



**Caracterización de Patrones de Cítricos,
Enanizantes, Semi-enanizantes y Sub-estándar,
para el Desarrollo de Sistemas de Plantación
Sostenibles en Andalucía Occidental**

**Áurea Hervalejo García
Sevilla, 2023**





Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural.

Universidad de Sevilla
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Programa de Doctorado Interuniversitario en Ingeniería Agraria,
Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural
Línea de investigación: Tecnología de la Producción Vegetal

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE CÍTRICOS, ENANIZANTES, SEMI-ENANIZANTES Y SUB-ESTÁNDAR, PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE PLANTACIÓN SOSTENIBLES EN ANDALUCÍA OCCIDENTAL

Autora: Áurea Hervalejo García
Sevilla, 2023

Directores:

Dr. Francisco José Arenas Arenas

Dra. María Paz Suárez García

Tutora:

Dra. María Paz Suárez García



Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural.

Universidad de Sevilla
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Programa de Doctorado Interuniversitario en Ingeniería Agraria,
Alimentaria, Forestal y del Desarrollo Rural
Línea de investigación: Tecnología de la Producción Vegetal

TESIS DOCTORAL

CARACTERIZACIÓN DE PATRONES DE CÍTRICOS, ENANIZANTES, SEMI-ENANIZANTES Y SUB-ESTÁNDAR, PARA EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE PLANTACIÓN SOSTENIBLES EN ANDALUCÍA OCCIDENTAL

Autora: Áurea Hervalejo García
Sevilla, 2023

La presente Tesis Doctoral cumple con los requisitos establecidos por la Universidad de Sevilla para su presentación por compendio de publicaciones, estando integrada por 3 artículos publicados en revistas incluidas en el listado correspondiente a su categoría científica en el <<Journal Citations Report>> (JCR) en el año de su publicación o en el último JCR publicado:

- **Hervalejo, A.**, Suárez, M.P., Moreno-Rojas, J.M., Arenas-Arenas, F.J., 2020. Overall fruit quality of `Lane Late´ orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks. J. Agr. Sci. Tech. Vol. 22(1), 235-246.

<http://jast.modares.ac.ir/article-23-16325-en.html>

Índice de impacto: 1,098 (JCR, 2020) (3^{er}Q)

Área y posición: Agriculture, Mutidisciplinary - SCIE (2020). Posición 35/57

- **Hervalejo, A.**, Suárez, M.P., Arenas-Arenas, F.J. 2021. Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks for more intensive, higher-density, and sustainable plantation systems. *Agronomy* 11, 660.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11040660>

Índice de impacto: 3,949 (JCR, 2021) (1^{er}Q)

Área y posición: Agronomy - SCIE (2021). Posición 18/90

- **Hervalejo, A.**, Arjona-López, J.M., Romero-Rodríguez, E., Arenas-Arenas, F.J., 2022. Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for `Salustiana´ orange trees grown under super-high-density conditions with mechanical harvesting. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.*, 1-12.

<https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2090385>

Índice de impacto: 1,094 (JCR, 2021) (3^{er} Q).

Área y posición: Horticulture - SCIE (2021). Posición 26/36.

*Naranja en maceta, ¡qué triste es tu suerte!
Medrosas tiritan tus hojas menguadas.
Naranja en la corte, qué pena da verte
con tus naranjitas secas y arrugadas.
Pobre limonero de fruto amarillo
cual pomo pulido de pálida cera,
¡qué pena mirarte, mísero arbolillo
criado en mezquino tonel de madera!
De los claros bosques de la Andalucía,
¿quién os trajo a esta castellana tierra
que barren los vientos de la adusta sierra,
hijos de los campos de la tierra mía?
¡Gloria de los huertos, árbol limonero,
que enciendes los frutos de pálido oro
y alumbras del negro cipresal austero
las quietas plegarias erguidas en coro;
y fresco naranja del patio querido,
del campo risueño y el huerto soñado,
siempre en mi recuerdo maduro o florido
de frondas y aromas y frutos cargado!*

Antonio Machado – A un naranja y un limonero

A mis padres

Agradecimientos

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna manera me han ayudado en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Al Dr. Francisco José Arenas Arenas, director de esta tesis doctoral, quien me acogió en su equipo del departamento de cítricos del IFAPA Las Torres, brindándome la oportunidad de crecer y desarrollarme en una profesión tan fascinante. Gracias por confiar en mí para el desarrollo de este trabajo de investigación. Por tu orientación, tu experiencia y tu dedicación en el desarrollo de esta tesis doctoral, ¡gracias!

A mi tutora y directora de tesis, Dra. María Paz Suárez García, por guiarme a lo largo de estos años, por su paciencia, entrega y disponibilidad. Me siento afortunada por haber tenido tu apoyo y confianza.

A los profesores investigadores de mi Programa de Doctorado de la Universidad de Sevilla, especialmente al Dr. Antonio Delgado por su orientación y ayuda cuando la he necesitado.

Al Dr. Leandro Olalla Mercadé, por acogerme en el IFAPA de Churriana (Málaga), con aquella beca de tecnólogo que supuso el inicio de mi carrera profesional. A mis primeros compañeros de Churriana, especialmente a Elsa, Manolo y Sofía, por los años que hemos compartido dentro y fuera del trabajo. Al Dr. Antonio Fayos, por compartir sus conocimientos en metodología experimental de campo y análisis de calidad en cítricos.

A mis compañeros del IFAPA Centro Las Torres (Sevilla) que han trabajado conmigo en estos años, por el tiempo que hemos compartido, por hacer más ameno el día a día y por el trabajo en equipo. Quisiera agradecer en especial a mis compañeros Estefanía y Juanma, por su aportación y apoyo en la realización de esta tesis.

Al Dr. José Manuel Moreno y su equipo, del IFAPA Alameda del Obispo (Córdoba), por los conocimientos y el apoyo en los trabajos de calidad funcional de los cítricos, esenciales para completar uno de los trabajos de esta tesis.

A Joan Torrents y la Dra. Mireia Bordas, de Agromillora S.A., por su colaboración con IFAPA en el desarrollo del cultivo de súper alta densidad en cítricos. Gracias por compartir vuestros conocimientos y experiencia adquirida en otros cultivos.

Al Dr. Juan Bautista Forner y Dra. María Ángeles Forner, del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), por sus clases durante mi formación en Valencia, de las que tanto aprendí sobre los patrones de cítricos, y por la aportación del material vegetal de las parcelas experimentales de este trabajo de investigación.

A J.C. Rituerto y J.M. Gersol, por ofrecer la parcela, y a Lora Lora Hnos S.A., por prestar el equipo de recolección, ambas aportaciones imprescindibles para la realización del trabajo del segundo capítulo de esta tesis.

A mi amiga Toñi, por estar siempre disponible, para lo bueno y lo no tan bueno y por su cariño. Gracias por alegrarte de mis logros y asesorarme ante las dificultades. A mi grupo de quedadas, Pili, José, Mar, José Luis, Juan, Nuria, María y Juanfran, por su alegría y porque cualquier momento es bueno para juntarnos y pasar un buen rato. Gracias a Ana y Edu, por su amistad y por los ratos que pasamos juntos.

Gracias a mi familia, el principal motor y pilar de mi vida, sin ellos nada de esto hubiese sido posible. Gracias a mis padres, Manolo y Auri, por la vida, por el amor incondicional, por la educación y los estudios que me han dado y por la confianza que siempre han depositado en mí. Gracias por animarme y apoyarme en todo momento. Gracias a mi hermano Guille por estar siempre ahí a pesar de la distancia, porque siempre puedo contar con él, por su cariño, su interés, su apoyo y sus buenos consejos.

A Juanfer, por su amor, comprensión y paciencia a lo largo de todos estos años. Gracias porque siempre te has comprometido con cada uno de mis proyectos profesionales, como ha sido el desarrollo de esta tesis doctoral. Sin ti todo este proceso hubiese sido mucho más difícil. A mis hijos, Alejandro y Daniel, la luz de mi vida, porque estar con ellos es olvidarse de cualquier preocupación. ¡Gracias por llenar mi vida y gracias por tanta felicidad!

Gracias a mis tíos, Maruchi, Ángel y Juan, por formar parte de mi familia y de mi vida. A mis cuñados, Maribel, Jordi y Cristina, por el cariño y el apoyo recibido, a mis sobrinos, Pablo, Nicolás, Jaime y Nacho, por la ilusión y la alegría que aportan a la familia. Gracias a Chana, por su apoyo y las veces que se ha preocupado para que tuviera más tiempo para trabajar.

Gracias a Dios, por la vida, la salud, la familia, los amigos, los compañeros, los docentes y cada una de las circunstancias y acontecimientos de mi vida que han llevado y permitido la realización y finalización de esta tesis doctoral.

Índice General

	Página
ÍNDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFÍAS	13
ÍNDICE DE TABLAS	15
ABREVIATURAS	17
RESUMEN	19
Summary	25
INTRODUCCIÓN	29
1. El cultivo de los cítricos	31
1.1. Taxonomía de los cítricos	31
1.2. Origen y difusión de los cítricos.....	33
1.2.1. Origen de los cítricos.....	34
1.2.2. Difusión de los cítricos.....	36
1.3. Historia de los cítricos en España	38
1.4. Importancia de los cítricos.....	40
1.4.1 Mundial.....	40
1.4.2. Nacional	41
1.4.3. Autonómica	42
2. Nuevos desafíos del cultivo de los cítricos	43
2.1. El crecimiento demográfico	44
2.2. El cambio climático	45
2.3. La globalización	46
2.3.1. Plagas y enfermedades emergentes	46
2.3.2. Incremento de la competencia con terceros países.....	47
2.4. Nuevos gustos del consumidor europeo.....	47
2.5. Estrategia “De la Granja a la Mesa”	48
3. Intensificación sostenible del cultivo de los cítricos	48
3.1. Patrones de cítricos	49
3.1.1. Importancia del patrón.....	49
3.1.2. Evolución de los patrones de cítricos en España.....	49
3.1.3. Programa de mejora genética de patrones en el IVIA.....	52
3.2. Densidad de la plantación	53
3.2.1. Evolución de la densidad de plantación en España.....	53
3.2.2. Plantaciones de cítricos de mayor densidad.....	56
3.3. Recolección mecanizada del cultivo.....	59
3.3.1. Equipos de recolección mecanizada	59

3.3.2. El cultivo superintensivo de cítricos	62
OBJETIVOS	65
CAPÍTULOS	69
Capítulo I. Caracterización agronómica de diferentes patrones de cítricos, sub-estándar y semi-enanizantes, interesantes para un sistema de plantación de alta densidad	71
Artículo 1. Overall fruit quality of `Lane Late` orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks	73
Artículo 2. Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks for more intensive, higher-density, and sustainable plantation systems	75
Capítulo II. Evaluación de dos patrones de cítricos enanizantes bajo condiciones de cultivo de súper alta densidad con recolección mecanizada .	77
Artículo 3. Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for `Salustiana` orange trees grown under super-high-density conditions with mechanical harvesting	79
DISCUSIÓN GENERAL	81
1. Patrones de cítricos	83
1.1. Patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes.....	83
1.1.1. Estado nutricional de los árboles de `Lane Late`	83
1.1.2. Crecimiento vegetativo de los árboles de `Lane Late`	86
1.1.3. Productividad de los árboles de `Lane Late`	87
1.1.4. Maduración y calidad de la fruta de naranja `Lane Late`	88
1.2. Patrones de cítricos enanizantes.....	92
1.2.1. Tamaño de los árboles de `Salustiana`	92
1.2.2. Productividad de los árboles de `Salustiana`	93
1.2.3. Calidad de la fruta de naranja `Salustiana`	94
2. Densidad de plantación	94
2.1. Sistemas de plantación convencional.....	94
2.2. Sistemas de plantación de alta densidad	95
2.3. Sistemas de plantación de súper alta densidad.....	96
3. Recolección mecanizada.....	98
CONCLUSIONES	101
BIBLIOGRAFÍA DE INTRODUCCIÓN Y DISCUSIÓN GENERAL.....	105
OTRAS APORTACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS	119

