



## ẢNH HƯỞNG CỦA THỦY CANH ĐẾN CÁC ĐẶC ĐIỂM CẤU TRÚC HỆ RỄ Ở CÁC GIỐNG CÂY HỌ CÀ SO VỚI TRỒNG TRONG ĐẤT

Bùi Hồng Hải

Khoa Sinh - Kỹ thuật Nông nghiệp, Trường Đại học Quy Nhơn

### Thông tin chung:

Ngày nhận: 05/08/2016

Ngày chấp nhận: 26/10/2016

### Title:

Effect of hydroponic culture to root system architecture traits in various genotypes of the solanaceae family versus in soil cultivation

### Từ khóa:

*Capsicum*, phân nhánh của rễ, sinh trưởng của rễ, *Solanum*, thủy canh

### Keywords:

*Capsicum*, hydroponic culture, root branching, root growth, *Solanum*

### ABSTRACT

A comparative study of the root system structure characteristics of Solanaceae based on 31 genotypes from 3 important groups (aubergines, capsicums and tomatoes) in hydroponic culture versus in soil cultivation conditions. Quantitative traits were mainly obtained from measurements on high resolution images of different plant parts at several growth stages. Hydroponic culture helped to observe exactly the dynamic traits of roots, such as daily root growth rate and branching time of primordia. Results showed a decrease in root apex diameter, an increase in root growth rate, and a stable root branching density in hydroponic culture versus in soil cultivation. These results demonstrated the effects of changes in growing conditions on root system structure of the Solanaceae family.

### TÓM TẮT

Một nghiên cứu phân tích so sánh các đặc điểm cấu trúc hệ rễ trên 31 giống thuộc 3 nhóm quan trọng (cà tím, ớt và cà chua) của họ Cà trồng thủy canh so với trồng trong đất. Những đặc điểm định lượng thu được chủ yếu từ việc đo đạc trên hình ảnh có độ phân giải cao của các bộ phận khác nhau của cây. Thủy canh đã giúp quan sát một cách chính xác các đặc điểm linh động của rễ như: tốc độ sinh trưởng hàng ngày và thời gian hình thành rễ nhánh của mầm rễ. Phân tích chỉ ra rằng: đường kính đỉnh rễ giảm, tốc độ sinh trưởng rễ tăng nhưng mật độ rễ nhánh lại ổn định trong thủy canh so với trong đất. Những kết quả nghiên cứu này chỉ ra ảnh hưởng của việc thay đổi điều kiện trồng trọt đến cấu trúc hệ rễ.

Trích dẫn: Bùi Hồng Hải, 2016. Ảnh hưởng của thủy canh đến các đặc điểm cấu trúc hệ rễ ở các giống cây họ cà so với trồng trong đất. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ. Số chuyên đề: Nông nghiệp (Tập 3): 1-10.

## 1 ĐẶT VẤN ĐỀ

Kỹ thuật thủy canh xuất hiện vào khoảng năm 1860 (Hoagland and Arnon, 1950), và được áp dụng thành công vào cây vườn (Urrestarazu, 2004; Rodriguez-Delfin, 2012). Ở quy mô công nghiệp, thủy canh dùng sản xuất nhiều loài cây rau ăn quả, cây rau, cây cảnh thậm chí cả cây giống (Raviv and Lieth, 2008). Thủy canh còn được sử dụng để làm sạch một số nguồn nước đã qua sử dụng (Ignatius

et al., 2014) và dùng trong nghiên cứu sinh học thực vật (Rubio et al., 2010; Mathieu et al., 2015).

Các hệ thống thủy canh có thể là hệ thống mở (không tái sử dụng dung dịch dinh dưỡng) hoặc hệ thống hoàn lưu khép kín (có sự tái sử dụng dung dịch dinh dưỡng). Hệ thống thủy canh mở có nhiều ưu thế hơn khi so sánh với hệ thống thủy canh đóng, như quản lý đơn giản (Pardossi et al., 2006; Massa et al., 2011), sản lượng cao (tính trên diện tích sử dụng) (Sanchez-Del-Castillo et al., 2014),

nhưng lại tiêu tốn nhiều nước. Hệ thống thủy canh hoàn lưu khép kín giảm lượng nước tiêu thụ, hạn chế rửa trôi các chất khoáng (Pardossi *et al.*, 2006; Sanchez-Del Castillo *et al.*, 2014), tăng hiệu quả sử dụng phân bón (Ahmed *et al.*, 2000), nhưng thường phát tán bệnh trên rễ và việc quản lý độ mặn là vô cùng khó khăn (Stanghellini *et al.*, 2007).

Nhiệm vụ của rễ cây là hấp thụ nước và muối khoáng, vì vậy các đặc điểm và thành phần của môi trường ảnh hưởng trực tiếp đến hệ rễ và toàn bộ cây (Lynch, 1995). Hàm lượng đạm (N), lân (P) và lưu huỳnh (S) ảnh hưởng rất lớn đến sự sinh trưởng, hình thành rễ nhánh (Drew, 1975; López-Bucio *et al.*, 2003). Hàm lượng nước trong đất có mối tương quan thuận với tốc độ kéo dài của rễ nhỏ ( $\phi < 2$  mm, ở *Eucalyptus*) (Thongo M'bou *et al.*, 2008), thiếu nước sẽ làm giảm số lượng rễ nhánh (Van der Weele *et al.*, 2000). Tăng khả năng kháng đâm xuyên (soil penetration resistance) và mật độ của đất (soil bulk density) sẽ làm giảm chiều dài rễ (Dexter, 1987; Misra and Gibbons, 1996; Tracy *et al.*, 2012), hay giảm tốc độ kéo dài của rễ (Bengough and Young, 1993; Bécel *et al.*, 2012), nhưng lại làm tăng đường kính rễ (Materchera *et al.*, 1992; Tracy *et al.*, 2012) và số lượng rễ nhánh (Misra and Gibbons, 1996).

Họ Cà (*Solanaceae*) chứa nhiều loài cây quan trọng trong thực phẩm con người, như cà chua, cà

tím và ớt (The Angiosperm Phylogeny, 2003). Sản lượng thế giới của các loài này đạt hàng triệu tấn mỗi năm: cà chua - 163 triệu tấn, cà tím - 49 triệu tấn và ớt - 17,5 triệu tấn (FAO, 2013). Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, các cây họ Cà thích nghi tốt với điều kiện thủy canh (Rodriguez-Delfin, 2012). Tuy nhiên, sự thay đổi các đặc điểm cấu trúc hệ rễ của những loài cây quan trọng này dưới ảnh hưởng của thủy canh còn chưa được quan tâm nghiên cứu.

Nghiên cứu này đề cập đến những ảnh hưởng của điều kiện thủy canh lên một hệ thống các đặc điểm cấu trúc hệ rễ (đường kính rễ, tốc độ sinh trưởng của rễ, mật độ rễ nhánh...), đồng thời trình bày những kết quả mang tính đột phá về sự sinh trưởng của rễ (tốc độ sinh trưởng hàng ngày và thời gian phát triển của mầm rễ) nhờ vào thí nghiệm thủy canh mang lại.

