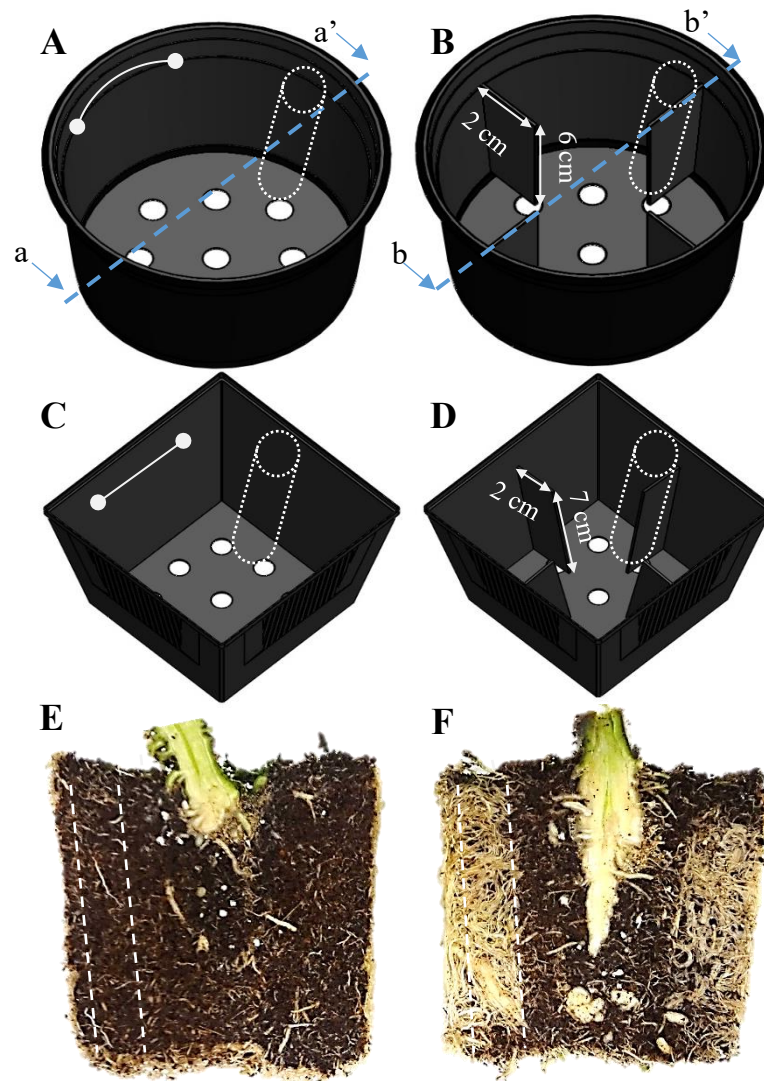


Fig. 1. (A and B) Round pot without (\odot) and with (\oplus) internal vertical walls, respectively. (C and D) The same pot but squared. (E and F) The vertical section from tomato crops in coir fiber in container A and B. a-a' y b-b' are vertical section of tomato roots by coir in pot A and B. The dotted lines represent the area or view of the cross section where root sampling is done. Continuous line indicates the filling level of the substrate in the pot (350 mL).

Drought stress test

In the second experiment, plants were decapitated at the stem at 30 d after transplant. After watering to saturation, a cut was made above the second true leaf in cucumber and the fifth true leaf in pepper and tomato (Fig. 3). The plants were maintained for 8 d under greenhouse conditions without fertigation until substrate exhaustion of 100% of the easily available water, before the permanent wilting point. After this period of drought stress,

the plants were divided into pre-existing leaves, new leaves, stems, roots, and axillary buds for measurement. Additionally, the leaf area of pre-existing leaves and new leaves $>1 \text{ cm}^2$ were measured (Fig. 2).

Statistical analysis and experimental design

For each crop and substrate, a random experimental design of four randomized complete blocks was performed (Montgomery, 2004). Each block was composed of five plants per treatment and four replicates. The results were subjected to an analysis of variance, and a separation of means was performed using a least significant difference test at $P \leq 0,05$. The mathematical treatment of the data were performed using the Statgraphics Centurion[®] XVIII (2018) and Excel from Microsoft Office (2016) software packages.

A simple linear regression was performed, with the correlation coefficient (R^2) between the total contact surface of the container (Table 1) in relation to the leaf area (cm^2/plant) and the dry weight (g/plant) of the new shoots (Fig. 4) (Gallegos-Cedillo et al., 2016).

Results and discussion

Growth parameters of different horticultural crops with respect to container type and substrate

Effect of external container shape

Container morphology did not exert any clear effect on the plant growth parameters measured for any crop or on either substrate (Table 2). In a study on tomato plants, Liptay and Edwards (1994) found that the morphology of container walls in tomato seedlings affected root growth, whereas Heller et al. (2015) found no significant differences in lettuce plants when working with different container morphologies with the same fertigation method.

Effect of walls inside a container

The presence of vertical walls inside the containers exerted a clear and significant effect on most of the growth parameters measured. The cucumber leaf area increased by $\approx 10\%$ for both substrates in containers with internal walls. For pepper and tomato, a significant increase was recorded only when using perlite (Table 2). For the root growth

parameters, this increase was similar in both substrates -20% for all crops- whereas the total biomass increased by only 10%. Liptay and Edwards (1994) found significant differences in root growth, whereas there was no clear effect on shoot growth. Rune (2003) found different results in Scots pine depending on the applied fertilization; using containers with vertical ribs promoted better root growth. Amoroso et al. (2010) found no significant differences in shoot biomass in littleleaf linden (*Tilia cordata* Mill.) and field elm (*Ulmus minor* Mill.) seedlings; however, when comparing smooth walls (in a round container) to containers with vertical ribs (in square containers), scant differences in root biomass appeared in favor of smooth walls, whereas deformed roots were significantly less common in containers with vertical ribs. The benefits of internal walls appear clear for 1) improving plants' roots (e.g., Amoroso et al., 2010; Liptay and Edwards, 1994); 2) the potential rupture of the preferential channels that are formed in the fertigation flow pattern inside a container (Urrestarazu et al., 2017); and 3) the flow pattern in a saturated or half-saturated substrate in response to fertigation movement within the substrate (De Rijck and Schrevens, 1998).