Índice de Figuras y Fotografías

FIGURAS

Figura 1. Zonas geográficas de origen de los cítricos. Fuente: Elaboración propia a partir de Wu et al. (2018) y Talon et al. (2020)	36
Figura 2. Distribución geográfica de los principales productores de cítricos. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FAOSTAT (2023)	41
Figura 3. Crecimiento demográfico mundial. Fuente: FAO, 2017	44
Figura 4. a) Escasez física de los recursos hídricos (FAO, 2011); b) Vulnerabilidad a la desertificación (USDA-NRCS, 1998)	45

FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. ‘Naranja del Rey Don Pedro de Castilla’ en los jardines del Alcázar de Sevilla. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	39
Fotografía 2. Plantación tradicional de cítricos en Andalucía. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	54
Fotografía 3. Plantación de cítricos convencional con marcos de plantación de 6 x 4 m. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	55
Fotografía 4. Plantación de cítricos en súper alta densidad en un marco de plantación de 3,5 x 1,0 m. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres.....	55
Fotografía 5. Detalle de la poda mecanizada en una plantación de cítricos en súper alta densidad. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	59
Fotografía 6. Equipo vibrador de tronco. Fuente: Chueca et al., 2020	60
Fotografía 7. Equipo sacudidor de copa accionado y remolcado por tractor y con derribo de la fruta al suelo (OXBO 3210). Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	61
Fotografía 8. Sacudidores de copa autopropulsados con estructuras de recogida (OXBO 3220) trabajando de forma sincronizada ambos lados de la línea de plantación. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	62
Fotografía 9. Sacudidor de copa cabalgante autopropulsada (Colossus). Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres	62
Fotografía 10. Equipo sacudidor de copa cabalgante ‘tipo vendimiadora’ (New Holland Braud 9090X): a) Detalle de los árboles antes del pase del equipo; b) Detalle de los árboles tras el pase del equipo. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres.....	63

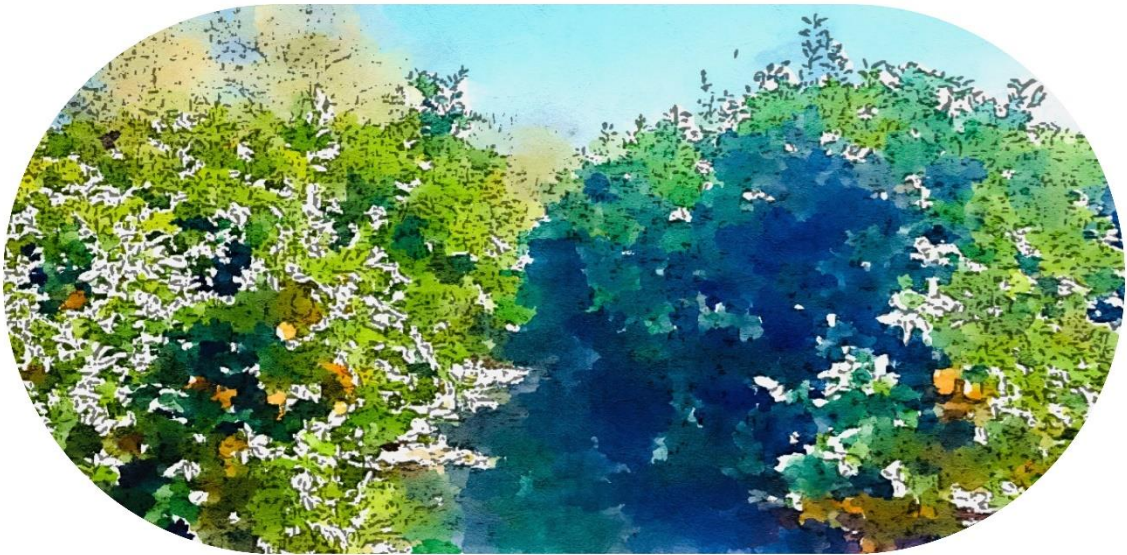
Índice de Tablas

	Página
Tabla 1. Familia Rutaceae, Subfamilia Aurantioidea, Tribu <i>Citreae</i> , Subtribu <i>Citrinae</i> , Grupo Cítricos Verdaderos.....	33

Abreviaturas

µg	Microgramos
%	Tanto por ciento
°Brix	Grados Brix
°C	Grados centígrados
ABI	Índice de alternancia de cosecha
a.C.	Antes de Cristo
B	Boro
Ca	Calcio
cc	Centímetros cúbicos
cm	Centímetros
CTV	Virus de la tristeza de los cítricos
Cu	Cobre
D	Diámetro
D²	Diámetro cuadrado de la proyección horizontal de la copa de árbol
Dr	Diámetro de tronco del patrón
Ds	Diámetro de tronco de la variedad
EG	Equivalentes de ácido gálico
EMBRAPA	Corporación Brasileña de Investigación Agraria
EQ	Equivalentes de quercitina
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FAOSTAT	Estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
FA-5	Forner-Alcaide nº 5
FA-13	Forner-Alcaide nº 13
FA-41	Forner-Alcaide nº 41
FA-418	Forner-Alcaide nº 418
FA-517	Forner-Alcaide nº 517
Fe	Hierro
FRF	Fuerza de retención del fruto
FW	Peso fresco
g	Gramos
GEI	Gases de efecto invernadero
H	Altura
ha	Hectáreas
HLB	Enfermedad Huanglongbing de los cítricos

IFAPA	Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica
ITPS	Intergovernmental Technical Panel on Soils
IVIA	Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias
K	Potasio
kg	Kilogramos
km	Kilómetros
m	Metros lineales
m²	Metros cuadrados
m³	Metros cúbicos
mL	Mililitros
mm	Milímetros
MAPA	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación
Mg	Magnesio
mg	Miligramos
mills	Millones
mm	Milímetros
Mn	Manganeso
nº	Número
N	Nitrógeno
NRCS	Natural Resources Conservation Service
P	Fósforo
pH	Potencial de hidrógeno
ppm	Partes por millón
P.R.A.	Producción de la Rama Agraria
r	Coeficiente de correlación de Pearson
RI	Índice de madurez interna
rpm	Revoluciones por minuto
SAU	Superficie Agraria Útil
spp	Especies de
TSS	Sólidos solubles totales
t	Toneladas
TA	Acidez total
UE	Unión Europea
USDA	United States Department of Agriculture
Zn	Zinc



RESUMEN

Resumen

Los cítricos, originarios del sureste asiático, pertenecen al orden Geraniales, familia Rutaceae y subfamilia Aurantioideae. Dentro de esta subfamilia, los cítricos de mayor importancia económica se engloban dentro de la tribu *Citreae*, subtribu *Citrinae*, grupo Cítricos Verdaderos, género *Citrus* y subgénero *Eucitrus*. Hoy en día los cítricos se cultivan en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales del planeta con un total de 161,8 millones de toneladas, siendo España el quinto país productor (6,7 mills t) a nivel mundial y el primer productor de la Unión Europea. España destaca también como primer país exportador de cítricos para consumo en fresco (3,6 mills t). En España, Andalucía se sitúa como la segunda Comunidad Autónoma productora de cítricos (2,7 mills t), con un claro predominio del cultivo del naranjo dulce (69,58 % de la superficie de cítricos), seguido del de mandarino (21,40 %), limón (7,46 %), pomelo (0,93 %) y otros cítricos (0,28 %). El cultivo de los cítricos en Andalucía se presenta como un sector agrario de gran importancia territorial (83.180 ha), económica (844 mills euros) y social (5,9 mills jornales).

Los nuevos desafíos a los que se enfrenta la citricultura española en general, como consecuencia del incremento de la población mundial, el cambio climático, la globalización, los nuevos gustos del consumidor y los nuevos compromisos europeos en materia de sostenibilidad, requieren del desarrollo e implementación de nuevas tecnologías que permitan una citricultura más competitiva, resiliente y sostenible. Ante esta situación, la intensificación sostenible del cultivo se presenta como una estrategia de gran interés, en la que se identifican tres pilares fundamentales: la adecuada elección del patrón, la mayor densidad de plantación y la mecanización del cultivo. En este sentido, adquiere una gran importancia el estudio de nuevos patrones de cítricos compatibles con este nuevo modelo de producción: patrones de reducido porte, alta eficiencia productiva y óptima calidad de fruta inducida sobre la variedad.

Aunque actualmente existen diferentes patrones con la capacidad de reducir el tamaño del árbol, no todos proporcionan un incremento en la eficiencia productiva de la variedad. Es por tal motivo que *Poncirus trifoliata* `Flying dragon´ es el patrón principalmente establecido en plantaciones de cítricos de mayor densidad. No obstante, este patrón no presenta buena adaptación a las características típicas de los suelos del Mediterráneo, requiriéndose de la evaluación de nuevos patrones de cítricos de reducido porte bajo condiciones locales de cultivo, tales como las de Andalucía. En el caso concreto del cultivo superintensivo, o cultivo de súper alta densidad con mecanización integral del cultivo, otro factor de gran importancia a tener en cuenta es la respuesta de

la plantación, y la adecuación de nuevos patrones de cítricos, a la recolección mecanizada.

Por tales motivos, el objetivo de este trabajo de tesis ha sido evaluar la idoneidad y el interés agronómico de varios patrones de cítricos de menor porte, sub-estándar (Forner-Alcaide nº 5 (FA-5)), semi-enanizantes (Forner-Alcaide nº 13 (FA-13) y Forner-Alcaide nº 41 (FA-41)) y enanizantes (Forner-Alcaide nº 418 (FA-418) y Forner-Alcaide nº 517 (FA-517)) del programa de mejora genética del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA, España), para el desarrollo de diferentes modelos de intensificación sostenible de los cítricos, compatibles con la diversidad física y socioeconómica de la citricultura andaluza, bajo condiciones edafo-climáticas de Andalucía Occidental. Este objetivo ha sido desarrollado en dos capítulos, cada uno de ellos orientado a un grado de intensificación diferente:

I. Caracterización agronómica de diferentes patrones de cítricos, sub-estándar y semi-enanizantes, interesantes para un sistema de plantación de alta densidad.

II. Evaluación agronómica de dos patrones de cítricos enanizantes bajo condiciones de cultivo de súper alta densidad con recolección mecanizada.

En el **capítulo I** se integran dos artículos en los que, por un lado, se caracteriza la calidad general de la naranja 'Lane Late' sobre tres patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes y, por otro lado, se evalúa la idoneidad de estos patrones para sistemas de plantación de 'Lane Late' más sostenibles y de mayor densidad.

En España, el destino principal de las naranjas del grupo Navel es el mercado para fresco, por lo que tanto la calidad externa como la calidad organoléptica de la fruta son aspectos de gran importancia. No obstante, la creciente preocupación de la población por un estilo de vida más saludable ha despertado en el consumidor una especial atención por las propiedades promotoras de la salud de la fruta. En este sentido, adquiere un gran interés el patrón de los cítricos, el cual tiene la capacidad de influir sobre la calidad general de la fruta, además de sobre otros aspectos de la plantación que son relevantes para afrontar los principales retos a los que se enfrenta el sector: rentabilidad económica y sostenibilidad ambiental.