## 2 VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1 Vật liệu nghiên cứu

31 giống cây họ Cà (11 giống cà chua, 10 giống cà tím và 10 giống ớt) đã được sử dụng (Bảng 1). Các giống cây được cung cấp bởi phòng thí nghiệm Di truyền và cải thiện rau quả (GAFL, UR.1052, Avignon, Pháp) trong chương trình Rhizopolis 2012.

**Bảng 1: Danh sách và một số đặc điểm của các giống cây (cà tím (A) - Aubergine; ớt (P) – Pimiento và cà chua (T) – Tomato) được sử dụng trong nghiên cứu**

Kí hiệu	Loài	Mã bộ sưu tập	Tên	Mô tả
A01	<i>Solanum melongena</i>	MM 197	Liu Yé Qié	Kiểu sinh thái Viễn Tây (thích nghi với điều kiện ẩm ướt) chín rất sớm, sức sống thấp
A02	<i>S. melongena</i>	MM 108 bis	LF3-24	Kiểu sinh thái Địa Trung Hải (thích nghi với điều kiện khô hạn) sức sống tốt
A03	<i>S. linnaeanum</i>	MM 195	-	Loài hoang dại từ Nam Phi, quần thể bố mẹ là dòng lai (MM 195 x MM 738)
A04	<i>S. melongena</i>	A0416	Jaune douce	Mọc rất thấp, sức sống trung bình, không biết nguồn gốc địa lý
A05	<i>S. melongena</i>	MM 960	AG 91-25	Kiểu nhiệt đới với sự sinh trưởng chậm, chín muộn và hiếm khi xum xuê
A06	<i>S. melongena</i>	MM 1597	Mysore green	Mọc thẳng và cao, đến từ Ấn Độ
A07	<i>S. melongena</i>	A0150 (MM 143)	Jordanie	Kiểu sinh thái Địa Trung Hải (thích nghi với điều kiện khô hạn), sức sống tốt, mọc thẳng, cao
A08	<i>S. melongena</i>	MM 64	Ronde de Valence	Kiểu sinh thái trung gian, được lựa chọn ở điều kiện Địa Trung Hải từ vật liệu vùng Viễn Tây, Đông Nam Pháp, cây mọc trung bình, nghiêng.
A09	<i>S. melongena</i>	MM 103	Shinkuro	Kiểu sinh thái Viễn Đông (Nhật Bản) thích nghi tốt với điều kiện ẩm ướt, kém xum xuê với hệ rễ nhỏ.
A10	<i>S. melongena</i>	MM 738	-	Kiểu thương mại ở châu Âu, thích nghi với nhà kính.
P01	<i>C. annuum</i>	PM0702	Criollo de Morelos	Kháng virus và sâu hại
P02	<i>C. annuum</i>	PM0031	Yolo Wonder	Quả to vuông (bố mẹ đã lập bản đồ gen)

Kí hiệu	Loài	Mã bộ sưu tập	Tên	Mô tả
P03	<i>C. baccatum</i>	PM1034	Peruano 2	Bộ rễ rất khỏe
P04	<i>C. annuum</i>	PM0641	Turrialba	Kiểu hoang dại, chậm nảy mầm
P05	<i>C. annuum</i>	PM0659	Perennial	Kháng virus và sâu hại
P06	<i>C. chinense</i>	PM0987	Baili 3	Phát rễ mạnh
P07	<i>C. annuum</i>	PM1010	Especial	Ít rễ, thích nghi với điều kiện nhiệt đới
P08	<i>C. baccatum</i>	PM1022	Cristal blanco	Phát rễ trung bình
P09	<i>C. annuum</i>	PM1430	Pikuti	Phát rễ mạnh
P10	<i>C. annuum</i>	PM1747	Lagnes	Giống địa phương vùng Địa Trung Hải
T01	<i>S. lycopersicum</i>	T100791	Plovdiv 24A	Quả nhỏ, dạng cocktail, phân lập từ <i>S. pimpinellifolium</i> (chương trình MAGICTOM)
T02	<i>S. lycopersicum</i>	T101359	Moboglan	Kích thước quả trung bình, kháng bệnh héo rễ và có bộ rễ mạnh (đồng được tuyển chọn bởi INRA)
T03	<i>S. lycopersicum</i>	-	Cervil	Kiểu cherry, chất lượng được đảm bảo (chương trình MAGICTOM)
T04	<i>S. lycopersicum</i>	-	Levovil	Quả to, chất lượng được đảm bảo (chương trình MAGICTOM)
T05	<i>S. lycopersicum</i>	T101889	LA 0147	Kiểu quả chery, kích thước quả trung bình (chương trình MAGICTOM)
T06	<i>S. lycopersicum</i>	-	Ferum	Kích thước quả trung bình (chương trình MAGICTOM), bố mẹ là từ F1 Ferline (INRA))
T07	<i>S. lycopersicum</i>	T101013	Stupicke Polni Rane	Kích thước quả trung bình (chương trình MAGICTOM)
T08	<i>S. lycopersicum</i>	T101625	Criollo	Kiểu quả cherry (chương trình MAGICTOM)
T09	<i>S. lycopersicum</i>	T101859	LA 1420	Kiểu quả cherry, hay cocktail (chương trình MAGICTOM)
T10	<i>S. lycopersicum</i>	T101249	Deveipyl	Kích thước quả trung bình, kháng bệnh héo rễ và có bộ rễ mạnh (được tuyển chọn bởi INRA)
T11	<i>S. lycopersicum</i>	-	Maxifort	Giống lai giữa các loài ( <i>S. lycopersicum</i> x <i>S. habrochaitaes</i> ), kháng bệnh héo rễ, bộ rễ mạnh mẽ, rất xum xuê, gốc ghép thương mại.

**2.2 Phương pháp (PP) nghiên cứu**

**2.2.1 PP bố trí thí nghiệm**

Nghiên cứu gồm 2 thí nghiệm ở hai điều kiện trồng cây hoàn toàn khác nhau. Thí nghiệm trồng cây trong chậu trong nhà kính và thí nghiệm thủy canh trong phòng nuôi trồng. Thí nghiệm trồng cây trong chậu là đối chứng để so sánh với thí nghiệm thủy canh. Các thí nghiệm được thực hiện ở Viện Nghiên cứu Nông nghiệp Quốc gia Pháp, cơ sở Avignon.