Table 2. Leaf area (cm²/plant) and biomass (g/plant) of several horticultural crops vs. container and substrate.

| | | Cucumber | | Pepper | | Tomato | |
|------------|---|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | Coir | Perlite | Coir | Perlite | Coir | Perlite |
| Leaf area | ⊙ | 1883 b | 1239 b | 797 a | 348 c | 1152 a | 905 ab |
| | ⊠ | 1757 b | 1233 b | 835 a | 375 b | 1049 a | 875 b |
| | ⊕ | 1995 a | 1334 ab | 817 a | 416 a | 1083 a | 985 a |
| | ⊞ | 2008 a | 1377 a | 835 a | 392 ab | 1095 a | 917 ab |
| Dry weight | | | | | | | |
| Leaves | ⊙ | 7,07 b | 4,55 ab | 2,94 c | 1,35 c | 2,87 a | 2,85 b |
| | ⊠ | 6,95 b | 4,33 b | 3,31 a | 1,48 c | 2,47 b | 3,09 a |
| | ⊕ | 7,62 a | 5,14 a | 3,11 bc | 1,82 a | 2,59 ab | 3,14 a |
| | ⊞ | 7,82 a | 5,20 a | 3,22 ab | 1,66 b | 2,86 a | 2,76 b |
| Stem | ⊙ | 1,92 b | 1,43 b | 1,86 b | 1,11 bc | 2,30 a | 2,35 c |
| | ⊠ | 1,89 c | 1,28 b | 1,89 b | 1,06 c | 2,02 a | 2,60 ab |
| | ⊕ | 2,12 a | 1,97 a | 2,05 a | 1,43 a | 2,14 a | 2,70 a |
| | ⊞ | 2,11 ab | 1,66 ab | 2,13 a | 1,25 b | 2,23 a | 2,38 bc |
| Root | ⊙ | 2,53 b | 1,96 c | 1,60 b | 0,66 b | 1,09 c | 0,88 c |
| | ⊠ | 2,63 b | 2,14 bc | 1,64 b | 0,76 b | 1,29 b | 0,99 bc |
| | ⊕ | 4,50 a | 2,53 ab | 1,27 c | 0,97 a | 1,59 a | 1,15 ab |
| | ⊞ | 4,49 a | 2,86 a | 1,73 a | 0,83 ab | 1,44 ab | 1,19 a |
| Total | ⊙ | 11,52 b | 7,94 b | 6,40 c | 3,13 c | 6,27 a | 6,07 c |
| | ⊠ | 11,47 b | 7,75 b | 6,83 b | 3,31 c | 5,79 a | 6,68 ab |
| | ⊕ | 14,24 a | 9,65 a | 6,43 c | 4,23 a | 6,32 a | 6,99 a |
| | ⊞ | 14,42 a | 9,72 a | 7,07 a | 3,74 b | 6,54 a | 6,32 bc |

⊙ = circular container; ⊠ = square container; ⊕ = circular container with internal vertical wall; ⊞ = square container with internal vertical walls. Different letters in a column indicate significant different at $P \leq 0,05$ according to the least significant difference test.

Root surface according to container shape and substrate

Effect of external container shape.

The average distribution data of the root surface per unit volume of substrate coincided with established knowledge of vegetable plants (cucumber) in soilless culture in rockwool (Van Noordwijk and Raats, 1980) (Table 3). Apart from some exceptions in the cultivation of pepper and tomato in favour of square containers, container morphology exerted little influence on the root surface both in the entire volume of substrate and in the surface (0-4 cm) and bottom (4-8 cm) layers. In both morphologies, deeper sampling of a container exhibited greater root growth at greater depths, a trend similar to that reported in tomato plants grown in traditional soils (Reid et al., 1996) and soilless cultivation (Urrestarazu et al., 2015). Moreover, temperature variation at soil depths can modify the root growth pattern (Kaspar and Bland, 1992).

Table 3. Root area (cm²/cm³) at different deeps of container measured on position of internal vertical walls vs. type of container and substrate.

| Centimeters from upper surface | | Cucumber | | Pepper | | Tomato | |
|--------------------------------|---|----------|---------|---------|---------|--------|---------|
| | | Coir | Perlite | Coir | Perlite | Coir | Perlite |
| 0-4 | ⊙ | 5,14 b | 4,21 b | 1,51 c | 0,57 b | 0,87 c | 1,71 a |
| | □ | 4,02 b | 4,73 b | 2,13 b | 0,51 b | 0,82 c | 1,30 b |
| | ⊕ | 6,52 a | 7,21 a | 2,09 b | 0,82 a | 1,24 b | 1,90 a |
| | ⊞ | 7,41 a | 6,77 a | 2,65 a | 0,95 a | 1,83 a | 1,60 ab |
| 4-8 | ⊙ | 7,32 b | 5,73 b | 1,96 c | 0,64 d | 0,93 b | 2,00 b |
| | □ | 6,57 b | 5,93 b | 2,19 bc | 0,85 c | 1,05 b | 1,90 b |
| | ⊕ | 9,91 a | 9,64 a | 2,33 b | 1,10 b | 1,74 a | 2,75 a |
| | ⊞ | 9,65 a | 8,69 a | 2,72 a | 1,32 a | 1,80 a | 2,95 a |
| Total | ⊙ | 12,46 b | 9,94 b | 3,47 c | 1,21 c | 1,79 c | 3,71 b |
| | □ | 10,59 b | 10,66 b | 4,32 b | 1,36 c | 1,87 c | 3,20 b |
| | ⊕ | 16,43 a | 16,85 a | 4,41 b | 1,92 b | 2,98 b | 4,65 a |
| | ⊞ | 17,06 a | 15,46 a | 5,36 a | 2,27 a | 3,63 a | 4,55 a |

⊙ = circular container; □ = square container; ⊕ = circular container with internal vertical wall; ⊞ = square container with internal vertical walls. Different letters in a column indicate significant different at $P \leq 0,05$ according to the least significant difference test.

Effect of walls inside a container.

For identical container shape, there was always an increase of root surface area regardless of both substrates and of depths and types of species (>34%) for containers with internal walls. The greater distribution of roots around the walls confirms the results described in Table 2, in which there was a higher root biomass in containers that had interior vertical walls. However, identifying root system architecture is of vital importance to ensuring productive success (Mansoorkhani et al., 2014) because it enables

more efficient and effective fertigation, given the existence of humidification bulb distribution patterns in different fertigation conditions and substrate types (Urrestarazu, 2015; Urrestarazu et al., 2017).