Por ello, en el **primer artículo** del capítulo I se caracterizó la apariencia (calidad externa), el sabor (calidad organoléptica) y los compuestos bioactivos o promotores de la salud (calidad funcional) de la naranja 'Lane Late' sobre tres patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes (FA-5, FA-13 y FA-41) frente a tres patrones tradicionales (citrange Carrizo, *Citrus macrophylla* y mandarino 'Cleopatra') en una parcela

experimental ubicada en el Valle del Guadalquivir (Sevilla). Para ello se analizaron diferentes *parámetros morfológicos*: índice de color, peso, diámetro ecuatorial (D; mm), altura (H; mm), forma (D/H) y espesor de la corteza de la fruta (mm); *organolépticos*: contenido en zumo (%), densidad (g/mL), acidez total (TA; g/100 mL), sólidos solubles totales (TSS; °Brix) e índice de madurez (RI = TSS/TA); y *funcionales*: flavonoides (μg EQ/g FW) y polifenoles (mg EG/100 g FW) totales, además de la *firmeza interna* y la incidencia de dos *alteraciones fisiológicas* (granulación y clareta) en la fruta de 'Lane Late'. En este trabajo se obtuvieron diferencias entre patrones tanto en el momento óptimo de recolección como en la calidad general de la fruta. Mandarino 'Cleopatra', FA-13 y FA-5 indujeron una fecha óptima de recolección más tardía, y más competitiva para 'Lane Late', así como una mayor calidad interna de la fruta, lo que en el caso de mandarino 'Cleopatra' y FA-13 se acompañó también de un mayor valor funcional.

En el **segundo artículo** del capítulo I se evaluó el comportamiento agronómico de 'Lane Late' sobre los tres patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes (FA-5, FA-13 y FA-41) en comparación con los tradicionales (c. Carrizo, *C. macrophylla* y mandarino 'Cleopatra') en una parcela experimental del Valle del Guadalquivir (Sevilla) en condiciones de baja fertilización. Para ello se registraron, o calcularon, diferentes *parámetros de la biometría del árbol*: altura del árbol (m), diámetro (m) y volumen de copa (m^3), así como diámetros de tronco del patrón (D_r ; cm) y de la variedad (D_s ; cm); *de la afinidad del patrón con la variedad* (D_r/D_s); *de la productividad*: producción por árbol (kg/árbol), eficiencia productiva (kg/m^3) e índice de alternancia en la cosecha (ABI; %); y *del estado nutricional del árbol*: análisis foliares de los macro (%) y micronutrientes (ppm). FA-13 y FA-41 indujeron un menor tamaño en los árboles de 'Lane Late'. Sin diferencias significativas, la eficiencia productiva de 'Lane Late' (kg/m^3) fue superior en *C. macrophylla*, mandarino 'Cleopatra' y FA-13. Estas dos características le otorgaron a FA-13 un alto potencial productivo (kg/ha) ante la posibilidad de estrechar la distancia entre árboles, reduciendo el marco de plantación. Por otro lado, FA-13 destacó como el patrón más eficiente en el uso de los nutrientes del suelo, mostrándose como el patrón de mayor interés para sistemas de plantación de 'Lane Late' más sostenibles y de mayor densidad bajo condiciones mediterráneas similares a las del estudio.

En el **capítulo II** se evaluó la idoneidad de dos patrones de cítricos enanizantes, FA-418 y FA-517, para el cultivo de 'Salustiana' en condiciones de súper alta densidad y recolección mecanizada.

A pesar de que los sistemas de plantación de súper alta densidad podrían maximizar el rendimiento por hectárea e inducir una entrada en producción más temprana del cultivo, pocos estudios de investigación han sido llevados a cabo en cítricos en la Cuenca del Mediterráneo. Por otro lado, teniendo en cuenta que la recolección de la fruta constituye el principal coste de cultivo y que la mano de obra disponible para dicha operación es cada vez más escasa, un adecuado sistema de recolección mecanizada se muestra esencial para la mejora de la competitividad de estos sistemas de plantación en cítricos. Por tal motivo, en este capítulo se incluye un **tercer artículo** en el que se evaluó el comportamiento agronómico (crecimiento vegetativo, producción y calidad de fruta) de 'Salustiana' sobre dos patrones de cítricos enanizantes (FA-418 y FA-517) en una plantación de súper alta densidad localizada en Huelva. En esta misma plantación se evaluó la recolección mecanizada con un equipo sacudidor de copa cabalgante 'tipo vendimiadora', en el que se evaluó para cada patrón *el porcentaje de fruta derribada y recolectada por el equipo y el daño ocasionado sobre la estructura del árbol*, determinándose también *el potencial de estos equipos de recolección en plantaciones de cítricos de súper alta densidad*. FA-517 destacó por inducir sobre la plantación de 'Salustiana' un mejor comportamiento en términos de crecimiento vegetativo, eficiencia productiva (kg/m^3) y calidad de fruta, presentando además una mejor respuesta frente a la recolección mecanizada (alto porcentaje de derribo). Por otro lado, en este trabajo se identificó un alto potencial de los equipos sacudidores de copa cabalgantes 'tipo vendimiadora' en la recolección de plantaciones de cítricos de súper alta densidad con destino a la industria, reafirmando la importancia de la adaptación previa de los árboles (formación en seto continuo de dimensiones controladas mediante poda mecanizada).

Summary

Citrus, native to Southeast Asia, belongs to the Geraniales order, Rutaceae family, and Aurantioideae subfamily. Within this subfamily, the most economically important citrus fruits are included in the *Citreae* tribe, *Citrinae* subtribe, True Citrus group, *Citrus* genus and *Eucitrus* subgenus.

Currently, citrus fruits are grown in most of the tropical and subtropical regions of the planet with a total of 161.8 million tonnes (million t), Spain being the fifth producer of citrus fruits (6.7 million t) worldwide, and the largest producer of the European Union. Spain also stands out as the first exporter of citrus fruits for fresh consumption (3.6 million t). In Spain, Andalusia is the second citrus producing Autonomous Community (2.7 million t), with a clear predominance of sweet orange crop (69.58 % of the citrus area), followed by mandarin (21.40%), lemon (7.46%), grapefruit (0.93%) and other citrus fruits (0.28%). Citrus cultivation in Andalusia is an agricultural sector of great territorial (83,180 ha), economic (844 million euros) and social (5.9 million wages) importance.

The new challenges facing Spanish citrus crops, as a result of the increase in world population, climate change, globalization, new consumer tastes and new European commitments to sustainability, require the development and implementation of new technologies that allow a more competitive, resilient and sustainable citrus crop.

In this situation, the sustainable intensification of the citrus crop is a strategy of great interest, in which three fundamental pillars are identified: the appropriate choice of rootstock, higher tree density and crop mechanization. In this sense, the study of new citrus rootstocks compatible with this new plantation system is of great relevance: citrus rootstocks that induce on the cultivar a reduced tree size, a high yield efficiency, and an optimal fruit quality.

Although there are different citrus rootstocks with the capacity to reduce the tree size, not all of them provide an increase in the cultivar yield efficiency. For this reason, *Poncirus trifoliata* 'Flying dragon' is the main rootstock established in higher density citrus plantations. However, this citrus rootstock is not well adapted to the typical characteristics Mediterranean soil, requiring the evaluation of new size-controlling citrus rootstocks under local growing conditions, such as those of Andalusia. In the specific case of super-intensive citrus crop, or super high-density plantation with integral crop mechanization, both the response of the plantation and the adaptation of the new citrus rootstocks to mechanical harvesting must be considered.

Thus, the objective of this thesis work has been to evaluate the suitability and agronomic behavior of several size-controlling citrus rootstocks, sub-standard (Forner-Alcaide no. 5 (FA-5)), semi-dwarfing (Forner-Alcaide no. 13 (FA-13) and Forner-Alcaide no. 41 (FA-41)) and dwarfing (Forner-Alcaide no. 418 (FA-418) and Forner-Alcaide no. 517 (FA-517)) from the program for breeding citrus rootstocks of the Valencian Institute of Agricultural Research (IVIA, Spain), for the development of different models of sustainable intensification of citrus, consistent with the physical and socioeconomic diversity of Andalusian citrus sector, under soil and climatic conditions of the Andalusian citrus region.

This doctoral thesis is structured in two chapters, each one oriented to a different degree of intensification:

- I. Agronomic characterization of different citrus rootstocks, sub-standard and semi-dwarfing, interesting for a high-density plantation system.
- II. Agronomic evaluation of two dwarfing citrus rootstocks under super high density conditions with mechanical harvesting.

Chapter I integrates two articles in which, on the one hand, the general quality of the 'Lane Late' orange fruit is characterized on three sub-standard and semi-dwarfing citrus rootstocks and, on the other hand, the suitability of these rootstocks for more sustainable and higher density 'Lane Late' plantation systems is evaluated.

In Spain, most Navel orange fruits are used for fresh consumption, thus, both the external and organoleptic fruit quality are of great importance. In addition, the growing concern of the population for a healthier lifestyle has awakened in the consumer a special attention for the health-promoting properties of the fruit. In this sense, the citrus rootstock is of great interest as it has the ability to influence the overall fruit quality, in addition to other interesting aspects of the plantation to confront the main challenges facing the sector: economic profitability and environmental sustainability.

For this reason, in the **first article of Chapter I**, appearance (external quality), taste (organoleptic quality) and bioactive or health promoting compounds (functional quality) of 'Lane Late' orange fruit on three substandard or semi-dwarfing rootstocks (FA-5, FA-13 and FA-41) were evaluated in comparison with three conventional citrus rootstocks (Carrizo citrange, *Citrus macrophylla* and 'Cleopatra' mandarin) in an experimental plot located in the Guadalquivir Valley (Seville). For that, *morphological* (color index, weight, equatorial diameter (D; mm), height (H; mm), shape (D/H) and fruit peel thickness (mm)), *organoleptic* (juice content (%), density (g/mL), titrable acidity (TA; g/100 mL), total

soluble solids (TSS; °Brix) and ripening index (RI = TSS/TA)) and *functional parameters* (total flavonoids (µg EQ/g FW) and polyphenolics (mg EG/100 g FW) contents) were analyzed, in addition to the *internal firmness* and the incidence of two *physiological disorders* (granulation and creasing), in 'Lane Late' orange fruit.

In this study, differences among rootstocks were obtained both in the optimal harvesting time and in the overall fruit quality. 'Cleopatra' mandarin, FA-13 and FA-5 induced a later optimum harvesting time, more competitive for 'Lane Late', as well as a higher internal fruit quality, which in the case of 'Cleopatra' mandarin and FA-13 was also associated with a higher functional quality.

In the **second article of Chapter I**, the agronomic performance of the 'Lane Late' orange cultivar on three substandard or semi-dwarfing citrus rootstocks (FA-5, FA-13 and FA-41) were evaluated in comparison with conventional citrus rootstocks (Carrizo c., *C. macrophylla* and 'Cleopatra' mandarin) in an experimental plot located in Guadalquivir Valley (Seville) under a poor mineral fertilization. For this purpose, *tree vegetative growth parameters* (tree height (m), canopy diameter (m), canopy volume (m³) and rootstock (Dr; cm) and cultivar (Ds; cm) trunk diameters), *rootstock-scion affinity* (Dr/Ds), *productivity* (yield per tree (kg/tree) and yield efficiency (kg/m³)) and *alternate bearing index* (ABI; %) were measured or calculated. The *tree nutritional status* was also evaluated by analysis of the leaf macro (%) and micronutrients (ppm) contents. FA-13 and FA-41 induced the smallest 'Lane Late' trees. Without significant differences, the yield efficiency (kg/m³) in 'Lane Late' trees was higher on *C. macrophylla*, 'Cleopatra' mandarin and FA-13. Thus, FA-13 showed a high productive potential (kg/ha), given the higher yield efficiency and the possibility of narrowing the tree spacing distance between trees. On the other hand, FA-13 was the most efficient citrus rootstock in the use of soil nutrients, showing itself as the most interesting citrus rootstock for more sustainable and higher density 'Lane Late' plantation systems under Mediterranean conditions, similar to those of the study.