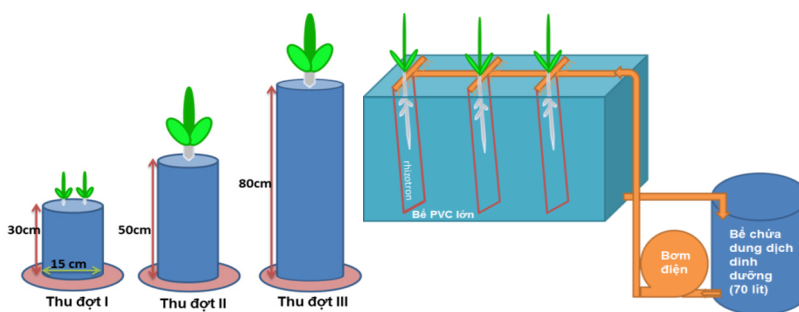
**2.2.2 PP trồng cây**

– Thí nghiệm thủy canh:

Một hệ thống thủy canh được tạo ra với 40 rhizotrons (20 x 50 cm). Mỗi rhizotron được tạo bởi một tấm nhựa trong suốt phủ bằng vải săng, được kẹp giữ bởi hai thanh nhựa PVC. 40 rhizotrons được lắp đặt vào trong bể lớn bằng PVC. Dung dịch dinh dưỡng được tuần hoàn từ một bể chứa 70 lít nhờ vào một bơm điện. Thông qua các ống, rễ cây hấp thụ nước và muối khoáng của dung dịch chảy trên vải săng. Dung dịch dinh

dưỡng sẽ được thu hồi vào bể chứa dung dịch nhờ trọng lực. Như vậy, đây là hệ thống thủy canh hoàn lưu khép kín (Hình 1).

Dung dịch dinh dưỡng là dung dịch Hoagland/5 (9,53 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 12,2 g K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 12,40 g Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O; 33,14 g CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O; 25,88 g MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O; 1,1 g Fe-EDTA.1H<sub>2</sub>O; 7 ml Kanieftra 6Fe pha trong 70 lít nước). Dung dịch dinh dưỡng được giữ ở 20°C, pH 5,5 - 6,0 (bằng cách thêm HNO<sub>3</sub> mỗi 7 ngày nếu cần thiết) và được thay mới hoàn toàn mỗi 3 tuần. Thí nghiệm được thực hiện trong phòng nuôi trồng, nhiệt độ ngày/đêm là 23/20°C, 12 giờ chiếu sáng, cường độ bức xạ 350 - 400 μmol.cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. Thí nghiệm được thực hiện từ 01/03/2013 đến 10/04/2013 đối với cà chua; từ 27/08/2013 đến 10/11/2013 đối với cà tím; từ 12/11/2013 đến 25/3/2014 đối với ớt và giống bổ sung cà chua (T11). 5 hạt được gieo trực tiếp ở phần trên rhizotron bằng cách sử dụng giấy thấm và chỉ giữ lại một cây/rhizotron. Như vậy, mỗi giống có 4 cây.



**Hình 1 : Sơ đồ bố trí thí nghiệm trồng cây trong chậu và thủy canh**

Ghi chú: Hình trụ tròn (phía trái) là chậu trồng cây trong đất, hình khối hộp (bên phải) là bể trồng cây thủy canh có chứa các rhizotron

– Thí nghiệm trồng cây trong chậu:

Cơ chất sử dụng là hỗn hợp giữa bi đất nung (40% thể tích,  $\phi$ : 4 - 10 mm, Argex Burcht, Bỉ) và sepiolite (60% thể tích,  $\phi$ : 0,6 - 1,4 mm, Haléo, Sorgue - Pháp). Sau khi tưới nước, cơ chất có pH = 6,3; mật độ hạt là 0,57; độ chặt 55 - 105 kPa (đo bằng máy đo lực đâm xuyên cầm tay).

Cây được tưới dung dịch dinh dưỡng (pha loãng từ dung dịch Liquoplant Xanh, Engrais Plantin ở Courthézon, Pháp) 1 lần/3 ngày cho đến khi thu hoạch. Dung dịch chứa đầy đủ các nguyên tố cần thiết cho cây. Những ngày khác, cây sẽ được tưới nước khử khoáng.

Các chậu PVC được sử dụng (đường kính: 16 cm; chiều cao: 30 cm, 50 cm và 80 cm), có đĩa nhựa lót phía dưới để giữ cơ chất (Hình 1). Cây được trồng nhà kính từ tháng 4 đến tháng 6/2012. Mỗi chậu được gieo 5 hạt giống và để lại 2 cây/chậu (chậu 30cm), và 1 cây/chậu (chậu 50 cm, 80 cm). Như vậy, mỗi giống có 4 cây.

### 2.2.3 PP thu thập số liệu

– Theo dõi các chỉ tiêu sinh động:

Hình ảnh rhizotron được chụp bằng máy ảnh có độ phân giải cao (24 megapixel, Nikon D3200), hai ngày một lần. Trên hình ảnh thu được đo chiều dài rễ, chiều dài vùng đỉnh rễ không phân nhánh (length of the apical unbranched zone, LAUZ) đối với rễ chính và khoảng chục rễ nhánh bằng phần mềm “Image J” (<http://imagej.nih.gov/ij/>). Nhờ vậy có thể tính một cách chính xác được tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ, thời gian phát triển của mầm rễ (primordia).

– Cách thức thu mẫu:

Ở cả hai thí nghiệm, cây được thu ở 3 thời điểm khác nhau trong khoảng từ 17 đến 56 ngày sau khi gieo cho đến khi cây ra hoa và tránh rễ chính chạm đến đáy chậu, đáy rhizotron. Phần trên của cây được mô tả một số chỉ tiêu khái quát: diện tích lá

( $cm^2$ ); khối lượng khô của cây (g) và hàm lượng chất khô của rễ (g).

Rễ cây được rửa cẩn thận và được lấy mẫu dọc theo rễ chính (rễ cấp 1) như sau: đếm số lượng rễ nhánh theo từng đoạn 5 cm, cho đến đỉnh rễ; quét (scan) phần cuối của đỉnh rễ với khoảng vài chục rễ nhánh ở độ phân giải 1.200 dpi (máy quét Epson Expression 10000XL); đo đường kính rễ, chiều dài vùng rễ không phân nhánh của rễ chính trên ảnh. Chọn 3 rễ nhánh cấp 2 trên mỗi đoạn 5 cm của rễ chính (một rễ dài, một rễ trung bình và một rễ ngắn). Trên mỗi rễ nhánh này, áp dụng cách thu mẫu như đối với rễ chính và tiếp tục cho hết toàn bộ hệ rễ cây. Các rễ được quét và không được quét sẽ được cân và sấy khô sấy ở 70°C trong 48 giờ để thu khối lượng khô. Thực tế quan sát đã cho thấy hệ rễ của các loài nghiên cứu có rễ phân nhánh đến cấp 5 và rễ bất định. Do số lượng mẫu hạn chế nên trong bài viết này chỉ trình bày số liệu phân tích đến rễ cấp 4.

– Phân tích các hình ảnh quét thu được, thu thập và phân tích số liệu:

Trên các hình ảnh quét, tiến hành đo các số liệu về chiều dài, số lượng rễ nhánh, đường kính đỉnh của mỗi rễ (đo ở 1 - 5 mm tính từ đầu rễ, nơi rễ gần như hình trụ) nhờ các phần mềm “DART” (Le Bot *et al.*, 2010) và “Image J”.