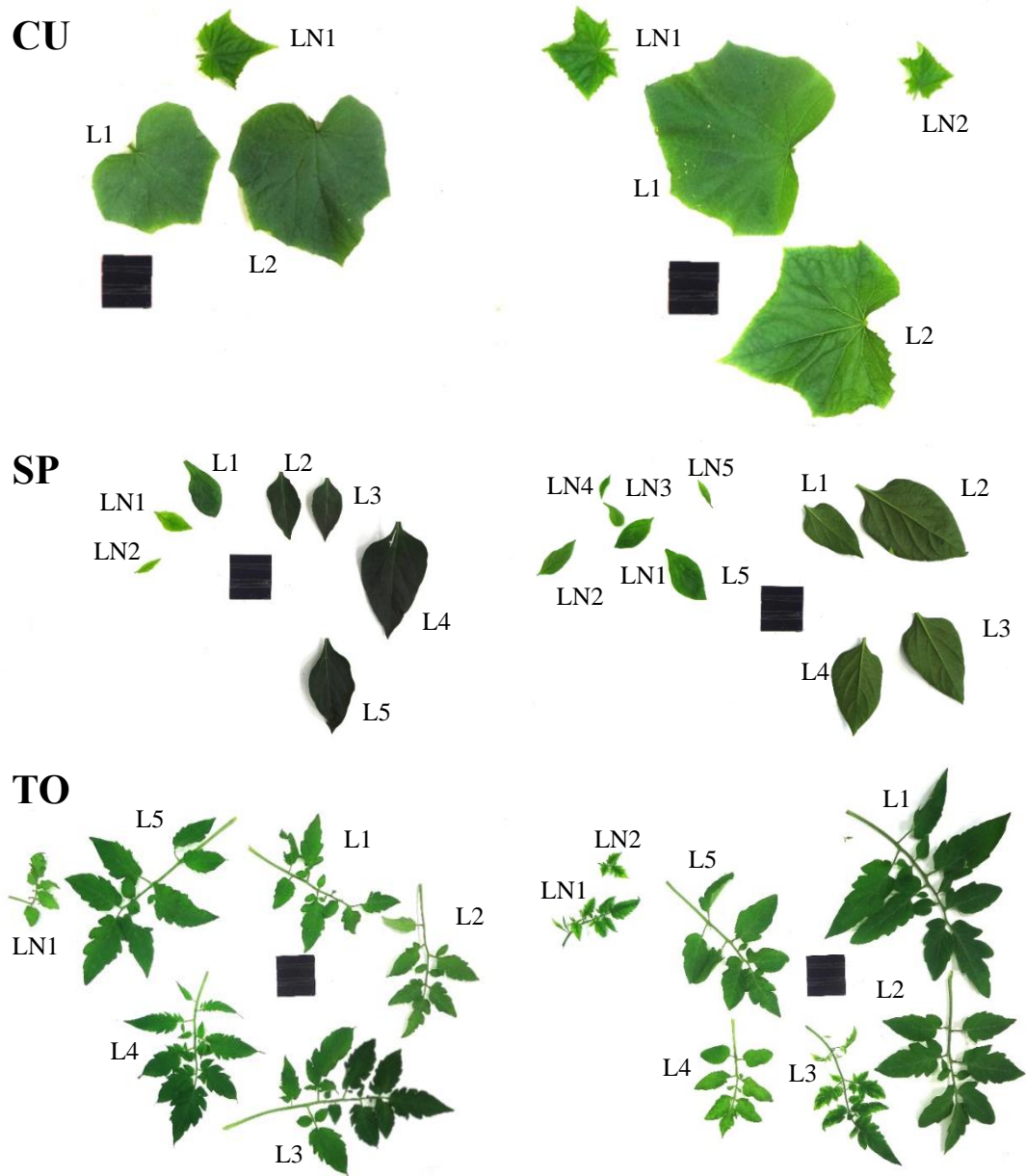


Fig. 2. Leaf area of cucumber (CU), pepper (SP), and tomato (TO) without (**left**) and with internal vertical walls (**right**) measured after 8 d under water stress. L1, L2, L3, L4, and L5, are the first, second, third, fourth, and fifth true leaf, respectively. LN1, LN2, LN3, LN4, and LN5 are the new leaves. Square black is the reference of 25 cm².

Growth parameters after a period of drought stress

Effect of container morphology

Table 4 presents the results of the biomass data from the drought stress experiment. The same trends that were shown in Table 2 for the vegetative growth values of entire plants are presented. The root growth parameters were similar in both substrates; this trend may be a consequence of using the same volume of substrate and the previous fertigation adjustment to the characteristics of the substrate reported previously, for example, in García et al. (1997), Mascarini et al. (2012) for mineral substrates or Verlodt and Kamoun (1981) in organic substrates.

Table 4. Leaf area (cm²/plant) and biomass (g/plant) of several horticultural crops vs. container and substrate after partial decapitation and water stress.