In the **chapter II**, the suitability of two dwarfing citrus rootstocks for 'Salustiana' orange trees grown under super high-density conditions with mechanical harvesting was evaluated.

Even though super high-density plantation systems could maximize yield per hectare and induce an early entry production, few research studies have been conducted on citrus crops in the Mediterranean Basin.

On the other hand, considering that the harvesting constitutes the main production cost for citrus crops in Spain and that the labor available for this operation is increasingly

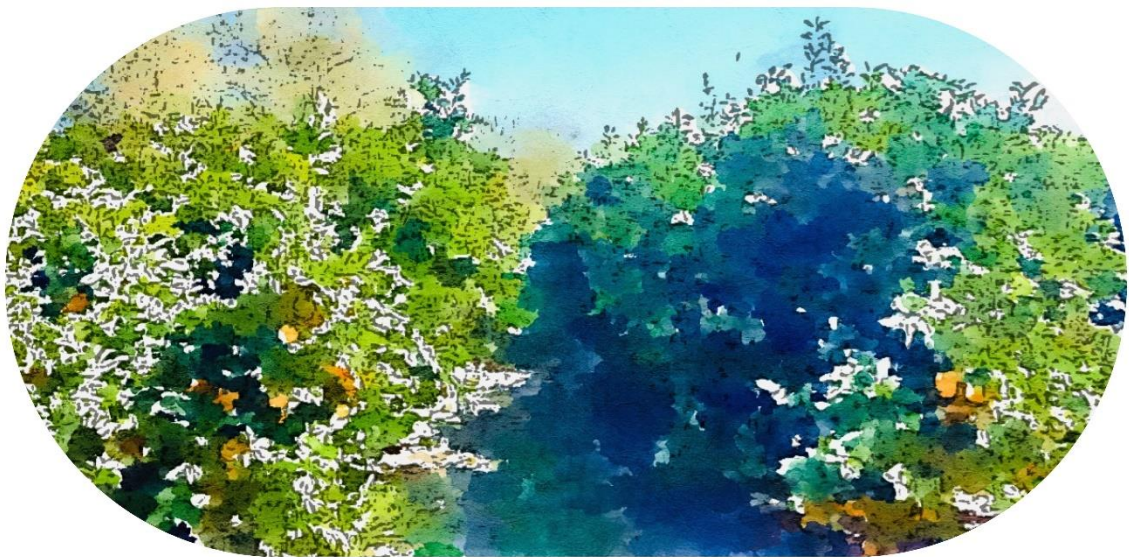
scarce, an adequate mechanical harvesting system is essential for improving the competitiveness of these citrus plantation systems.

For this reason, this chapter includes a **third article** in which the agronomic behavior (vegetative growth, yield and fruit quality) of 'Salustiana' was evaluated on two dwarfing citrus rootstocks (FA-418 and FA-517) in a super high-density citrus plantation in Huelva.

In this citrus plantation, mechanical harvesting was evaluated using an over-the-row continuous canopy shaker, in which the percentage of the fruit detached and harvested by the equipment, and the tree structure damage caused by the harvesting equipment were evaluated for each rootstock, also determining the potential of these harvesting equipment for super high-density citrus plantations.

FA-517 stood out for inducing a better performance on the 'Salustiana' citrus plantation in terms of vegetative growth, yield efficiency (kg/m^3) and fruit quality, also displaying a better response to mechanical harvesting, with a high detachment efficiency of fruits.

On the other hand, this work identified the high potential of the over-the-row canopy shaker 'grape harvester type' for harvesting super high-density citrus plantations for the juice industry, reaffirming the importance of the previous adaptation of the trees (lifting of low branches and disposal in the continuous hedge by mechanical pruning).



INTRODUCCIÓN

1. El cultivo de los cítricos

1.1. Taxonomía de los cítricos

Los cítricos pertenecen al orden Geraniales, familia Rutaceae y subfamilia Aurantioideae. Dentro de esta subfamilia existen dos tribus, *Clauseneae* (con 5 géneros) y *Citreae* (con 28 géneros) (Swingle y Reece, 1967). Dentro de la tribu *Citreae*, destaca la subtribu *Citrinae* en la que se encuentra el grupo de los cítricos verdaderos, un grupo de plantas cuyos frutos son semejantes a los cítricos comerciales (Zaragoza, 2016a), y en el que a su vez se incluyen 6 géneros: *Eremocitrus*, *Microcitrus*, *Clymenia*, *Fortunella*, *Poncirus* y *Citrus* (Swingle y Reece, 1967; Zaragoza, 2016a) (**Tabla 1**). La mayor parte de las especies de cítricos cultivadas pertenecen a los tres últimos géneros mencionados, siendo el género *Citrus* la base fundamental de la citricultura comercial.

Los géneros ***Clymenia*** y ***Eremocitrus*** cuentan con una sola especie: *C. polyandra* (Tan.) Swing. y *E. glauca* (Lind.) Swing., respectivamente (**Tabla 1**). *E. glauca* (Lind.) Swing. es un arbusto xerófito nativo de las regiones áridas y semiáridas de Australia. Su fruto, conocido como lima del desierto es un ingrediente de la cocina tradicional aborígen.

El género ***Microcitrus*** (limero salvaje) incluye 6 especies (**Tabla 1**): *M. warburgiana* (F.M. Bail.) Tan., *M. australasica* (F. Muell.) Swing., *M. australis* (Planch.) Swing., *M. garrowayi* (F.M. Bail.) Swing., *M. inodora* (F.M. Bail.) Swing. y *M. maideniana* (Domin.) Swing. Arbustos xerófitos endémicos de las zonas desérticas de Nueva Guinea y Australia. El fruto de *M. australasiaca*, conocido como ‘caviar de los cítricos’, por sus vesículas redondeadas, ha despertado cierto interés como ingrediente en recetas de la alta cocina.

El género ***Fortunella*** incluye 4 especies conocidas con el nombre de Kumquats (**Tabla 1**): *F. margarita* (Lour.) Swing.; *F. japonica* (Thunb.) Swing.; *F. polyandra* (Ridl.) Tan. y *F. hindsii* (Champ) Swing (Zaragoza, 2016a). Especies tradicionalmente cultivadas en China y apreciadas por su pequeño fruto comestible de corteza dulce.

El género ***Poncirus*** con una única especie reconocida: *P. trifoliata* (L.) Raf. o naranjo trifoliado (**Tabla 1**), utilizado como patrón o parental en programas de mejora genética por algunos de los caracteres de interés agronómico inducidos sobre la variedad (reducción del porte del árbol, tolerancia al virus de la tristeza (CTV), al nematodo de los cítricos *Tylenchulus* spp. y al hongo *Phytophthora* spp., resistencia al frío y buena calidad de fruta) (Bitters, 1986). Parental de algunos de los patrones más utilizados en España, como es el caso de citrange Carrizo (*Citrus sinensis* x *P. Trifoliata*).

El género **Citrus** se divide en dos subgéneros: *Papeda* y *Eucitrus* (**Tabla 1**). Ambos subgéneros se diferencian principalmente por las características de sus frutos. Así, mientras que *Papeda* presenta frutos de sabor acre y amargo, como consecuencia de los agregados de aceites esenciales, los frutos del subgénero *Eucitrus* contienen un jugo de sabor más o menos agradable, pudiendo ser ligeramente amargo, ácido o dulce (Zaragoza, 2016a). El subgénero *Papeda* cuenta con 9 especies: *Citrus ichangensis* Swing. (Papeda de Ichang), *C. latipes* (Swing.) Tan. (Papeda de Khasi), *C. hystrix* D.C. (Papeda de Mauricio), *C. micrantha* Wester (Papeda de flor pequeña), *C. celebica* Koord. (Papeda de Célebes), *C. macroptera* Montr. (Papeda de Melanesia), *C. halimii* B.C. Estone (Cidro de montaña), *C. weberii* Wester (Kalpi) y *C. longispina* Wester (Limero alado). Por otro lado, el subgénero *Eucitrus* cuenta con 10 especies: *Citrus medica* L. (Cidro), *C. grandis* (L.) Osb. (Zamboa o Pummelo), *C. reticulata* Blanco (Mandarino), *C. aurantium* L. (Naranja amargo), *C. limon* (L.) Burn (Limonero), *C. aurantifolia* (Christm.) Swing. (Limero), *C. sinensis* (L.) Osb. (Naranja dulce), *C. paradisi* Macf. (Pomelo), *C. indica* Tan. (Naranja silvestre) y *C. tachibana* (Mak) Tan (Mandarino Tachibana). Todas estas especies del subgénero *Eucitrus*, salvo *C. indica* Tan. y *C. tachibana* (Mak) Tan, son las especies de mayor importancia económica.

No obstante, nuevos estudios genómicos, filogenéticos y biogeográficos han obtenido resultados que desafían los actuales principios taxonómicos, apuntando hacia una reformulación del género *Citrus* (Ibañez et al., 2015; Wu et al., 2018; Ollitrault et al., 2020; Talon et al., 2020).

Tabla 1. Familia Rutaceae, Subfamilia Aurantioidea, Tribu *Citreae*, Subtribu *Citrinae*, Grupo Cítricos Verdaderos

GÉNERO	SUBGÉNERO	ESPECIES
<i>Clymenia</i>		<i>C. polyandra</i> (Tan.) Swing.
<i>Eremocitrus</i>		<i>E. glauca</i> (Lind.) Swing.
<i>Microcitrus</i>		<i>M. australasica</i> (F. Muell.) Swing.
		<i>M. australis</i> (Planch.) Swing.
		<i>M. garrowayi</i> (F.M. Bail) Swing.
		<i>M. inodora</i> (F.M. Bail) Swing.
		<i>M. maideniana</i> (Domin.) Swing.
		<i>M. warburgiana</i> (F.M. Bail.)
<i>Poncirus</i>		<i>P. trifoliata</i> (L.) Raf.
<i>Fortunella</i>		<i>F. margarita</i> (Lour.) Swing.
		<i>F. japonica</i> (Thunb.) Swing.
		<i>F. polyandra</i> (Ridl.) Tan.
		<i>F. hindsii</i> (Champ.) Swing.
<i>Citrus</i>	<i>Papeda</i>	<i>C. micrantha</i> Wester
		<i>C. ichangensis</i> Swing.
		<i>C. latipes</i> (Swing.) Tan.
		<i>C. hystrix</i> D.C.
		<i>C. celebica</i> Koord.
		<i>C. macroptera</i> Montr.
		<i>C. halimii</i> B.C. Estone
		<i>C. webberii</i> Wester
		<i>C. longispina</i> Wester
		<i>Eucitrus</i>
	<i>C. grandis</i> (L.) Osb.	
	<i>C. reticulata</i> Blanco	
	<i>C. aurantium</i> L.	
	<i>C. limon</i> (L.) Burm. f.	
	<i>C. aurantifolia</i> (Christm.) Swing.	
	<i>C. sinensis</i> (L.) Osb.	
	<i>C. paradisi</i> Macf.	
	<i>C. indica</i> Tan.	
	<i>C. tachibana</i> (Mak.) Tan.	

Fuente: Elaboración propia a partir de los trabajos de Swingle y Reece (1967) y de Zaragoza (2016a)

1.2. Origen y difusión de los cítricos

Durante el último siglo se han sugerido muchas hipótesis sobre el origen y la difusión de los cítricos estando todavía vinculadas a diversas controversias y leyendas.