Tỷ lệ sinh trưởng tương đối của khối lượng khô toàn cây (relative growth rate,  $RGR$ , ngày<sup>-1</sup>) và của diện tích lá (relative leaf area growth rate,  $RLAGR$ , ngày<sup>-1</sup>) được tính theo công thức cổ điển của Fisher (Fisher, 1921; Hunt *et al.*, 2002):  $RGR = (\log_e(W_2) - \log_e(W_1)) / (t_2 - t_1)$  [1]. Trong đó,  $W_1$  và  $W_2$  là khối lượng khô (hoặc diện tích lá) thu được ở các lần thu mẫu kế tiếp nhau  $t_1$  và  $t_2$ . Ngoài ra, nghiên cứu còn xác định tỷ lệ chất khô của rễ so với toàn cây (proportion of root dry mass,  $PROOT$ ).

Tốc độ sinh trưởng của rễ được tính từ chiều dài rễ đo được và ước tính tuổi của rễ. Tuổi của rễ

chính được tính từ khi gieo đến khi thu hoạch trừ đi thời gian nảy mầm (quan sát sự nảy mầm trong đĩa petri). Tuổi của các rễ nhánh khác được tính theo công thức sau:  $T = T_m(1 - ((DB+LAUZ_m)/L_m))$  (ngày) [2]. Trong đó, T là tuổi của rễ nhánh,  $T_m$  là tuổi của “mẹ” rễ nhánh, DB là khoảng cách từ gốc rễ tới điểm phát sinh rễ nhánh trên rễ mẹ,  $LAUZ_m$  là chiều dài vùng không phân nhánh của rễ mẹ và  $L_m$  là tổng chiều dài của rễ mẹ. Những rễ non ( $\leq 3$  ngày) bị loại khỏi bộ số liệu vì thời gian không đủ để tạo thành rễ nhánh và rễ bị dừng sinh trưởng hoặc bị cản trở ( $LAUZ_m \leq 0,5$  cm).

Thời gian phát triển của mầm rễ hay thời gian trước phân nhánh (duration before branching, “*dbb*”), là thời gian tính từ khi các tế bào ở mô phân sinh chuyển hóa cho đến khi phát sinh rễ nhánh (Lecompte *et al.*, 2001; Pagès *et al.*, 2010). Tốc độ sinh trưởng hàng ngày và *LAUZ* được đo đồng thời nên thời gian phát triển của mầm rễ (*dbb*) được tính một cách chính xác theo công thức:  $dbb(i) = LAUZ_i/V_{ci}$  (ngày) [3]. Trong đó,  $LAUZ_i$  là chiều dài của vùng đỉnh không phân nhánh (cm) và  $V_{ci}$  là tốc độ sinh trưởng hàng ngày (cm.ngày<sup>-1</sup>) ở thời điểm đo “i”.

2.2.4 PP thống kê

Tất cả các phân tích số liệu, tính toán thống kê, phân tích phương sai và anova (analysis of variance) dựa trên hệ số sai số Student được thực

hiện trên phần mềm R (<http://www.r-project.org/>).

3 KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1 Kết quả

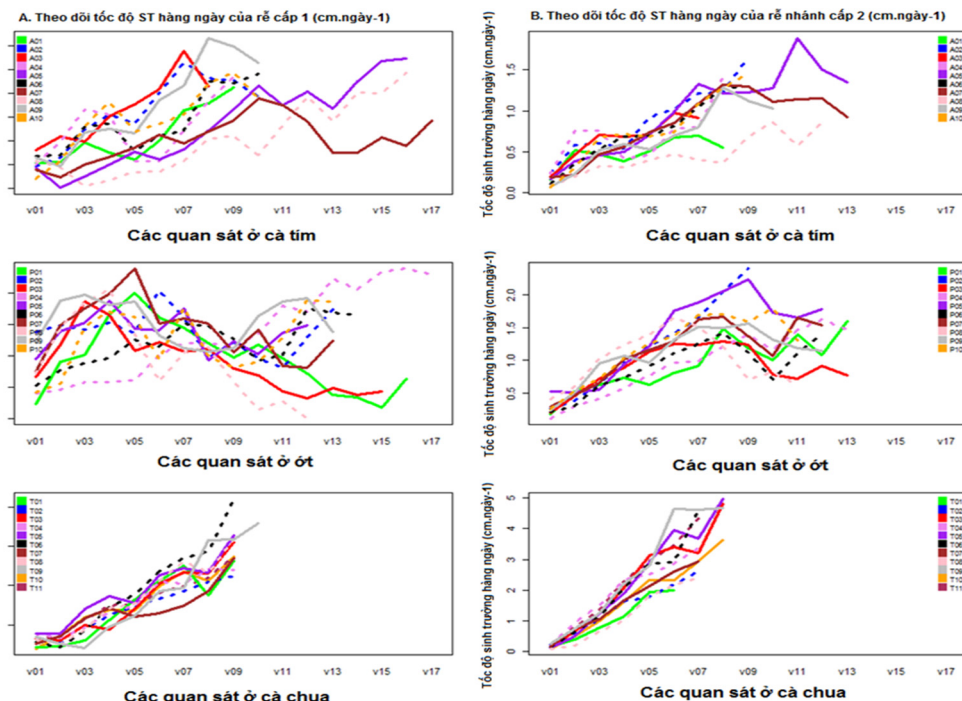
3.1.1 So sánh sự sinh trưởng tổng thể của cây trồng trong thủy canh và trồng trong chậu

Để đánh giá tổng quát sự sinh trưởng của cây, một số chỉ tiêu về sinh thái học được phân tích như *RLAGR*, *RGR* và *PROOT*. So sánh với trồng trong chậu cho thấy hàm lượng chất khô của rễ là thấp hơn trong thủy canh. Sự sai khác này có ý nghĩa thống kê ( $p=0.000248$ ). Các tỷ lệ sinh trưởng tương đối không có sự sai khác mang ý nghĩa thống kê. Tuy nhiên, quan sát đã cho thấy cà chua và ớt có khuynh hướng sinh trưởng tốt hơn trong chậu, trong khi sự sinh trưởng của cà tím trong hai điều kiện trồng trọt là hoàn toàn tương tự nhau.

3.1.2 Phân tích các đặc điểm mang tính đột phá của hệ rễ trong thủy canh

a. Diễn tiến của tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ

Theo dõi sự sinh trưởng của rễ chính và rễ nhánh trong khoảng 35 ngày sau khi nảy mầm (NSNM) ở thí nghiệm thủy canh, kết quả chỉ ra rằng tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ tăng lên theo thời gian, ngoại trừ các giống ớt, tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ ớt tăng lên ở những ngày đầu và giảm ngay sau đó (Hình 2).



Hình 2 : Tốc độ sinh trưởng hàng ngày theo thời gian ở rễ cây trong thủy canh

Ghi chú: Rễ cấp 1 (A) và ở rễ cấp 2 (B). v1, 2, 3, ... tương ứng với tốc độ sinh trưởng ở các quan sát. Các kí tự tương ứng với giống cây.