| | | Cucumber | | Pepper | | Tomato | |
|----------------------|---|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | | Coir | Perlite | Coir | Perlite | Coir | Perlite |
| Area old leaves | ⊙ | 180,47 b | 208,20 a | 205,49 b | 148,52 c | 399,19 ab | 327,42 a |
| | □ | 166,22 c | 168,39 b | 228,52 a | 167,67 ab | 386,92 b | 328,61 a |
| | ⊕ | 211,32 a | 212,97 a | 221,29 ab | 161,83 bc | 409,25 ab | 355,01 a |
| | ⊞ | 202,87 a | 204,08 a | 233,60 a | 178,23 a | 423,82 a | 351,86 a |
| Area new leaves | ⊙ | 11,72 c | 10,32 c | 6,72 d | 4,01 d | 7,97 c | 5,06 b |
| | □ | 9,71 c | 7,50 c | 8,46 c | 5,68 c | 7,40 c | 6,08 b |
| | ⊕ | 35,13 a | 32,34 a | 14,20 b | 8,65 b | 27,34 b | 15,26 a |
| | ⊞ | 20,40 b | 18,98 b | 21,80 a | 12,92 a | 41,08 a | 14,42 a |
| Dry weight Leaves | ⊙ | 1,30 b | 1,48 a | 0,88 b | 0,71 c | 1,31 a | 1,14 b |
| | □ | 1,19 b | 0,95 c | 0,97 ab | 0,79 b | 1,35 a | 1,21 ab |
| | ⊕ | 1,67 a | 1,66 a | 0,99 ab | 0,84 ab | 1,38 a | 1,29 a |
| | ⊞ | 1,51 a | 1,25 b | 1,13 a | 0,88 a | 1,38 a | 1,35 a |
| Stem | ⊙ | 1,88 a | 0,80 ab | 1,40 a | 1,35 b | 1,09 ab | 1,03 a |
| | □ | 0,89 c | 0,75 b | 1,58 a | 1,49 ab | 1,08 b | 1,00 a |
| | ⊕ | 1,95 a | 0,85 a | 1,61 a | 1,46 ab | 1,17 ab | 1,01 a |
| | ⊞ | 1,20 b | 0,84 a | 1,73 a | 1,65 a | 1,22 a | 1,27 a |
| Root | ⊙ | 3,78 b | 3,20 bc | 2,04 b | 1,81 b | 1,05 b | 1,17 c |
| | □ | 3,41 b | 2,98 c | 1,99 b | 1,79 b | 1,14 b | 1,16 c |
| | ⊕ | 5,75 a | 4,43 a | 2,83 a | 2,20 a | 1,42 a | 1,33 b |
| | ⊞ | 5,21 a | 3,98 b | 2,55 ab | 2,44 a | 1,48 a | 1,48 a |
| New shoots | ⊙ | 0,51 c | 0,41 b | 0,04 b | 0,03 b | 0,02 c | 0,01 b |
| | □ | 1,09 b | 0,49 b | 0,04 b | 0,03 b | 0,05 b | 0,02 b |
| | ⊕ | 1,22 b | 1,04 a | 0,09 a | 0,09 a | 0,06 b | 0,04 a |
| | ⊞ | 1,53 a | 0,86 a | 0,10 a | 0,06 a | 0,12 a | 0,06 a |
| Total | ⊙ | 7,48 bc | 5,89 c | 4,36 b | 3,89 c | 3,48 c | 3,35 b |
| | □ | 6,59 c | 5,17 d | 4,58 b | 4,10 bc | 3,61 bc | 3,39 b |
| | ⊕ | 10,59 a | 7,97 a | 5,52 a | 4,58 ab | 4,03 ab | 3,67 b |
| | ⊞ | 9,45 ab | 6,94 b | 5,50 a | 5,02 a | 4,19 a | 4,17 a |

⊙ = circular container; □ = square container; ⊕ = circular container with internal vertical wall; ⊞ = square container with internal vertical walls. Different letters in a column indicate significant different at $P \leq 0,05$ according to the least significant difference test.

Effect of walls inside a container

Before the decapitation of the three cultivars and substrates, the trend was very similar to that described in Table 2 for entire plants. The roots that grew in containers with walls had greater biomass: cucumber and pepper increased by 50% on average compared with the control, and tomato increased by 15% in both substrates.

The leaf area of new leaves and the dry weights of shoots after decapitation and drought stress doubled in value in containers with inner walls. This significant increase was very similar in the three cultivars and in the two substrates. Amoroso et al. (2010) found that the shoot biomass was unaffected by the type of container at the end of the first stage of growth, nor was the root biomass at the end of the second year; however, they suggest that the container typology with vertical ribs has a strong influence on the conformation and quality of a plant's root system.

With the exception of the leaf area of the new leaves in cucumber, clear correlations were recorded between the total contact surface of the container and the foliar area of the new leaves and the dry weight of the shoots after the decapitation and drought stress treatments (Fig. 4). Although a clear correlation of these parameters in cucumber with the contact surface, between the container and roots, was not observed, the leaf area was greater in the two treatments with internal walls compared with containers without internal walls.

In summary, a significant mean increases in biomass ($\approx 20\%$) (Table 2) and root surface ($\approx 30\%$ to 35%) (Table 3) doubled or tripled the growth parameters of a shoot when subjected to drought stress (Table 4, Fig. 3), which is confirmed by the clear association of the variables analysed with the simple linear regression models described in both substrates (Fig. 4).