1.2.1. Origen de los cítricos

Las referencias más antiguas que se tienen sobre los cítricos, o agrios, provienen de la mitología griega, en la que los cítricos se asocian con las “manzanas de oro”, las cuales aparecen formando parte del jardín de las Hespérides y cuya conquista se le atribuye a Hércules (Talon et al., 2020). Tal asociación mitológica, aceptada por nuestra tradición, se ha manifestado en diversos términos botánicos de los cítricos, tales como hesperidium, *C. aurantium*, Aurantioideae... Sin embargo, a diferencia de la leyenda mitológica, que ubica el origen de los cítricos en Occidente, en la actualidad, se propone el sureste asiático como la región principal de origen, de donde procede la gran mayoría (90%) de las especies de cítricos (Zaragoza, 2016a).

Así, según los estudios existentes en el tema, el género *Citrus* se considera originario del sureste asiático (Zaragoza 2016a), más concretamente del triángulo formado por el noreste de la India, el norte de Myanmar y el noreste de Yunnan (Talon et al., 2020), el género *Fortunella* del sureste de China (Zhou, 1990) y el género *Poncirus* de China central (Cooper, 1990).

Por el contrario, al género *Eremocitrus* se le considera originario de Australia (Sykes, 1997), el género *Clymenia* de Nueva Guinea (Zhou, 1990) y el género *Microcitrus* de Nueva Guinea y de Australia (Zaragoza, 2016a).

El género *Citrus* se originó a partir de un ancestro común que diversificó hace 8 millones de años en el sudeste asiático (Ibáñez et al., 2015), tal y como apoya el hallazgo de un espécimen fósil de la época del Mioceno tardío en la ciudad de Lincang, provincia de Yunnan (China), *C. liczangensis*, el cual mostró rasgos característicos de los principales grupos de cítricos actuales. Tradicionalmente se han propuesto tres especies originarias o ancestrales, *C. medica* (Cidro), *C. maxima* (Zamboa o Pummelo) y *C. reticulata* (Mandarino ancestral) (Wu et al., 2018; Talon et al., 2020), de las que surgieron los limones, las limas, las naranjas y los pomelos como híbridos de estas tres especies. Otros cítricos ancestrales reconocidos en estos trabajos han sido *F. margarita* (Kumquat) y *C. micrantha* (Micrantha), parentales femeninos del calamondín y de la lima mexicana, respectivamente, así como *C. ichangensis*.

Algunas de estas especies ancestrales sufrieron una migración desde el centro de su origen (Wu et al., 2018; Talon et al., 2020) (**Figura 1**), de la cual surgieron posteriormente, en una segunda radiación o intensificación de la diversidad, las especies de cítricos australianas (durante el principio del Plioceno) y la mandarina Tachibana (durante el Pleistoceno), ésta última nativa de Japón.

El resto de las especies tradicionales del género *Citrus* se generaron mediante cruzamientos interespecíficos entre las especies ancestrales (Wu et al., 2018; Talon et al., 2020): el naranjo amargo (*C. aurantium*) sería un cruce directo entre pummelo y mandarino ancestral; el naranjo dulce (*C. sinensis*) surgiría de una última hibridación entre retrocruces de dos híbridos iniciales e independientes de pummelo y mandarino; el pomelo (*C. paradisi*) sería hijo de un pummelo y un naranjo dulce; el limón (*C. limon*) procedería del cruce entre naranjo amargo y cidro; y la lima mejicana (*C. aurantifolia*), que sería un cruce entre micranta y cidro.

Las variedades de cítricos más modernas proceden de hibridaciones de las variedades tradicionales o de mutaciones espontáneas posteriores (Ibáñez et al., 2015). Además de las mutaciones y cruzamientos espontáneos ocurridos en la naturaleza, otros genotipos de cítricos (variedades y patrones) son resultado de la intervención del hombre mediante el empleo de las tecnologías de mejora genética. En este sentido es de destacar que el desarrollo de la biotecnología experimentado en las últimas décadas ha favorecido un importante auge de los programas de mejora genética en cítricos, tanto privados como públicos, a nivel mundial, en la búsqueda de nuevas variedades y patrones que den respuesta a las necesidades de cada región.

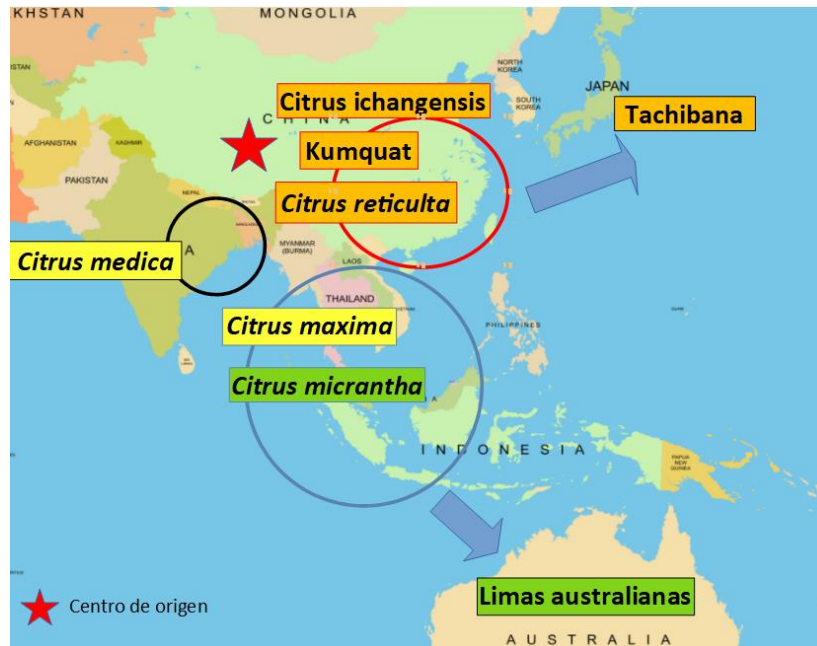


Figura 1. Zonas geográficas de origen de los cítricos. Fuente: Elaboración propia a partir de Wu et al. (2018) y Talon et al. (2020)

1.2.2. Difusión de los cítricos

Desde su área de origen los cítricos se extendieron hacia otras regiones siguiendo las rutas de las diferentes civilizaciones. Una de las hipótesis que se maneja es que desde Asia fueron llevados al norte de África y al sur de Europa, desde donde posteriormente con las expediciones de Cristóbal Colón fueron llevados a América.

El primer agrio conocido en Occidente fue el cidro (*Citrus medica*), originario del noreste de la India, Myanmar y suroeste de China (Lim, 2012), desde donde se extendió a áreas vecinas, adaptándose muy pronto al clima de Irán, Persia y Mesopotamia. En el siglo IV a.C., las tropas de Alejandro Magno tras encontrar el cidro en Asia, al cual bautizaron con el nombre de manzana de Persia (*Malus persicae*), lo introdujeron en la región mediterránea (Zaragoza, 2007; Deng et al., 2020). El cidro comenzó a cultivarse en Italia hacia los siglos III y IV (Zaragoza, 2007) y fue el primer y único representante de los cítricos en Europa hasta el siglo VII (Deng et al., 2020). Como consecuencia de las fluidas relaciones entre Roma e Hispania, el cidro era una planta ya apreciada en la Península Ibérica antes de la llegada de los árabes en el año 719 (Zaragoza, 2016b).

El naranjo amargo (*Citrus aurantium*) generalmente considerado nativo del sureste de Asia, aunque también posiblemente de China e India, fue introducido en Europa por los árabes. Los árabes llevarían el naranjo amargo a Arabia en el siglo X (Deng et al., 2020), difundiéndose posteriormente a Iraq, Siria, Palestina y Egipto, y más tarde, entre los

siglos X y XII, a través del norte de África, a España, Sicilia y Cerdeña (Zaragoza, 2016b).

Aunque se desconoce el origen del limonero (*Citrus limon*), se cree que éste se cultivó por primera vez en el sureste de China, el noreste de India o el norte de Myanmar. Al igual que el naranjo amargo, los árabes lo introdujeron en Europa siguiendo posiblemente las mismas vías de penetración. Así también se supone que el limonero llegó a España al mismo tiempo o poco después que el naranjo amargo (Zaragoza, 2016b).

El limero (*Citrus aurantifolia*) llegó a la India desde algún lugar de Indonesia, desde donde se introdujo en Arabia por los mercaderes y navegantes árabes (Zaragoza, 2016b), llegando a España a través del norte de África.

El pummelo (*Citrus maxima*) se cree que se localizaba en la región de los archipiélagos de Malasia e Indonesia y en las islas Fiji (Deng et al., 2020). El pummelo siguió una ruta similar a la del naranjo amargo hasta llegar a Europa, siendo introducido en España por los árabes en el siglo XI. La teoría más probable es que los árabes lo transportaron, bajo el nombre de Zamboa, desde la India hasta Al-Ándalus (Zaragoza, 2016b).

El naranjo dulce (*Citrus sinensis*) se ha cultivado en el sureste de Asia desde la antigüedad, estando posiblemente su origen en el sur de China, el norte de Myanmar, el noreste de India y el sur de Indonesia (Webber, 1967; Deng et al., 2020). Los países occidentales no conocieron la existencia del naranjo dulce hasta el año 1500 (Deng et al., 2020) y su llegada a Europa parece que estuvo asociada al comercio portugués. Los comerciantes portugueses trajeron de China naranjos dulces de selecciones superiores, lo que hizo que en muchas regiones del Mediterráneo se conocieran como las naranjas de Portugal.

Cristóbal Colón en 1493 llevó semillas de naranjas, limones y cidras a Haití y al Caribe, desde donde posteriormente el naranjo dulce fue introducido en América por los conquistadores españoles. La naranja `Washington Navel´ se originó por una mutación en Brasil, recibiendo su nombre probablemente tras su importación por los Estados Unidos en 1870 (Ibáñez et al., 2015). La excelente calidad de los frutos de `Washington Navel´ hizo que esta variedad de naranja fuese la más ampliamente cultivada, siendo otras variedades surgidas por mutación de `Washington Navel´ distribuidas por todo el mundo. `Washington Navel´ fue importada por España en 1910 (Zaragoza, 2007).

El mandarino, originario de Indochina y China meridional, fue introducido en Occidente a principios del siglo XIX. Entre las diferentes especies que abarcan los mandarinos, el

mandarino Común (*C. deliciosa* Ten.) fue introducida en 1805 por primera vez en Inglaterra desde China (Zaragoza, 2007; Deng et al., 2020), desde donde posteriormente fue transportada a Malta y Sicilia. En España fue en 1856 cuando surgieron las primeras plantaciones de mandarino en la provincia de Castellón. A pesar de su gran difusión, el mandarino Común no se cultiva actualmente por su alto contenido en semillas y sus problemas de alternancia en la cosecha. El mandarino Clementino (*C. clementina* Hort. ex Tan.), híbrido entre mandarino y naranjo dulce, se descubrió en 1902 en Argelia, iniciándose su cultivo en España en los años 1930 (Zaragoza, 2007; Deng et al., 2020). El mandarino Satsuma (*C. unshiu*), de origen japonés, fue introducido en España en 1925, probablemente desde Estados Unidos, adquiriendo una mayor importancia en los años 1960.

El pomelo (*Citrus paradisi*) es una especie de reciente aparición, desconocida en Oriente. Las primeras plantas de pomelo introducidas en España fueron de la variedad 'Marsh', importadas de California en el año 1910 (Zaragoza, 2007).

1.3. Historia de los cítricos en España

Según Font de Mora (1954) la difusión de los agrios en España se debió a los árabes, quienes presentaban un interés innegable por los jardines y las plantas procedentes de países lejanos, tales como el cidro, el naranjo amargo, el limonero, el limero y la zamboa. Ejemplos de estos jardines son el Patio de los Naranjos de la Mezquita de Córdoba, los jardines del Alcázar de Sevilla o el jardín de la Mezquita de Málaga.