Ở rễ chính (Hình 2A), đỉnh tiến trình của tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ là khác nhau tùy theo giống và loài: 2,66 (cm.ngày<sup>-1</sup>) vào khoảng 16 - 18 (NSNM) ở cà tím; 2,01 (cm.ngày<sup>-1</sup>) vào khoảng 9 - 10 (NSNM) ở ớt, và 7,16 (cm.ngày<sup>-1</sup>) vào khoảng 18 - 20 (NSNM) ở cà chua (lưu ý: giá trị trên là trung bình cho tất cả các giống trong nhóm, giá trị ở cà chua là ước tính vì rễ đã chạm đáy rhizotron). Tốc độ sinh trưởng rễ theo những tiến trình khác nhau tùy theo loài. Ở cà tím và cà chua, tốc độ sinh trưởng tăng liên tục trong quá trình quan sát, trong khi đó ở ớt có sự biến động. Ở rễ nhánh (Hình 2B), các tiến trình là giống nhau nhưng giá trị của tốc độ là thấp hơn so với rễ chính.

**b. Thời gian phát triển của mầm rễ**

Mối quan hệ tuyến tính giữa LAUZ và tốc độ sinh trưởng hàng ngày của rễ được xác nhận ( $R = -0,88$ ,  $p=5,643 \times 10^{-11}$ , số liệu phân tích trên tất cả 31 giống nghiên cứu). Thời gian phát triển của mầm rễ là khác nhau tùy theo loài: ngắn nhất là ở cà chua (2,77 ngày), trung bình ở cà tím (3,74 ngày) và lâu nhất ở ớt (5,47 ngày).

**3.1.3 So sánh đường kính đỉnh rễ trong thủy canh và trồng trong chậu**

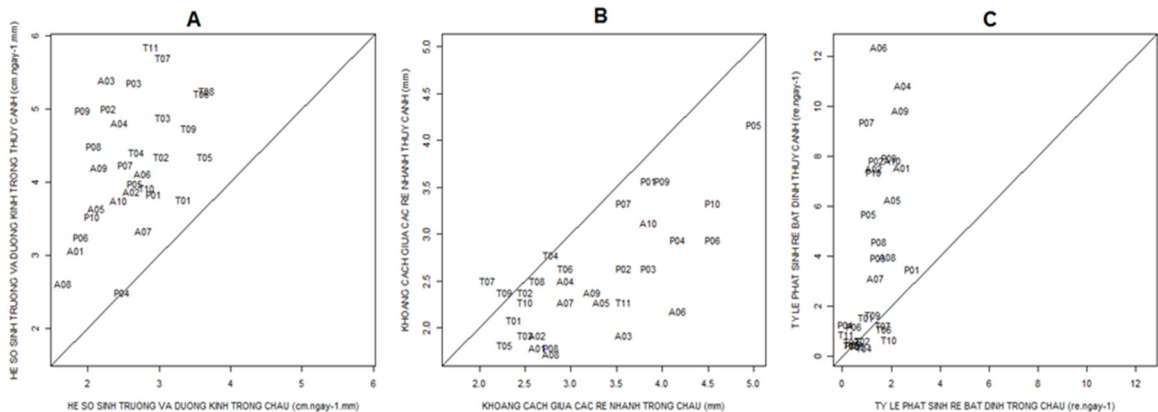
Đường kính đỉnh rễ là chỉ tiêu quan trọng của rễ cây. Giá trị đường kính đỉnh rễ có khoảng biến

thiên rộng ngay trong cùng một bộ rễ. Đường kính đỉnh rễ được đánh giá qua ba tham số:  $dmin$  (đường kính đỉnh rễ cực tiểu, được tính trên tổng rễ đo được tại phân vị 0,02),  $dmax$  (đường kính cực đại của đỉnh rễ chính ở phân vị 0,9) và  $drange$  (biên độ của đường kính đỉnh rễ, được tính theo công thức  $drange = 2 \cdot (dmax - dmin) / (dmax + dmin)$ ).

Phân tích số liệu 4 cấp độ phân nhánh của rễ trong cả hai điều kiện trồng trọt cho thấy rằng: đường kính đỉnh rễ trong thủy canh là nhỏ hơn so với trồng trong đất. Sự khác nhau là có ý nghĩa thống kê với  $dmin$  ( $p=9,38 \times 10^{-07}$ ) và  $drange$  ( $p=4,227 \times 10^{-06}$ ).

**3.1.4 So sánh tốc độ sinh trưởng của rễ trong thủy canh và trồng trong chậu**

Tốc độ sinh trưởng của rễ có mối tương quan thuận với đường kính đỉnh rễ của chúng. Vì vậy, hệ số giữa tốc độ sinh trưởng và đường kính rễ ( $elong$ , cm.ngày<sup>-1</sup>.mm) được ước tính. Kết quả phân tích ở cả hai điều kiện canh tác chỉ ra rằng hệ số này ở thủy canh là lớn hơn rất nhiều so với trồng trong chậu (Hình 3A). Sự sai khác có ý nghĩa thống kê ( $p=0,00579$ ).



**Hình 3: So sánh của tốc độ sinh trưởng với đường kính đỉnh rễ (A), khoảng cách giữa các rễ nhánh (B) và tỷ lệ phát sinh rễ bất định (C) giữa hai điều kiện trồng trọt**

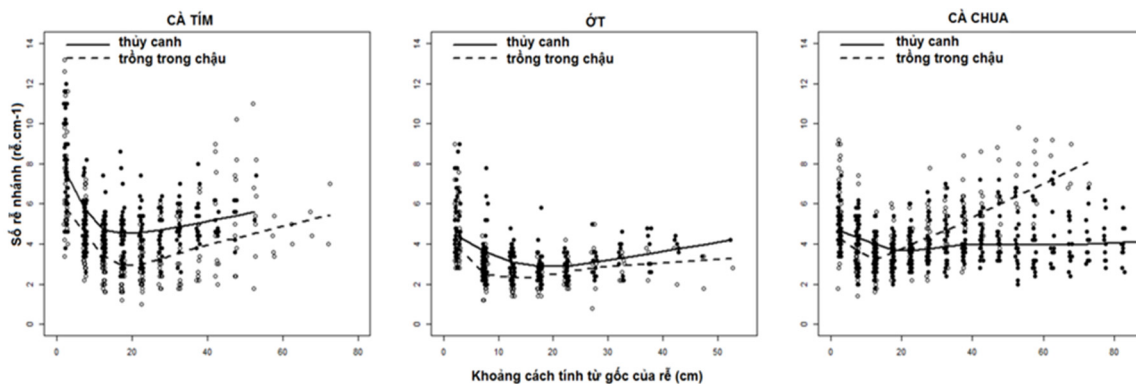
Ghi chú: Đường thẳng là đường phân giác thứ nhất. Các kí tự tương ứng với giống cây

**3.1.5 So sánh các đặc điểm phân nhánh của rễ trong thủy canh và trồng trong chậu**

**a. So sánh mật độ rễ nhánh**

Mật độ rễ nhánh được thể diễn qua tham số khoảng cách giữa các rễ nhánh (inter-branching distance, “ $ibd$ ” (mm), tính trung bình trên số liệu rễ cấp 1 và 2). So sánh với trồng trong chậu, khoảng cách giữa các rễ là thấp hơn ở thủy canh (Hình 3B).