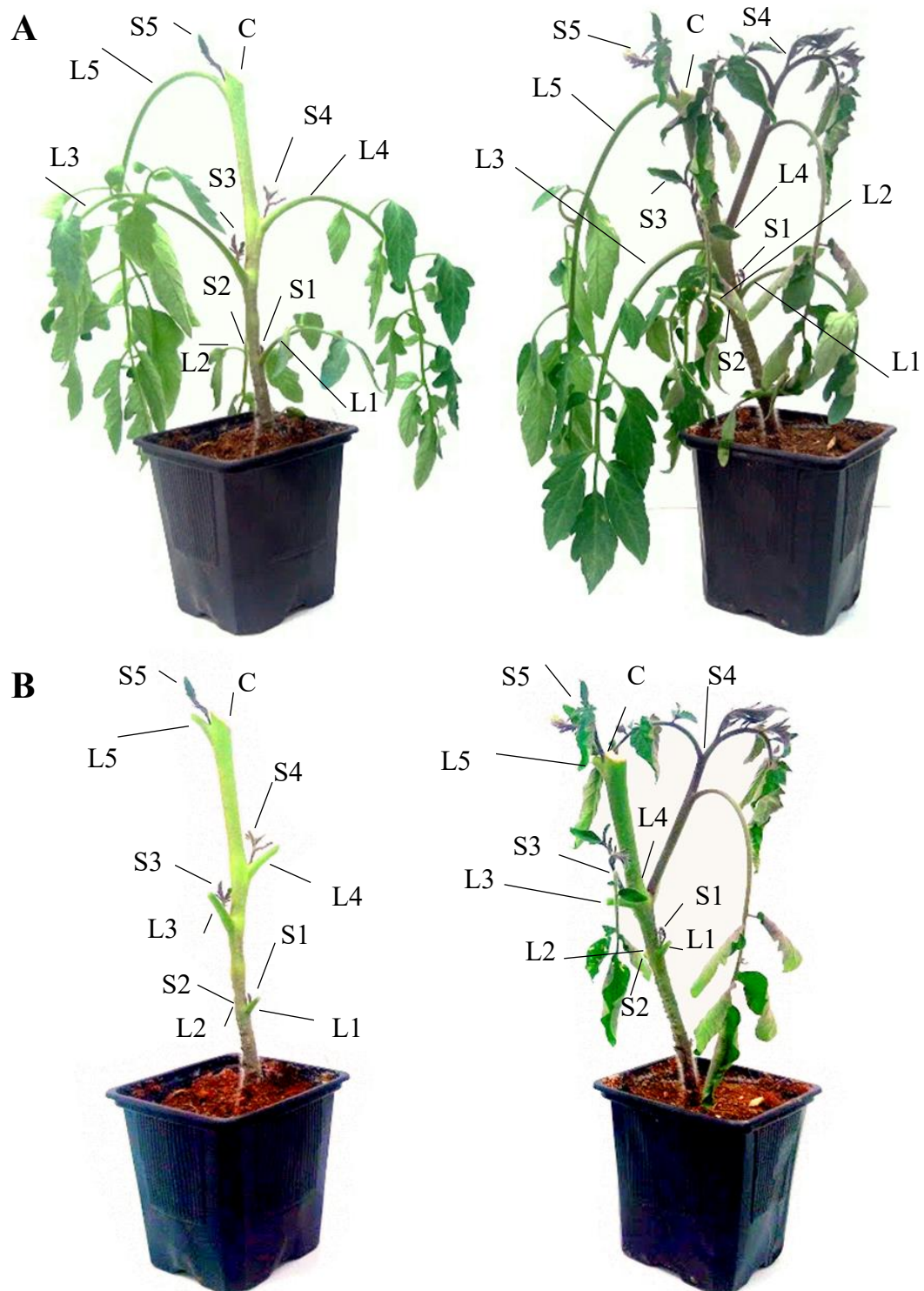


Fig. 3. (A) Tomato plants without (**left**) and with (**right**) vertical internal walls in the container after decapitation in the stem (point C) and a water stress period of 8 d. (B) The same plants of A after the cutting of the pre-existing true leaves. L1, L2, L3, L4, and L5, are the first, second, third, fourth, and fifth true leaf, respectively. S1, S2, S3, S4, and S5 are the axillary leaf buds of the first, second, third, fourth, and fifth true leaves, respectively.

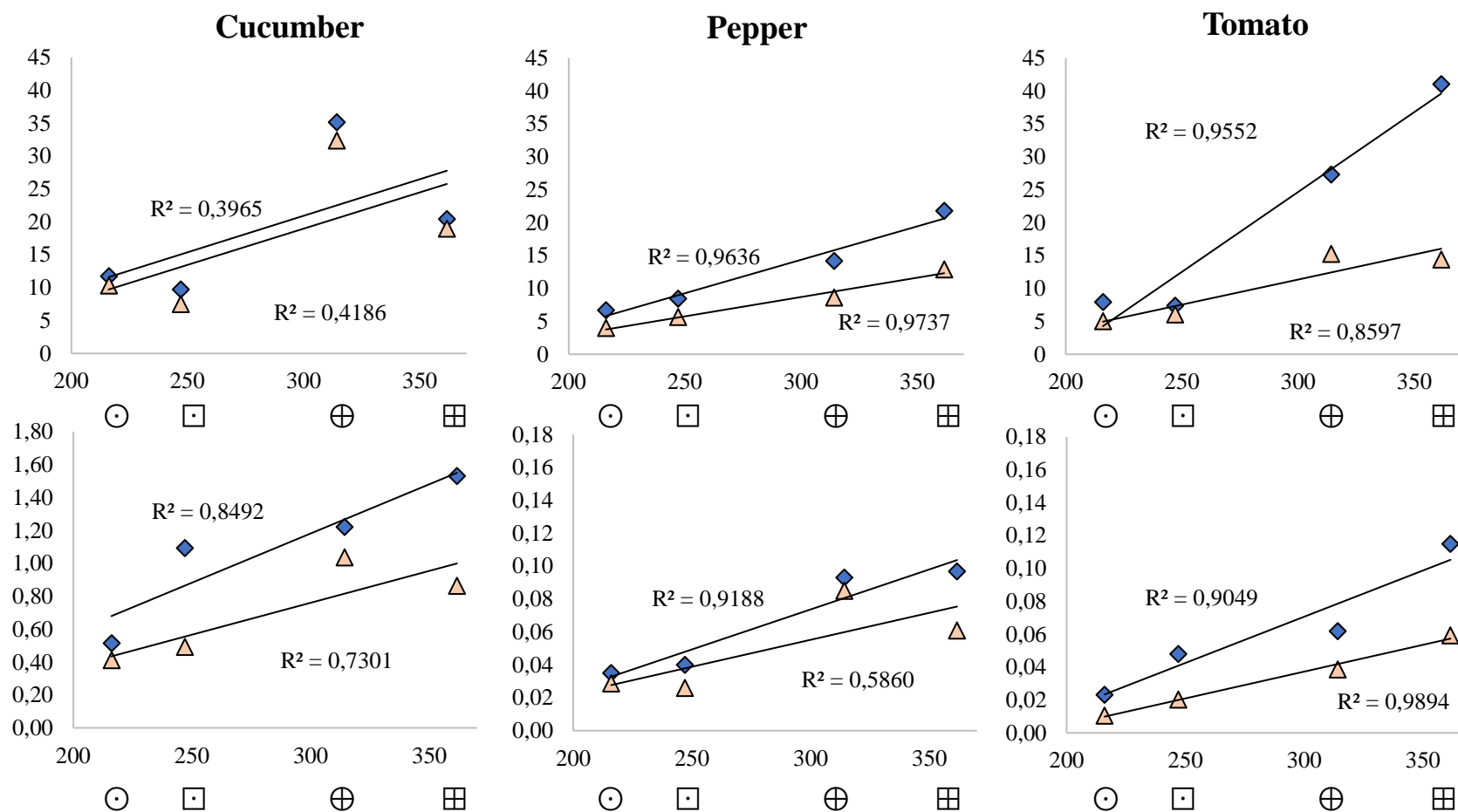


Fig. 4. Linear correlation between the contact surface in the container (cm²) and the leaf surface (cm²/plant, upper row) and the dry weight (g/plant, lower row) of the new shoots after decapitation and suppression of the fertigation. The diamonds and triangles indicate the containers with coir fiber and perlite, respectively. ⊙ = circular section containers without internal walls; ⊕ = circular section containers with internal walls; □ = square section containers without internal walls; and ⊞ = square section containers with internal walls.