En uno de los jardines del Alcázar de Sevilla se encuentra a fecha de hoy el 'Naranjo del Rey Don Pedro I de Castilla' (**Fotografía 1**), naranjo amargo cuya plantación se le atribuye al Rey Don Pedro en el siglo XIV (Zaragoza, 1993), siendo considerado el más antiguo del Alcázar de Sevilla.

Entre los siglos XVI y XVIII se experimentó un mayor interés por los cítricos en España (Zaragoza, 2007). Aunque entre estos siglos ya existía el comercio entre pueblos vecinos e incluso la exportación a otros países, tales como Francia, Flandes o Inglaterra (Zaragoza, 1993), no fue hasta finales del siglo XVIII cuando se inició la citricultura comercial. Así, a finales del siglo XVIII ya existían plantaciones comerciales en numerosas localidades de Castellón, Valencia, Alicante y Murcia (Zaragoza, 2007). Entre otras zonas en las que se mencionaban la presencia de cítricos estaban Badajoz y Sevilla.



Fotografía 1. `Naranjo del Rey Don Pedro de Castilla´ en los jardines del Alcázar de Sevilla. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

El creciente interés comercial por los cítricos hizo que a mediados del siglo XIX su cultivo experimentara una marcada expansión, adquiriendo una gran importancia en Valencia, Murcia y Andalucía, y un importante comercio exterior, en el que el 70% de la producción se destinaba a distintos países de Europa, Estados Unidos y Argelia. En esta época la variedad más cultivada era la naranja Blanca Común, variedad de media estación. Otras variedades apreciadas eran la naranja sanguina, la naranja Sucreña o Imperial y la mandarina Común. Los naranjos amargos se utilizaban principalmente para la elaboración de confituras. En cuanto al limonero, localizado principalmente en Murcia, la variedad predominante era `Verna´ (Zaragoza, 2007).

La aparición de la gomosis (*Phytophthora citrophthora* (Sm. & Sm.) Leonian) llevó a sustituir las plantas francas y los patrones de naranjo dulce, limonero y cidro, por el patrón naranjo amargo, patrón que mostró una buena tolerancia a esta enfermedad. Otro hecho a destacar fue la importación de la naranja `Washington Navel´ (1910) y otras variedades de gran calidad y sin semillas que, con diferentes épocas de maduración, permitieron ampliar el período de comercialización de los cítricos. La gran rusticidad del naranjo amargo, que permitió el cultivo en tierras marginales, y la selección de variedades de calidad, muy demandadas por los mercados extranjeros, llevó a un importante crecimiento de la citricultura española en la primera mitad del siglo XX (Zaragoza, 2007).

No obstante, a partir de 1957, la aparición del virus de la tristeza de los cítricos (CTV) influyó muy negativamente en la economía citrícola, obligando a sustituir el naranjo amargo, patrón muy sensible a esta enfermedad, por patrones tolerantes a la misma (Zaragoza, 2007; Aleza et al., 2020). Además, se tuvieron que sanear las variedades comerciales existentes e importar material vegetal de otros países, lo que se consiguió gracias al Programa de mejora sanitaria de variedades de cítricos (Zaragoza, 2007), que comenzó en 1975, y que hoy en día sigue evolucionando. Gracias a este Programa (Barbé et al., 2020) la citricultura española alcanzó una situación privilegiada, con una estructura varietal de gran calidad y un excelente estado sanitario, en el que no existen graves enfermedades.

En el siglo XXI, en el afán de buscar nuevos huecos de mercado, se produjo un fuerte incremento de variedades de mandarinas Clementinas tempranas, así como un incremento de nuevas variedades de naranja de recolección tardía y de buena calidad ('Navel Powell', 'Barnfield', 'Chislett', 'Barberina', 'Valencia Delta Seedless'...). Un aspecto más reciente por destacar es el gran incremento de variedades protegidas, de las diferentes especies de cítricos, que están desplazando a las variedades más tradicionales (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021).

1.4. Importancia de los cítricos

1.4.1 Mundial

Los cítricos se cultivan en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales del planeta, entre los 45° Norte y 45° Sur (**Figura 2**). La producción global de cítricos en el año 2021 alcanzó la cifra de 161,8 millones de toneladas (mills t), ocupando una extensión total de 10,2 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2023). Los principales países productores en la actualidad son China (46,2 mills t), Brasil (18,9 mills t), India (14,3 mills t), México (8,8 mills t), España (6,7 mills t) y Estados Unidos (6,3 mills t). Entre las principales especies comerciales de cítricos destacan las naranjas con una producción de 75,6 mills t (46,7 % de la producción mundial de cítricos); le siguen las mandarinas con 42,0 mills t (26,0 %), los limones y limas con 20,8 mills t (12,9 %) y los pomelos con 9,6 mills t (5,9 %).

La Unión Europea con 11,5 mills t de cítricos concentra el 7,1 % de la producción mundial, destacando España (6,7 mills t; el 58,4 % de la producción de cítricos de la UE), Italia (3,1 mills t; 26,9 %), Grecia (1,1 mills t; 9,3 %), Portugal (0,4 mills t; 3,8 %), Francia (88.190 t; 0,8 %), Chipre (60.060 t; 0,5 %), Croacia (41.220 t; 0,4 %) y Malta (1.210 t; 0,01 %) (FAOSTAT, 2023).

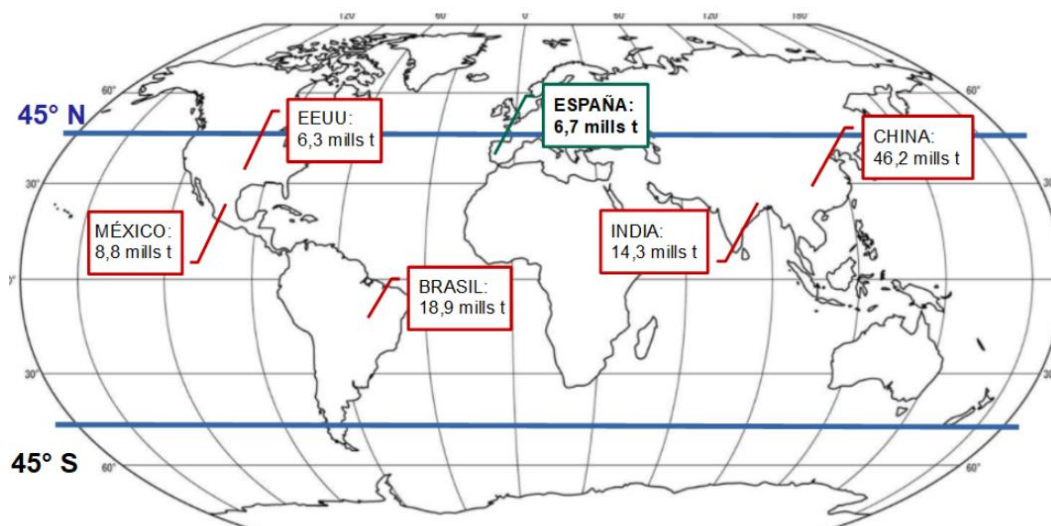


Figura 2. Distribución geográfica de los principales productores de cítricos. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de FAOSTAT (2023)

A nivel mundial el volumen de exportación de cítricos en fresco en el año 2021 fue de unos 18,5 millones de toneladas. Los principales países exportadores son España (3,6 mills t), Sudáfrica (2,6 mills t), Turquía (2,0 mills t), Egipto (1,6 mills t), China (1,1 mills t) y Estados Unidos (0,7 mills t). Entre las principales especies comerciales de cítricos exportadas destacan las naranjas (39,1 % del volumen total de cítricos exportados) y las mandarinas (32,0 %), seguidas de los limones y limas (22,6 %) y los pomelos (5,7 %).

La Unión Europea es responsable de una tercera parte (31,6 %) de la exportación mundial de cítricos en fresco con un volumen total de 5,9 mills t (FAOSTAT, 2023). Europa presenta una fuerte tradición exportadora, en la que el 53,3 % de su producción está destinada a la exportación, siendo los propios países de la Unión Europea su principal destino. Entre los principales países exportadores de la Unión Europea están España (3,6 mills t; 60,8 %), Países Bajos (0,9 mills t; 15,5 %; como país redistribuidor de cítricos), Grecia (0,5 mills t; 8,2 %), Italia (0,2 mills t; 3,7 %), Portugal (0,2 mills t; 3,1 %) y Francia (0,1 mills t; 1,8 %).

1.4.2. Nacional

Conforme se ha visto anteriormente, España se posiciona como primer país productor de cítricos de la Unión Europea y quinto del mundo, siendo además el primer país exportador de cítricos en fresco tanto a nivel europeo como a nivel mundial.

En el año 2021, la producción de cítricos en España fue de 6,7 mills t con una superficie de cultivo de 300.500 hectáreas (ha) (FAOSTAT, 2023). En España se da un claro predominio del cultivo de la naranja, con el 53,7 % de la producción nacional de cítricos,

seguida de las mandarinas (29,9 %) y del limón (15,2 %), mientras que el pomelo representa únicamente el 1,2 %.

El destino principal de los cítricos es la exportación (48,4 %), seguida del consumo interior en fresco (31,2 %) y de la transformación (15,7 %) (MAPA, 2022).

Europa es el principal mercado de los cítricos españoles (90,91 % de las exportaciones), con Alemania y Francia como los clientes europeos más importantes. No obstante, en los últimos años, las exportaciones de cítricos han crecido hacia países extracomunitarios, y están actualmente presentes en el continente americano (3,01 % de las exportaciones de cítricos españoles), en donde destacan Canadá y Brasil, y en Asia (2,83 %), en donde destacan los países árabes y China (Borrás, 2020).

En España, según datos del 2021 (MAPA, 2022), la Comunidad Valenciana es la principal región productora de cítricos (3,3 mills t; 46,4 % de la producción nacional), seguida de Andalucía (2,7 mills t; 37,9 %) y la Región de Murcia (0,9 mills t; 13,3 %). Estas tres regiones productoras presentan claras diferencias en cuanto a la especialización de su producción. Así, mientras que la Comunidad Valenciana presenta una producción más o menos repartida entre naranjas y mandarinas, con el 50,4 % y el 41,0 % de su producción total de cítricos, Andalucía presenta un claro predominio en naranjas (72,0 %) y Murcia en limones (69,4 %).

1.4.3. Autonómica

Los cítricos en Andalucía representan un sector agrario de gran importancia territorial, con 83.180 ha (MAPA, 2022), el 25 % de la superficie de frutales y el 8,5 % de la superficie agraria útil (SAU); económica, con 844 mills euros, el 35 % de la producción de la rama agraria (P.R.A.) de frutales; y social, con 5,9 mills jornales, tercer sector generador de empleo tras el olivar y las hortalizas protegidas (CAGPDS, 2021).

El cultivo de los cítricos está principalmente localizado en la Vega del Guadalquivir, entre las provincias de Sevilla (33,9 % de la superficie andaluza de cítricos) y Córdoba (14 %), y en el litoral andaluz, principalmente en Huelva (24,2 %), Málaga (12,8 %) y Almería (1,8 %) (CAGPDS, 2021).

En la producción de cítricos destaca el cultivo del naranjo dulce con una superficie de 58.481 ha, principalmente localizada en las provincias de Sevilla (44,9 %) y Córdoba (20,0 %). En segundo lugar, aparece el cultivo del mandarino (20.357 ha), en el que destaca Huelva con el 57,8 % de la superficie. A continuación, se encuentra el limón, con una superficie de cultivo de 6.684 ha principalmente distribuidas entre las provincias

de Málaga (67,7 %) y Almería (26,2 %). Por último, se encuentran el pomelo (877 ha), localizado principalmente en Sevilla (41,1 %), el naranjo amargo (316 ha), concentrado en Sevilla y Málaga (54,6 % y 43,3 %, respectivamente) y el limero (145 ha), ubicado mayoritariamente en Almería (46,9 %) y Huelva (34,5 %) (MAPA, 2022).