Đường biểu diễn mật độ rễ (rễ.cm<sup>-1</sup>) dọc theo rễ chính chỉ ra rằng, mật độ rễ nhánh giảm dọc theo 15 cm đầu sau đó tăng lên hoặc ổn định (Hình 4) và ổn định trong cả hai điều kiện canh tác. Đường biểu diễn mật độ rễ trong thủy canh là cao hơn so với trồng trong chậu (riêng ở cà chua sau 15 cm đầu ở cây trồng trong chậu cao hơn trong thủy canh).



**Hình 4 : So sánh đường biểu diễn mật độ rễ nhánh dọc theo rễ chính trong hai điều kiện canh tác**

Ghi chú: Đường nét liền với “chấm tròn đặc” ở thủy canh, đường nét đứt với “chấm tròn rỗng” trồng trong chậu.

*b. So sánh sự phát sinh rễ bất định*

Nhờ vào thiết kế hệ thống thủy canh với rhizotron, ngày phát sinh rễ bất định đã được quan sát một cách chính xác, ở cà chua (khoảng 12,5 ngày sau khi nảy mầm, NSNM), tiếp đến là cà tím (16 NSNM) và ớt (19 NSNM). Kết quả này phù hợp với quan sát ở thí nghiệm trồng cây trong chậu. Vì vậy, chúng ta có thể xem ngày bắt đầu phát sinh rễ bất định như là một tham số ổn định cho mỗi loài.

Đếm tổng số rễ bất định. Những rễ này phân biệt khá dễ dàng với rễ trình tự vì đường kính rễ lớn hơn và rễ có màu trắng hơn. Tỷ lệ phát sinh hàng ngày là tổng số lượng rễ bất định chia cho lượng thời gian giữa ngày thu mẫu và ngày rễ bắt đầu phát sinh (*emis*, rễ.ngày<sup>-1</sup>). Kết quả cho thấy, tỷ lệ này tăng cao trong thủy canh ở cà tím và ớt nhưng lại giảm nhẹ ở cà chua khi so với trồng trong chậu (Hình 3C). Như vậy, tỷ lệ phát sinh

hàng ngày của rễ bất định là một đặc điểm mềm dẻo.

*3.1.6 Tổng hợp sự so sánh của các đặc điểm giữa thủy canh và trồng trong chậu*

Việc tóm tắt sự so sánh các đặc điểm cấu trúc hệ rễ dựa trên tỷ lệ giá trị trung bình và tính hệ số quan hệ của mỗi đặc điểm giữa hai điều kiện trồng trọt. Kết quả của 9 đặc điểm (6 đặc điểm về cấu trúc hệ rễ và 3 đặc điểm về sự sinh trưởng chung của cây) được trình bày trong Bảng 2.

Bảng số liệu cho thấy rằng, *emis* và *elong* có giá trị cao hơn trong thủy canh; *dmax*, *dmin*, *ibd*, và *PROOT* có giá trị thấp hơn và các đặc điểm (*drange*, *RLAGR* và *RGR*) có giá trị ngang nhau khi so sánh với các giá trị trồng trong chậu. Phân tích tương quan của các đặc điểm giữa hai kiểu canh tác chỉ ra rằng các đặc điểm (*drange*, *dmin*, *ibd*, *RLAGR*, và *RGR*) là tương quan với nhau trong khi các đặc điểm khác (*emis*, *dmax*, *elong*, và *PROOT*) là ít tương quan hơn.

**Bảng 2: Tóm tắt sự so sánh của các đặc điểm nghiên cứu**

STT	Viết tắt của các đặc điểm	Tỷ lệ của giá trị trung bình giữa thủy canh và trồng trong chậu	Hệ số tương quan	P-value
1	<i>emis</i>	3,181194	0,5601392	0,001049
2	<i>elong</i>	1,621697	0,449935	0,0111
3	<i>drange</i>	0,9677653	0,6724773	3,145x10 <sup>-5</sup>
4	<i>dmin</i>	0,8847864	0,6476799	8,188x10 <sup>-5</sup>
5	<i>dmax</i>	0,8329316	0,3093799	0,09034
6	<i>ibd</i>	0,7813898	0,704548	9,688x10 <sup>-6</sup>
7	<i>RLAGR</i>	1,005518	0,8123842	2,866x10 <sup>-8</sup>
8	<i>RGR</i>	0,9368892	0,7353017	2,455x10 <sup>-6</sup>
9	<i>PROOT</i>	0,5498834	0,5918219	0,0004534

### 3.2 Thảo luận

#### 3.2.1 Thí nghiệm hệ thống thủy canh đã cải thiện việc đánh giá chính xác một số đặc điểm rễ

Các đặc điểm phát triển tổng quát của cây (*RLAGR* và *RGR*) trong thủy canh không có sự sai khác so với trồng trong chậu. Điều này cho thấy bố trí thí nghiệm thủy canh không ảnh hưởng đến sự sinh trưởng của cây và phù hợp với các giống nghiên cứu của họ Cà. Kết quả phù hợp với nhận định “các loài cây họ Cà thích nghi tốt với thủy canh” (Rodriguez-Delfin, 2012).

Thí nghiệm hệ thống thủy canh này cho phép theo dõi sự sinh trưởng hàng ngày, LAUZ theo thời gian cũng như ngày phát sinh rễ bất định mà không tác động vào cây. Điều này giúp đánh giá chính xác hơn những đặc điểm linh động như tốc độ sinh trưởng hàng ngày, thời gian phát triển của mầm rễ và tỷ lệ phát sinh rễ bất định. Vì vậy, rhizotron trong thủy canh là một công cụ để đánh giá chính xác các đặc điểm cấu trúc hệ rễ và tiếp cận những câu hỏi cơ bản về sinh lý của toàn cây (Mathieu *et al.*, 2015).

Tỷ lệ chất khô của rễ (*PROOT*) thường được xem là một chỉ số của chiến lược sử dụng nguồn lực ở các loài (Wilson *et al.*, 1999). Sự đầu tư nhiều nguồn lực cho rễ sẽ cải thiện khả năng sống sót và tuổi thọ của rễ (Ryser, 1996; Craine *et al.*, 1999). Thủy canh làm giảm tỷ lệ chất khô của rễ. Điều này có thể được giải thích do điều kiện thủy canh rất thuận lợi nên rễ thực hiện chức năng với một sự đầu tư ít.

Quan sát cho thấy, mối quan hệ tuyến tính giữa tốc độ kéo dài và LAUZ ở các giống cây họ Cà được xác nhận. Kết quả này phù hợp với những kết quả nghiên cứu trước ở cây bần (Pagès and Serra, 1994), ở cây ngô (Pellerin and Tabourel, 1995), và ở cây chuối (Lecompte *et al.*, 2001). Kết quả nghiên cứu này cũng xác nhận rằng, LAUZ là một tham số chỉ thị tốt của tốc độ sinh trưởng và có thể giúp dự đoán tốc độ sinh trưởng (Lecompte *et al.*, 2001).