Conclusions

Walls inside containers not only reinforce a container or pot from a mechanical perspective but also deter root spiralling. In addition to decreasing root deformation (Amoroso et al., 2010; Rune, 2003), which potentially affects the anchoring of roots after transplant (Nichols and Alm, 1983) and reduces sprout growth (Ortega et al., 2006), inner walls also favor the production of biomass in horticultural plants and substantially increase total root weight, which increases a plant's ability to cope with drought stress and therefore overcome potential post-transplant stress in both substrates.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the support of the Mexican National Council for Science and Technology (CONACYT) for its financial support of this work.

Literature cited

- Álvaro, J.E., S. Moreno, F. Diáñez, M. Santos, G. Carrasco, and M. Urrestarazu. 2009. Effects of peracetic acid disinfectant on the postharvest of some fresh vegetables. *J. Food Eng.* 95:11-15.
- Amoroso, G., P. Frangi, R. Piatti, F. Ferrini, A. Fini, and M. Faoro. 2010. Effect of container design on plant growth and root deformation of littleleaf linden and field elm. *HortScience* 45:1824-1829.
- Ansorena, M.J. 1994. *Substrates: properties and characterization*. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
- Aphalo, P. and R. Rikala. 2003. Field performance of silver-birch planting-stock grown at different spacing and in containers of different volume. *New For.* 25:93-108.
- Araki, H. and M. Iijima. 2001. Deep rooting in winter wheat: rooting nodes of deep roots in two cultivars with deep and shallow root systems. *Plant Prod. Sci.* 4:215-219.
- Armitage, A.M. and P.M. Gross. 1996. Copper-treated plug flats influence root growth and flowering of bedding plants. *HortScience* 31:941-943.
- Atwell, B.J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33:27-40.

- Bignami, C. and F. Rossini. 1996. Image analysis estimation of leaf area index and plant size of young hazelnut plants. *J. Hort. Sci.* 71:113-121.
- Bilderback, T.E. and W.C. Fonteno. 1987. Effects of container geometry and media physical properties on air and water volumes in containers. *J. Environ. Hort.* 5:180-182.
- Biran, I. and A. Eliassaf. 1980. The effect of container shape on the development of roots and canopy of woody plants. *Scientia Hort.* 12:183-193.
- Bokmiller, D., M. Moon, R. Gumpf, S. Mullins, M. Blomerley, and S. Pavelka. 2000. Nest and stack plant pot. U.S. Patent No. 6,134,832. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-11.
- Brass, T.J., G.J. Keever, D.J. Eakes, and C.H. Gilliam. 1996. Styrene-lined and copper-coated containers affect production and landscape establishment of red maple. *HortScience* 3:353-356.
- Chirino, E., A. Vilagrosa, E.I. Hernández, A. Matos, and V.R. Vallejo. 2008. Effects of a deep container on morpho-functional characteristics and root colonization in *Quercus suber* L. seedlings for reforestation in Mediterranean climate. *For. Ecol. Mgt.* 256:779-785.
- Cooley, J.N. 2011. Plant container. U.S. Patent No. 7,954,277 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- De Rijck, G. and E. Schrevens. 1998. Distribution of nutrients and water in rockwool slabs. *Scientia Hort.* 72:277-285.
- Dixon, G.R. 2019. Horticultural science-a century of discovery and application. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 94:550-572.
- Domínguez-Lerena, S., N.H. Sierra, I.C. Manzano, L.O. Bueno, J.P. Rubira, and J.P. Mexal. 2006. Container characteristics influence *Pinus pinea* seedling development in the nursery and field. *For. Ecol. Mgt.* 221:63-71.
- Ferrand, M. 1971. Plant container. U.S. Patent No. 3,557,489. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.

- Gallegos-Cedillo, J., R. Arteaga-Ramírez, M.A. Vázquez-Peña, and J. Juárez-Méndez. 2016. Estimation of missing daily precipitation and maximum and minimum temperature records in San Luis Potosí. *Ing. Agri. Biosist.* 8:3-16.
- García, M., M. Guzmán, M. Urrestarazu, M. Salas, and I. Escobar. 1997. Evaluation of different parameters in perlite substrate by some vegetables in crop protection. *Acta Hort.* 18:519-525.
- Gilman, E.F., J. Grabosky, A. Stodola, and M.D. Marshall. 2003. Irrigation and container type impact red maple (*Acer rubrum* L.) 5 years after landscape planting. *Arboric. J.* 29:231-236.
- Guggenheim, T.L. and R.R. Odle. 2016. Methods to grow, deliver, and plant young trees in a removable tubular container. U.S. Patent No. 9,414,547 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-20.
- Heller, H., A. Bar-Tal, S. Assouline, K. Narkis, S. Suryano, A. de la Forge, M. Barak, H. Alon, M. Bruner, S. Cohen, and D. Tsohar. 2015. The effects of container geometry on water and heat regimes in soilless culture: lettuce as a case study. *Irrig. Sci.* 33:53-65.
- Insalaco, C.J. 1975. Nursery pot having improved drainage. U.S. Patent No. 3,896,587. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Kaspar, T.C. and W.L. Bland. 1992. Soil temperature and root growth. *Soil Sci.* 154:290-299.
- Keever, G.J. and G.S. Cobb. 1987. Effects of container volume and fertility rate on growth of two woody ornamentals. *HortScience* 22:891-895.
- Kreizel, J. 2002. Planter and method of manufacturing same. U.S. Patent No. 6,360,484 B1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Landis, T.D., T. Luna, and R.K. Dumroese. 2014. Containers, p. 123-140. In: K.M. Wilkinson, T.D. Landis, D.L. Haase, B.F. Daley, and R.K. Dumroese (eds.). *Tropical Nursery Manual: A guide to starting and operating a nursery for native and traditional plants.* Agriculture Handbook 732. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.