La estructura varietal de la producción andaluza de cítricos, al igual que ocurre en el resto del país, ha estado tradicionalmente orientada al mercado en fresco. Por tal motivo, en Andalucía destacan las naranjas del grupo Navel (naranjas de mesa) frente a las del grupo Blancas (naranjas de zumo). Las naranjas del grupo Navel representan el 62,9 % de la producción de naranjas en Andalucía, con `Nave Late`, `Navelina` y `Washington Navel` como variedades más representativas. Las naranjas del grupo Blancas suponen el 36,1 %, en las que `Valencia Late` y `Salustiana` son las variedades más cultivadas. Por último, las variedades del grupo Pigmentadas representan únicamente el 1,0 % de la producción andaluza de naranjas (MAPA, 2022). Dentro de las mandarinas destacan los híbridos con el 66 % de la producción, seguida de las Clementinas con el 31 %, entre las que predominan las variedades tempranas y de media estación, y por último están las Satsumas con el 0,6 % de la producción de mandarinas (CAGPDS, 2022). En cuanto al limón, la producción andaluza se distribuye casi exclusivamente entre dos variedades, `Fino` (37 %) y `Verna` (61 %).

No obstante, en los últimos años se ha iniciado en el sector un proceso de diversificación en variedades, procedentes de diferentes programas de mejora genética o de otras regiones productoras, orientadas a cubrir huecos de mercado y a diferenciar la producción hacia una mayor calidad. Entre éstas han tenido un gran interés las variedades protegidas, las cuales en estos momentos son la principal fuente de nuevas variedades en cítricos (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021).

2. Nuevos desafíos del cultivo de los cítricos

A pesar de la importancia del cultivo de los cítricos en Andalucía, el sector cítrico andaluz se enfrenta a importantes desafíos como consecuencia del incremento de la población mundial, el cambio climático y la globalización (FAO, 2017). Otros aspectos relevantes que incidirán en el futuro del sector son los nuevos hábitos de consumo y las exigencias europeas en materia de sostenibilidad.

2.1. El crecimiento demográfico

Para el año 2050, se prevé que la población mundial aumente alcanzando casi los 9.700 millones de personas (**Figura 3**). Este crecimiento de la población se verá acompañado de un incremento en la demanda de productos agrícolas, de un 50 % con respecto al año 2012 (FAO, 2017), que a su vez se traducirá en una mayor presión sobre los recursos naturales, suelo y agua, que ya de por sí se encuentran limitados como consecuencia de la continua expansión de la agricultura.

En este sentido Andalucía se muestra especialmente vulnerable como consecuencia de su localización geográfica, encontrándose en una situación de alta escasez de recursos hídricos (**Figura 4a**) (FAO, 2011) y de alto riesgo de desertificación (**Figura 4b**) (USDA-NRCS, 1998).

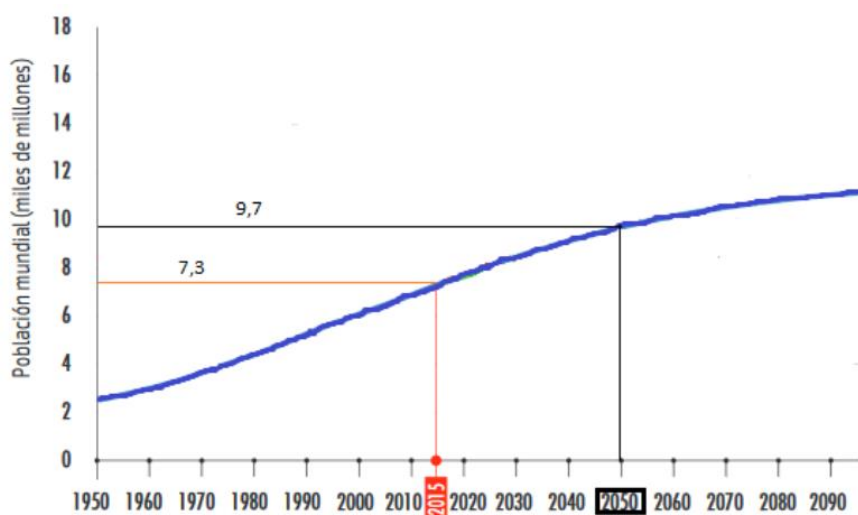


Figura 3 . Crecimiento demográfico mundial. Fuente: FAO, 2017

Los suelos andaluces, como ocurre de forma general en el Mediterráneo, se presentan especialmente frágiles como consecuencia de la conjunción de un clima seco y la presencia de suelos calizos poco profundos, en los que la erosión, la pérdida de carbono orgánico y la disminución de la biodiversidad son sus principales amenazas. Por otro lado, la salinidad se presenta también como un factor limitante del uso agrícola del suelo (FAO e ITPS, 2015), siendo las zonas de Andalucía más afectadas por este problema las marismas del Guadalquivir y las zonas costeras con una intensa explotación de los acuíferos.

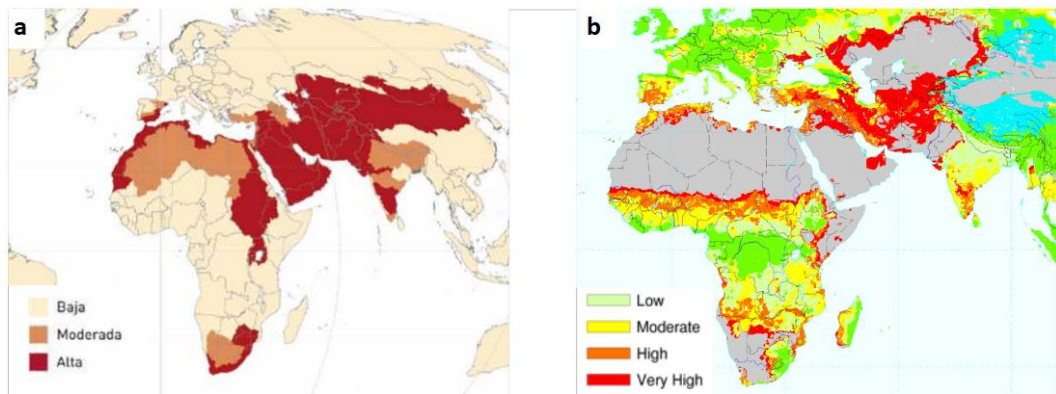


Figura 4. a) Escasez física de los recursos hídricos (FAO, 2011); b) Vulnerabilidad a la desertificación (USDA-NRCS, 1998)

2.2. El cambio climático

El agua es el principal factor limitante de la productividad y la rentabilidad de las plantaciones de cítricos de Andalucía. Es por tal motivo y por el régimen de precipitaciones característicos de Andalucía, estacional (con una marcada sequía estival) e insuficiente (700 mm de precipitación anual frente a unos 1.200 mm de necesidades anuales de una plantación adulta), que se establece el riego como una de las prácticas de cultivo más importantes para la obtención de una producción y una calidad de fruta óptimas.

No obstante, Andalucía ya no sólo presenta problemas de escasez de agua y/o de baja calidad en muchas de sus zonas productoras de cítricos, sino que además el cambio climático amenaza con agravar esta situación para finales del siglo XXI (Pérez-Pérez y Quiñones, 2020): una mayor reducción del agua disponible para el riego y un aumento de los periodos de sequía que, junto a un incremento de las necesidades de riego del cultivo, conllevará a una explotación más intensiva de los acuíferos, y con ello un empeoramiento de la calidad del agua.

Además de los efectos del cambio climático sobre la disponibilidad y calidad del agua para riego, se prevén otros efectos sobre las condiciones ambientales, tales como el incremento de temperatura u otros fenómenos climáticos adversos, así como sobre la calidad de suelo (erosión, pérdida de carbono orgánico y disminución de biodiversidad) que podrían afectar a la fisiología del árbol, amenazando el desarrollo, la producción y la rentabilidad del cultivo.

2.3. La globalización

2.3.1. Plagas y enfermedades emergentes

Con la globalización se está incrementando la aparición de plagas y enfermedades transfronterizas (FAO, 2017). Esta situación además de suponer un alto riesgo para la rentabilidad de los cultivos puede implicar grandes consecuencias económicas, sociales y ambientales para las zonas afectadas.

Este es el caso de *Trioza erythrae*, uno de los dos psílidos vectores del Huanglongbing (HLB), detectado por primera vez en el continente europeo en el 2014 (Pérez-Otero et al., 2015), más concretamente en el noroeste de la Península Ibérica, encontrándose actualmente en Vila do Obispo, en el Algarve (Portugal) (DGAV, 2022), a tan solo unos 150 km de las plantaciones comerciales de Huelva (España). Aunque el agente causal del HLB (tres especies de bacterias pertenecientes al género *Candidatus Liberibacter*) no ha sido detectado en Europa (Siverio et al., 2017; EPPO, 2022), la aparición de *T. erythrae* en la Península Ibérica ha despertado una gran alarma, ya que, según la experiencia de otras regiones productoras afectadas, tras la llegada del vector suele aparecer más tarde o temprano la enfermedad (Bové, 2006; Durán-Vila y Bové, 2013). Esta enfermedad, de la que no se conoce cura, está descrita como la más devastadora de los cítricos a nivel mundial ya que afecta a todas las especies comerciales de cítricos (Folimonova et al., 2009; Gottwald, 2010), provoca una importante reducción en la productividad de las plantaciones y ocasiona la muerte del árbol en unos 5 ó 10 años tras su infección (si no se realiza ninguna medida de control).

Otros ejemplos de amenazas sanitarias son el *Delottococcus aberiae* (cotonet de Sudáfrica), detectado en el 2009 en el Baix Maestrat (Valencia), plaga que provoca graves deformaciones en frutos y que en algunas comarcas del Levante (región donde actualmente está presente) está ocasionando pérdidas económicas importantes; y el Mal Secco de los cítricos, enfermedad causada por el hongo vascular *Plenodomus tracheiphilus*, que ocasiona una pérdida de producción y calidad de la fruta así como la muerte, progresiva o fulminante, de la planta. El Mal Secco de los cítricos fue detectado en Málaga en el 2015, donde se encuentra en fase de erradicación, y actualmente está extendido por la mayoría de los países de la Cuenca Mediterránea (EPPO, 2022). Por otra parte, la Mancha Negra, enfermedad causada por el hongo *Phyllosticta citricarpa*, que deprecia de forma significativa la calidad comercial de la fruta, pudiendo inducir su caída prematura, ha sido citada recientemente y por primera vez en la cuenca del Mediterráneo, en Túnez (Boughalleb-M'Hamdi et al., 2020).

Como resultado de la presión ejercida por las enfermedades y plagas emergentes, España se enfrenta a un gran reto en materia de seguridad fitosanitaria para la que dispone de herramientas de control muy limitadas como consecuencia de las fuertes exigencias impuestas por la distribución, con fuertes restricciones en materia de residuos en fruta, y por la legislación europea en materia fitosanitaria, cada vez más restrictiva en materias activas autorizadas.

Esto último ha sido el caso, por ejemplo, de la prohibición por parte de la Unión Europea en el 2018 del uso de tres productos neonicotinoides para su aplicación al aire libre (EUR-Lex Regulation (EU) 2018/785 of 29 May 2018).

2.3.2. Incremento de la competencia con terceros países

Otro de los desafíos de la globalización es la creciente competencia con terceros países productores de cítricos por los mercados internacionales. Estos países, con menores costes de producción, presionan los precios de los cítricos a la baja comprometiendo con ello los márgenes de beneficio y, por lo tanto, la rentabilidad de las explotaciones de cítricos de España.