#### 3.2.2 Các giá trị của đường kính đỉnh rễ (*dmin*, *dmax*) có xu hướng giảm trong thủy canh

Đường kính đỉnh rễ là một đặc điểm quan trọng của cấu trúc rễ. Nó thể hiện kích thước của mô phân sinh (Barlow and Rathfelder, 1984; Coutts, 1987) và thể hiện tiềm năng sinh trưởng của rễ (Pagès, 1995; Lecompte *et al.*, 2001). Đường kính cực tiểu (*dmin*) là một tham số của mô hình cấu trúc hệ rễ “Archisimple” (Pagès, 2011), nó được định nghĩa như ngưỡng của sự kéo dài rễ. Dưới ngưỡng này, mô phân sinh nhỏ nên không thể kéo dài rễ. Khi so sánh với trồng cây trong chậu, đường

kính rễ (*dmin*, *dmax*) trong thủy canh có giá trị nhỏ hơn trồng trong chậu. Kết quả này được giải thích bởi quan hệ thuận giữa đường kính của rễ và khả năng kháng đâm xuyên của đất (the soil penetration resistance) (Materchera *et al.*, 1991; Misra and Gibbons, 1996; Bécel *et al.*, 2012). Vì vậy, khả năng kháng đâm xuyên có trong cơ chất (và không có trong rhizotron ở thủy canh) có thể chịu trách nhiệm chính của những biến đổi ở đường kính rễ.

#### 3.2.3 Tốc độ sinh trưởng của rễ (*elong*) tăng mạnh trong thủy canh

Trong thủy canh, không có sức cản cũng không có tính kháng đâm xuyên nên cây có thể đạt được giá trị rất cao về tốc độ sinh trưởng (*elong*). Một số tác giả đã quan sát thấy ảnh hưởng của tính kháng đâm xuyên của đất lên tốc độ sinh trưởng ở nhiều loài cây như bông và đậu phộng (Taylor and Ratliff, 1969), đào (Bécel *et al.*, 2012), lúa mạch (Bingham *et al.*, 2010).

#### 3.2.4 Mật độ rễ nhánh ổn định nhưng tỷ lệ phát sinh rễ bất định biến đổi mạnh trong thủy canh

Mật độ rễ nhánh có sự giảm dần dọc theo 15 - 20 cm đầu tiên của rễ chính sau đó tăng lên hoặc ổn định. Hiện tượng này đã được quan sát ở nhiều giống cây họ Cà (Bui *et al.*, 2015) và nó được ổn định trong điều kiện thủy canh.

Khoảng cách giữa các rễ nhánh trong thủy canh tăng nhẹ ở cà tím và ớt nhưng lại giảm nhẹ ở một số giống cà chua. Kết quả này phù hợp với quan sát của Nakano (2007). Sự phản ứng với khả năng kháng đâm xuyên của đất là khác nhau ở mỗi loài cây. Có những loài nhạy cảm như khoai tây (Stallham *et al.*, 2007) và cây đào (Bécel *et al.*, 2012) nhưng có loài ít nhạy cảm như bạch đàn (Misra and Gibbons, 1996).

Các giá trị tương đối của khoảng cách giữa các rễ nhánh và đường biểu diễn mật độ rễ nhánh được giữ vững trong cả hai kiểu trồng trọt. Kết quả này xác nhận đặc điểm rễ này được kiểm soát bởi gen (Zhang *et al.*, 1999; De Pessemier *et al.*, 2013).

Tổng thể rễ bất định có một vai trò quan trọng trong hệ thống rễ cây trưởng thành (Bui *et al.*, 2015). Sự phát sinh những rễ bất định thường gắn với vấn đề chấn thương hay căng thẳng (Chiatante *et al.*, 2007; Nakano, 2007). Ví dụ, sự tăng số lượng rễ bất định trong điều kiện ngập nước ở lúa (*Oryza sativa*) (Lorbiecke and Sauter, 1999). Trong nghiên cứu này, tỷ lệ phát sinh rễ bất định được tác động bởi điều kiện canh tác. Kết quả thú vị này thể hiện rằng, sự phát sinh rễ bất định có thể là chiến lược quan trọng trong tính mềm dẻo của hệ thống rễ để thích ứng với môi trường luôn biến động.



#### 4 KẾT LUẬN

Thí nghiệm hệ thống thủy canh là sự kết hợp tính ưu việt của cả hệ thống thủy canh và rhizotron giúp quan sát liên tục không phá vỡ sự phát triển của hệ thống rễ. Thí nghiệm giúp đánh giá những đặc điểm linh động của rễ như tốc độ sinh trưởng hàng ngày và thời gian phát triển của mầm rễ, từ đó mang lại cái nhìn sống động về sự phát triển của rễ.

Bằng cách so sánh giá trị của các đặc điểm rễ trong hai môi trường canh tác có thể bàn luận về ảnh hưởng của thủy canh lên hệ rễ và tính ổn định của các đặc điểm rễ thông qua phân tích mối quan hệ và tỷ lệ giữa các giá trị. Thủy canh làm giảm đường kính rễ, tăng tốc độ sinh trưởng rễ nhưng mật độ rễ nhánh lại có sự ổn định.

Kết quả nghiên cứu này mở ra con đường để phân tích sâu hơn về sự kiểm soát của gen thông qua QTL và có thể sử dụng để lập bản đồ gen của quần thể.

#### LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn R. Damidaux, M.-C. Daunay, và A.-M. Sage-Palloix vì đã cung cấp hạt giống; V. Serra, J. Fabre, G. Garcia, C. Vigne vì đã hỗ trợ thiết kế, lắp đặt các hệ thống thí nghiệm; L. Pagès vì đã hướng dẫn và hỗ trợ xử lý số liệu. Nghiên cứu được sự hỗ trợ tài chính của Quỹ Agropolis (dự án Rhizopolis).

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

Ahmed, A. K., Cresswell, G. C. et al. 2000. Comparison of sub-irrigation and overhead irrigation of tomato and lettuce seedlings. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 75(3): 350-354.

Barlow, P. W. and Rathfelder, E. L. 1984. Correlations between the dimensions of different zones of grass root apices, and their implications for morphogenesis and differentiation in roots. *Annals of Botany* 53(2): 249-260.

Bécel, C., G. Vercambre, et al. 2012. Soil penetration resistance, a suitable soil property to account for variations in root elongation and branching. *Plant and Soil* 353(1-2): 169-180.

Bengough, A. G. and Young, I. M. 1993. Root elongation of seedling peas through layered soil of different penetration resistances. *Plant and Soil* 149(1): 129-139.

Bingham, I. J. Bengough, A. G. et al. 2010. Soil compaction-N interactions in barley: Root growth and tissue composition. *Soil and Tillage Research* 106(2): 241-246.

Bui, H. H., Serra, V. et al. 2015. Root system development and architecture in various genotypes of the Solanaceae family. *Botany* 93(8): 465-474.

Chiatante, D., Di Iorio, A. et al. 2007. Modification of root architecture in woody plants is possible for the presence of two different mechanisms of lateral root production: The effect of slope in *Spartium junceum* L. seedlings. *Plant Biosystems* 141(3): 502-511.

Coutts, M. P. 1987. Developmental processes in tree root systems. *Canadian Journal of Forest Research* 17(8): 761-767.

Craine, J. M., Berin, D. M. et al. 1999. Measurement of leaf longevity of 14 species of grasses and forbs using a novel approach. *New Phytologist* 142(3): 475-481.