- Landis, T.D. 1990. Containers and growing media, p. 41-85. In: T.D. Landis, R.W. Tinus, S.E. McDonald, and J.P. Barnett (eds.). The container tree nursery manual, vol. 2. Agricultural Handbook 674. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC.
- Lemaire, F. and J.L. Papin. 1989. Influence of the physical characteristics of substrate on the root systems of ornamental plants grown in pots and containers. *Agronomie* 9:795-801.
- Lemaire, F., A. Dartigues, L.M. Rivière, S. Charpentier, and P. Morel. 2005. Cultivation in pots and containers. Agronomic principles and applications. 2nd ed. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
- Liptay, A. and D. Edwards. 1994. Tomato seedling growth in response to variation in root container shape. *HortScience* 29:633-635.
- Lüken, R. and A. Sieverding. 2009. Flower pot. U.S. Patent No. 7,610,717 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Mansoorkhani, F., G.B. Seymour, R. Swarup, H.M. Moeiniyan-Bagheri, R.J.L. Ramsey, and A.J. Thompson. 2014. Environmental, developmental, and genetic factors controlling root system architecture. *Biotechnol. Genet. Eng.* 30:95-112.
- Mascarini, L., G. Lorenzo, H. Svartz, S. Pesenti, and S. Amado. 2012. Container size and growing media affects water use efficiency in a *Gerbera jamesonii* cut flower crop. *Rev. Bras. Hort. Ornam.* 18:71-77.
- Montgomery, D.C. 2004. Design and analysis of experiments. 2nd ed. John Wiley & Sons, Phoenix, AZ, USA.
- Neddo, K.S., G.M. Alder, and J.L. Gwilliam. 1977. Seedling plant propagation container. U.S. Patent No. 4,006,558. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Nichols, T.J. and A.A. Alm. 1983. Root development of container-reared, nursery-grown, and naturally regenerated pine seedlings. *Can. J. For. Res.* 13:239-245.
- Nilsson, T. and U. Fransson. 2017. Plugtrainer. U.S. Patent No. 9,795,090 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.

- Ortega, U., J. Majada, A. Mena-Petite, J. Sánchez-Zabala, N. Rodríguez-Iturrizar, K. Txarterina, J. Azpitarte, and M. Duñabeitia. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New For.* 31:97-112.
- Park, G.B. 1966. Plant shipping container. U.S. Patent No. 3,284,949. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Pemán, J., J. Voltas, and E. Gil-Pelegrin. 2006. Morphological and functional variability in the root system of *Quercus ilex* L. subject to confinement: consequences for afforestation. *Ann. For. Sci.* 63:425-430.
- Quan, T.Z., J.H. Wu, and X. Wang. 2011. Nursery container. U.S. Patent No. 0,232,187 A1. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-13.
- Reid, J., D. Winfield, I. Sorensen, and A. Kale. 1996. Water deficit, root demography, and the causes of internal blackening in field-grown tomatoes: (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Ann. Appl. Biol.* 129:137-149.
- Rodríguez, D., J. Reça, J. Martínez, M.T. Lao, and M. Urrestarazu. 2014. Effect of controlling the leaching fraction on the fertigation and production of a tomato crop under soilless culture. *Scientia Hort.* 179:153-157.
- Rodríguez, D., J. Reça, J. Martínez, R. López-Luque, and M. Urrestarazu. 2015. Development of a new control algorithm for automatic irrigation scheduling in soilless culture. *Appl. Math. Inf. Sci.* 9:47-56.
- Rune, G. 2003. Slits in container wall improve root structure and stem straightness of outplanted Scots pine seedlings. *Silva Fenn.* 37:333-342.
- Sánchez-Aguilar, H., A. Aldrete, J. Vargas-Hernández, and V. Ordaz-Chaparro. 2016. Influence of container type and color on seedling growth of pine in nursery. *Agrociencia* 50:481-492.
- Schmidt, G. 2009. Plastic plant pot. U.S. Patent No. 7,624,535 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-08.
- Schromm, F. 2009. Container with plant identification tag slot. U.S. Patent No. 7,624,536 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-10.
- Salter, P.J. 1961. The irrigation of early summer cauliflower in relation to stage of growth, plant spacing and nitrogen level. *J. Hort. Sci. Biotechnol.* 36:241-263.

- Sieverding, L.A. 2007. Plant pot made from deep-drawn plastic. U.S. Patent No. 7,204,056 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-09.
- Skinner, R.B. 2002. Container and tag assembly. U.S. Patent No. 6,463,696 B2. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-15.
- Sonneveld, C. and N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flower grown in water or substrates, p. 1-45. 10th Proefstation voor Tuinbouw Onder Glas te Naaldwijk, Naaldwijk.
- South, D.B., S.W. Harris, J.P. Barnett, M.J. Hains, and D.H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, USA. *For. Ecol. Mgt.* 204:385-398.
- Spencer, H.A. 1972. Planting from the book. *For. Chron.* 48:240-241.
- Spencer, H.A. 1977. Container for seedlings. U.S. Patent No. 4,057,932. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-16.
- Spencer, H.A. 1991. Book-Type container for raising seedlings. U.S. Patent No. 4,998,378. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-05.
- Staby, G.L. 1979. Container with raised indentations for aeration and drainage. U.S. Patent No. 4,173,097. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-06.
- Stockdale, W.D. 1961. Plastic flower pot. U.S. Patent No. 3,009,603. U.S. Patent and Trademark Office, Washington, DC: 01-03.
- Trinidad, O.S., H.J. Vargas, A. Aldrete, U.J. López, and G.A.M. Fierros. 2015. Substrate and container size over the development of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. at the nursery. *Rev. Mex. Cienc. For.* 6:94-113.
- Urrestarazu, M. 2015. Manual práctico del cultivo sin suelo e hidroponía, p. 1-267. Mundi-Prensa, Madrid, Spain.
- Urrestarazu, M., V. Gallegos, and J.E. Álvaro. 2017. The use of thermography images in the description of the humidification bulb in soilless culture. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 48:1595-1602.
- Urrestarazu, M., V.M. Gallegos-Cedillo, F. Ferrón-Carrillo, J.L. Guil-Guerrero, M.T. Lao, and J.E. Álvaro. 2019. Effects of the electrical conductivity of a soilless culture system on gamma linolenic acid levels in borage seed oil. *PLoS One* 14:e0207106.

- Urrestarazu, M., I. Morales, T. La Malfa, R. Checa, A.F. Wamser, and J.E. Álvaro. 2015. Effects of fertigation duration on the pollution, water consumption, and productivity of soilless vegetable cultures. *HortScience* 50:819-825.
- Urrestarazu, M., M. Salas, D. Valera, A. Gómez, and P.C. Mazuela. 2008. Effects of heating nutrient solution on water and mineral uptake and early yield of two cucurbits under soilless culture. *J. Plant Nutr.* 31:527-538.
- Van Noordwijk, M. and P.A.C. Raats. 1980. Drip and drainage systems for rockwool cultures in relation to accumulation and leaching of salts. *Proc. 5th Intl. Congr. Soilless Cult.* 279-287.
- Verlodt, H. and S. Kamoun. 1981. Influence of the volume of the growth bags and the addition of well-made manure to a compost of the seagrass *Posidonia oceanica* L. Del. on the behavior of tomato crop under plastic greenhouse. *Acta Hort.* 126:263-272.
- Yano, T., A. Morisaki, S. Ito, and M. Kitano. 2018. A generalized linear model to predict the growth of potted seedlings of Satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marcow.) under different initial plant conditions, environmental conditions, and pot size. *Hort. J.* 87:490-498.