De Pessemier, J., Chardon, F. et al. 2013. Natural variation of the root morphological response to nitrate supply in *Arabidopsis thaliana*. *Mechanisms of Development* 130(1): 45-53.

Dexter, A. R. 198). Mechanics of root growth. *Plant and Soil* 98(3): 303-312.

Drew, M. C. 1975. Comparison of the effects of a localised supply of phosphate, nitrate, ammonium and potassium on the growth of the seminal root system, and the shoot, in barley. *New Phytologist* 75(3): 479-490.

FAO, 2013. Faostat. <http://faostat3.fao.org/>.

Fisher, R. A. 1921. Some remarks on the methods formulated in a recent article on "The quantitative analysis of plant growth". *Annals of Applied Biology* 7(4): 367-372.

Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. Berkeley: College of Agriculture, University of California Circular 347: 34.

Hunt, R., Causton, D. R. et al. 2002. A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany* 90(4): 485-488.

Ignatius, A., Arunbabu, V. et al. 2014. Rhizofiltration of lead using an aromatic medicinal plant *Plectranthus amboinicus* cultured in a hydroponic nutrient film technique (NFT) system. *Environmental Science and Pollution Research* 21(22): 13007-13016.

ImageJ software. Available from <http://imagej.nih.gov/ij/>.

Le Bot, J., Serra, V. et al. 2010. DART: a software to analyse root system architecture and development from captured images. *Plant and Soil* 326(1-2): 261-273.

Lecompte, F., Ozier-Lafontaine, H. et al. 2001. The relationships between static and dynamic variables in the description of root growth. Consequences for field interpretation of rooting variability. *Plant and Soil* 236(1): 19-31.

López-Bucio, J., Cruz-Ramírez, A. et al. 2003. The role of nutrient availability in regulating root architecture. *Current Opinion in Plant Biology* 6(3): 280-287.

- Lorbiecke, R. and Sauter, M. 1999. Adventitious root growth and cell-cycle induction in deepwater Rice. *Plant Physiology* 119(1): 21-30.
- Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology* 109(1): 7-13.
- Massa, D., Incrocci, L. et al. 2011. Simulation of crop water and mineral relations in greenhouse soilless culture. *Environmental Modelling & Software* 26(6): 711-722.
- Materchera, S. A., Alston, A. M. et al. 1992. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil* 144(2): 297-303.
- Materchera, S. A., Dexter, A. R. et al. 1991. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species. *Plant and Soil* 135(1): 31-41.
- Mathieu, L., Lobet, G. et al. 2015. "Rhizoponics": a novel hydroponic rhizotron for root system analyses on mature *Arabidopsis thaliana* plants. *Plant Methods* 11(1): 3.
- Misra, R. K. and Gibbons, A. K. 1996. Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. *Plant and Soil* 182(1): 1-11.
- Nakano, Y. 2007. Response of tomato root systems to environmental stress under soilless culture. *Jarq-Japan Agricultural Research Quarterly* 41(1): 7-15.
- Pagès, L. 1995. Root architecture: analyse and modelisation. Seminar report "Root et the root system" in INRA Orleans, France.
- Pagès, L. 2011. Links between root developmental traits and foraging performance. *Plant, Cell & Environment* 34(10): 1749-1760.
- Pagès, L. and Serra, V. 1994. Growth and branching of the taproot of young oak trees - a dynamic study. *Journal of Experimental Botany* 45(9): 1327-1334.
- Pagès, L., Serra, V. et al. 2010. Estimating root elongation rates from morphological measurements of the root tip. *Plant and Soil* 328(1): 35-44.
- Pardossi, A., Malorgio, F. et al. 2006. Hydroponic technologies for greenhouse crops. *Crops: Quality, Growth and Biotechnology*. WFL Publisher, Helsinki, In: Dris, R. (Ed.): 360-378.
- Pellerin, S. and Tabourel, F. 1995. Length of the apical unbranched zone of maize axile roots: its relationship to root elongation rate. *Environmental and Experimental Botany* 35(2): 193-200.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available from <https://www.r-project.org/>.
- Raviv, M. and Lieth, J. H. 2008. 1 - Significance of soilless culture in agriculture. *Soilless Culture*. Amsterdam, Elsevier: 1-II.
- Rodriguez-Delfin, A. 2012. Advances of hydroponics in Latin America. II International Symposium on Soilless Culture and Hydroponics. F. C. GomezMerino, L. I. TrejoTellez and M. N. RodriguezMendoza. Leuven 1, Int Soc Horticultural Science. 947: 23-32.
- Rubio, J. S., Garcia-Sanchez, F. et al. 2010. Yield and fruit quality of sweet pepper in response to fertilisation with Ca<sup>2+</sup> and K<sup>+</sup>. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(1): 170-177.
- Ryser, P. 1996. The Importance of Tissue Density for Growth and Life Span of Leaves and Roots: A Comparison of Five Ecologically Contrasting Grasses. *Functional Ecology* 10(6): 717-723.
- Sanchez-Del-Castillo, F., Gonzalez-Molina, L. et al. 2014. Nutritional dynamics and yield of cucumber grown in hydroponics with and without recirculation of the nutrient solution. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3): 261-269.
- Sanchez-Del Castillo, F., Moreno-Perez, E. D. et al. 2014. Hydroponic tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production with and without recirculation of nutrient solution. *Agrociencia* 48(2): 185-197.
- Stalham, M. A., Allen, E. J. et al. 2007. Effects of soil compaction in potato (*Solanum tuberosum*) crops. *Journal of Agricultural Science* 145: 295-312.
- Stanghellini, C., Pardossi, A. et al. 2007. What limits the application of wastewater and/or closed cycle in horticulture? *Acta Hort.* (ISHS) 747: 323-330.
- Taylor, H. M. and Ratliff, L. F. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soils strength and soil water content. *Soil Science* 108(2): 113-119.
- The Angiosperm Phylogeny, G. 2003. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG II. *Botanical Journal of the Linnean Society* 141(4): 399-436.
- Thongo M'bou, A., Jourdan, C. et al. 2008. Root elongation in tropical Eucalyptus plantations: effect of soil water content. *Annals of Forest Science* 65(6): 609-609.
- Tracy, S. R., Black, C. R. et al. 2012. Quantifying the impact of soil compaction on root system architecture in tomato (*Solanum lycopersicum*) by X-ray micro-computed tomography. *Annals of Botany* 110(2): 511-519.
- Urrestarazu, M. 2004. Tratado de cultivo sin suelo. Ed Mundi-Prensa, Madrid, Spain. In Spanish: 928 pp.
- Van der Weele, C. M., Spollen, W. G. et al. 2000. Growth of *Arabidopsis thaliana* seedlings under water deficit studied by control of water potential in nutrient-agar media. *Journal of Experimental Botany* 51(350): 1555-1562.
- Wilson, P. J., Thompson, K. E. N. et al. 1999. Specific leaf area and leaf dry matter content as alternative predictors of plant strategies. *New Phytologist* 143(1): 155-162.
- Zhang, H., Jennings, A. et al. 1999. Dual pathways for regulation of root branching by nitrate. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96(11): 6529-6534.