GENERAL CONCLUSION



General conclusion

Chapter 1

Walls inside containers not only reinforce a container or pot from a mechanical perspective but also deter root spiralling. In addition to decreasing root deformation (Amoroso et al., 2010; Rune, 2003), which potentially affects the anchoring of roots after transplant (Nichols and Alm, 1983) and reduces sprout growth (Ortega et al., 2006), inner walls also favor the production of biomass in horticultural plants and substantially increase total root weight, which increases a plant's ability to cope with drought stress and therefore overcome potential post-transplant stress in both substrates.

Chapter 2

The modification of the container morphology with the addition of vertical walls inside the container positively influences horticultural plants. The vertical walls inside the container 1) increase the absorption of water and nutrients, 2) decrease the emission of nitrates into the environment, 3) significantly increase the volume and total weight of root growth, the production of biomass, fruit, and the production yield in each crop; 4) improve plant quality, more balanced between the surface of the stem and the root apparatus with the Dickson Quality Index that encompasses the combination of different indices; and 5) increase the efficiency in the use of nutrients and water.

Chapter 3

The containers' design and construction structurally improve the existing models on the market by increasing productivity and respecting the technical characteristics related to their storage and transport. Furthermore, the design can be reproduced and used in different configurations for growing and producing quality plants in various fields of study.

General conclusion

Structural modifications to the interior of a container can significantly improve the agronomic performance of the production of horticultural plants. These benefits are recorded both in terms of production, quality, and quantity and improved inputs and environmental friendliness. From an economic point of view, it is feasible to opt for containers with inner walls, as these make the most of the economic investment by increasing the production efficiency of horticultural crops and, at the same time, increasing economic benefits. In this sense, the design and construction of the culture container is novel, with technical and industrial applications in various fields of study. Therefore, the container design analysed in this work is submitted for intellectual protection in the form of a utility model and patent.

En las últimas décadas, la sostenibilidad ambiental y el uso eficiente de los recursos se han convertido en los pilares fundamentales de la visión científica moderna, cuyo eje a priori es el progreso tecnológico. En este contexto, el cultivo sin suelo ha impulsado la integración de múltiples avances tecnológicos, que se han convertido en la base para mejorar la eficiencia del uso del agua y nutrientes y disminuir la contaminación por iones nutritivos. Por su parte, el diseño de contenedores ha potenciado las ventajas del cultivo sin suelo, permitiendo obtener plantas de alta calidad, mayor potencial productivo, mejor calidad de frutas, balance hídrico en el medio de cultivo y minimizar problemas radicales de las plantas.

El objetivo general de este trabajo fue contribuir con nuevas herramientas técnicas a través del diseño de contenedores que favorezcan el uso eficiente de los recursos, la disminución contaminante de iones nutritivos, el correcto equilibrio de humedad en la relación sustrato-contenedor donde se desarrollen las raíces, y al mismo tiempo, potenciar un incremento en la distribución radical, en la calidad de planta en las etapas vegetativa y productiva, y en el rendimiento final de diversos cultivos hortícolas cultivados en sistema de cultivo sin suelo.

Para lograr el objetivo general, se plantearon tres objetivos específicos: 1) Evaluar el efecto de la morfología de cuatro tipos de contenedores cuadrados y circulares, con y sin pared vertical interna, sobre el crecimiento vegetal, la superficie radicular y la respuesta a un período de estrés por sequía en los cultivos de pepino, pimiento y tomate. Los resultados demostraron que el contenedor con paredes verticales internas favorece un incremento significativo promedio de la biomasa ($\approx 20\%$) y de la superficie de absorción de las raíces ($\approx 30-35\%$). También, duplicó o triplicó los parámetros de crecimiento de los brotes al ser sometidos a un estrés por sequía, lo que se confirma por la clara asociación de las variables analizadas con los modelos de regresión lineal simple, descrito en ambos sustratos (fibra de coco y perlita). 2) Evaluar el efecto de dos tipos de contenedores circulares con y sin paredes verticales internas sobre los parámetros de fertirrigación, absorción de agua y nutrientes, emisión de iones nutritivos, crecimiento y desarrollo vegetal, arquitectura radical, parámetros de calidad del fruto, productividad del agua y eficiencia productiva de plantas hortícolas de tomate, pimiento, pepino y melón cultivadas en sistema de cultivo sin suelo. En los cuatro cultivos estudiados, la tasa de absorción de agua (10%), el número de frutos de la categoría comercial y total (16%) y la productividad del agua (comercial (17%) y total (20%)) de los contenedores con tabiques verticales en el interior registraron un incremento significativo promedio en comparación con los contenedores del tratamiento control. 3) Diseñar y construir un contenedor de cultivo tipo que reúna la totalidad de las funciones y exigencias que incluyen otros sistemas de forma aislada y que debe reunir un contenedor de cultivo. Los documentos de patente analizados no anticipan por sí solo todas y cada una de las características desarrolladas en el contenedor de cultivo diseñado.

Como conclusión general de este trabajo de investigación se puede decir que, las modificaciones estructurales del interior de un contenedor pueden proporcionar una significativa mejora en el comportamiento agronómico en la producción de plantas hortícolas. Estos beneficios se registran tanto en la producción, en calidad y en cantidad, como en la mejora de los insumos y el respeto por el medio ambiente. Desde el punto de vista económico, es factible optar por los contenedores con paredes interiores, ya que favorecen un mayor aprovechamiento de la inversión económica al incrementar la eficiencia productiva de los cultivos hortícolas y al mismo tiempo los beneficios económicos. En este sentido, el contenedor de cultivo diseñado y construido es novedoso, con aplicación técnica e industrial en diversidad de campos de estudio. Por tanto, el diseño del contenedor es presentado a protección intelectual en modelo de utilidad y patente.