En este sentido, analizando la evolución de los principales países exportadores de cítricos, se pueden identificar aquellos que suponen un mayor desafío para España, al igual que para el resto de los países productores de la Unión Europea. Así, en el hemisferio norte destacarían Egipto, Marruecos, Israel y Turquía, favorecidos además por los acuerdos comerciales asimétricos de la Unión Europea (Borrás, 2020; García-Azcárate y Martínez-Gómez, 2020); mientras que en el hemisferio sur repuntarían Sudáfrica y distintos países de Sudamérica, los cuales producen cítricos de contra estación que, tras la última ampliación del calendario para su importación a la Unión Europea con ventajas arancelarias, se están solapando con los cítricos españoles de principio de campaña (García-Azcárate y Martínez-Gómez, 2020) provocando una importante caída en los precios y un freno en la recolección y comercialización de los mismos.

2.4. Nuevos gustos del consumidor europeo

Como se ha mencionado anteriormente, el mercado de la Unión Europea es el principal destino de los cítricos nacionales, a donde se dirige el 91 % del volumen de las exportaciones. En este sentido, el consumidor europeo se caracteriza por mostrar un alto nivel de exigencia en sostenibilidad ambiental (preocupado por el medio ambiente

y la salud de los agricultores y consumidores); así como en productos de alta calidad y valor funcional (de alto contenido en compuestos promotores de la salud).

2.5. Estrategia “De la Granja a la Mesa”

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra casi se han duplicado en los últimos 50 años y las previsiones indican que seguirán aumentando hasta 2050 (FAO, 2017), favoreciendo con ello el cambio climático.

Ante la preocupación de la Unión Europea (UE) sobre la amenaza del cambio climático y la degradación del medioambiente y con el fin de contribuir al logro de la neutralidad climática de aquí a 2050, la Comisión presentó en mayo de 2020 la Estrategia “De la Granja a la Mesa” como una de las iniciativas claves en el marco del Pacto Verde Europeo (Comisión Europea, 2020).

La Estrategia “De la Granja a la Mesa” (“Farm to Fork”) pretende que el sistema agroalimentario actual de la UE evolucione hacia un modelo sostenible que permita garantizar alimentos saludables, asequibles y sostenibles para todos los europeos; combatir el cambio climático, proteger el medioambiente y preservar la biodiversidad; garantizar un rendimiento económico justo en la cadena alimentaria; y reforzar la agricultura ecológica. Para ello la Estrategia “De la Granja a la Mesa” contempla medidas u objetivos muy ambiciosos en materia de medioambiente y cambio climático, estableciendo los siguientes objetivos para el 2030: reducir en un 50 % el uso de fitosanitarios, rebajar como mínimo un 20 % el uso de fertilizantes y extender la agricultura ecológica a un 25 % de las tierras agrícolas.

3. Intensificación sostenible del cultivo de los cítricos

Ante la situación descrita en el apartado anterior se identifican los principales retos a los que se enfrenta el sector de los cítricos en Andalucía: incrementar la productividad, afrontar el cambio climático, prevenir y/o controlar las plagas y las enfermedades emergentes y avanzar en sostenibilidad.

La intensificación sostenible del cultivo, como modelo de producción más eficiente, sostenible y resiliente frente a posibles riesgos y situaciones de crisis, se presenta como una estrategia de gran interés. Una intensificación que, comprometida con el medio ambiente y la biodiversidad, debe asentarse en tres pilares fundamentales: la adecuada

elección del patrón, una mayor densidad de plantación y la mecanización de la producción.

No obstante, dada la diversidad de condiciones físicas y socioeconómicas existentes en las regiones productoras de cítricos de Andalucía, se generan diferentes escenarios compatibles con distintas alternativas o modelos de intensificación del cultivo.

3.1. Patrones de cítricos

3.1.1. Importancia del patrón

La adecuada elección del patrón es un factor determinante para la sostenibilidad de la plantación.

El patrón de los cítricos tiene la propiedad de ejercer sobre la plantación una diferente respuesta, tolerancia o resistencia, frente a los patógenos responsables de las principales enfermedades de los cítricos (Albrecht y Bowman, 2011; Bowman y Joubert, 2020; Aparicio-Durán et al., 2021a), así como una mayor o menor susceptibilidad a las plagas (Urbaneja-Bernat et al., 2020; Hernández-Suárez et al., 2021) o una diferente tolerancia frente a las condiciones ecológicas adversas (Bowman y Joubert, 2020; Aparicio-Durán et al., 2021b, 2021c, 2021d). Asimismo, el patrón tiene la capacidad de inducir sobre la variedad injertada diferentes características agronómicas (Legua et al., 2011a; Forner-Giner et al., 2014; Ordóñez-Díaz et al., 2020), tales como el tamaño final del árbol, la entrada en producción, la productividad y la maduración y calidad de la fruta.

Por tanto, en la elección del patrón se deben considerar diferentes aspectos de la plantación, entre los que son de destacar los principales factores bióticos y abióticos limitantes de la parcela, la variedad comercial a injertar y el destino de la producción.

3.1.2. Evolución de los patrones de cítricos en España

En España, las primeras plantaciones comerciales de cítricos se realizaron en las provincias de Valencia y Castellón a finales del siglo XVIII. En aquel momento, las plantaciones se realizaban sobre sus propias raíces a través del método de `franqueo`, en el que la variedad se injertaba previamente sobre estaquillas enraizadas de poncilero y se enterraban por encima de la unión del injerto. El método del `franqueo` consistía en el empleo del poncilero como sistema radicular provisional hasta que el injerto emitía sus propias raíces. En esta época se efectuaban también plantaciones con árboles sin injertar obtenidos de la siembra de semillas. Posteriormente se introdujo el naranjo dulce

(*Citrus sinensis* L. Osb), el mandarino común (*Citrus deliciosa* Ten.) y el naranjo amargo (*Citrus aurantium* L.) como patrones (Forner y Pina, 1992; Zaragoza, 1993).

El interés inicial del patrón de cítricos residía en el acortamiento del periodo juvenil del árbol y la obtención de copas de árboles genéticamente idénticas a la variedad madre (Bowman y Joubert, 2020). Posteriormente, la evolución en el empleo de los patrones de cítricos estuvo determinada por la necesidad de adaptar las plantaciones a determinadas crisis sanitarias.

En 1862 aparecieron las primeras plantaciones afectadas por gomosis (*Phytophthora* spp.) en la provincia de Castellón, tomándose conciencia de la necesidad de buscar árboles resistentes a esta enfermedad. En ese momento, la práctica totalidad de los cítricos que se cultivaban se vieron afectados por la enfermedad, a la que tanto el poncifero como el naranjo dulce se mostraron muy sensibles. Por el contrario, los árboles establecidos sobre naranjo amargo no sufrieron daño, mostrándose este patrón como tolerante (Zaragoza, 1993). Esta tolerancia contrastada del naranjo amargo a *Phytophthora* spp., unida a su excelente comportamiento agronómico como patrón, provocaron su establecimiento en la mayoría de las plantaciones de cítricos de España.

En 1957 se detectó en España el virus de la tristeza (CTV), probablemente introducido a principios del siglo XX junto a las variedades importadas de otros países. El virus de la tristeza impactó de forma severa en el sector ya que el patrón naranjo amargo, que se encontraba en más del 95 % de las plantaciones, se mostró en general sensible al virus de la tristeza, salvo cuando este patrón se encontraba injertado con limonero (Zaragoza, 2007). Aunque mandarino común y naranjo dulce se mostraron tolerantes al virus de la tristeza, estos dos patrones quedaron descartados como alternativas para la reestructuración del sector dada su sensibilidad a gomosis (*Phytophthora* spp.).

Por tal motivo, en España se abrió una nueva etapa con la búsqueda y la selección de nuevos patrones tolerantes al CTV, sin olvidar que además estos patrones debían presentar un buen comportamiento frente a los estreses abióticos presentes en la citricultura española e inducir sobre la variedad injertada una buena productividad y calidad de fruta.

Inicialmente, a finales de los años 60, a través de la antigua Estación Naranjera de Levante, se importaron patrones de cítricos de áreas de cultivos con condiciones ecológicas similares a las de España. Este fue el caso de citrange Troyer (*C. sinensis* (L) Osb. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf), procedente de California, y mandarino 'Cleopatra' (*Citrus Reshni*), procedente de Florida, ambos patrones tolerantes al CTV. Otros patrones tolerantes introducidos más tarde fueron citrange Carrizo (*C. sinensis* (L) Osb.

x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf), citrumelo Swingle (*Citrus paradisi* Macf. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf) y *Citrus volkameriana* Ten & Pasq. (Forner y Pina, 1992).

En 1972, los patrones tolerantes al CTV utilizados para las variedades de naranjo, mandarino y pomelo eran el mandarino `Cleopatra`, el citrange Troyer, el mandarino común y el naranjo dulce (Llanos, 1998). Por el contrario, el limonero se injertaba sobre naranjo amargo, combinación para la que se autorizó su uso, dada su tolerancia al CTV.

En 1972, el 65% de la producción de plantas de naranjo, mandarino y pomelo se realizaban sobre mandarino `Cleopatra`, ya que c. Troyer se mostraba susceptible al viroide de la exocortis y a otros virus de la época. No obstante, dado el mal comportamiento de mandarino `Cleopatra` en vivero, su multiplicación sufrió una fuerte disminución en 1981, pasando a representar el 18 % de los patrones producidos, manteniéndose únicamente su interés para aquellos terrenos muy calizos o salinos (Llanos, 1998; Aleza et al., 2020).

Citrumelo Swingle comenzó a comercializarse en España por su tolerancia a exocortis y xyloporosis (Llanos, 1998), mostrando interés también por su tolerancia a la asfixia radical (Aleza et al., 2020) y, en el caso de variedades de media estación o tardías, por su capacidad de retrasar la maduración del fruto. No obstante, su gran sensibilidad a la caliza activa ha limitado su difusión.

A partir de 1983, *Citrus volkameriana* adquirió un gran interés por su capacidad de inducir sobre la variedad un gran vigor y una pronta entrada en producción (Llanos, 1998). Por el contrario, *C. volkameriana* muestra algunas características limitantes, tales como sensibilidad a *Phytophthora* spp., alta sensibilidad al frío y baja calidad de fruta inducida sobre la variedad.

A lo largo de estos años se ha producido una sustitución progresiva del naranjo amargo por *Citrus macrophylla* en el cultivo del limón, siendo su principal interés la precocidad en la entrada en producción y su alta productividad. Hoy en día *C. macrophylla* es el patrón más empleado en limonero.

Actualmente, el patrón citrange Carrizo es el más utilizado en naranjos, mandarinos y pomelos, aunque también se emplean otros patrones como el mandarino `Cleopatra`, el *C. volkameriana*, el *C. macrophylla*, el citrange C-35 y el citrumelo Swingle (Aleza et al., 2020).

Recientemente en España se han comenzado a comercializar nuevos patrones de cítricos, tales como Forner-Alcaide nº 5 (*C. reshni* x *P. trifoliata*) (Forner et al., 2003), Forner-Alcaide nº 517 (mandarino `King` x *P. trifoliata*) (Forner-Giner et al., 2014) y

Forner-Alcaide V17 (*C. volkameriana* x *P. trifoliata*) (Aleza et al., 2020), procedentes del Programa de Mejora Genética de Patrones del IVIA.

3.1.3. Programa de mejora genética de patrones en el IVIA

En 1974, de la mano de Juan B. Forner, se inició un Programa de mejora genética de patrones de cítricos, por hibridación tradicional, en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) en España (Forner y Alcaide, 1993, 1994; Llanos, 1998).

El principal objetivo de este Programa consiste en la obtención de nuevos patrones híbridos con tolerancia frente a enfermedades y estreses abióticos (virus de la tristeza (CTV), *Phytophthora* spp., clorosis férrica, salinidad, asfixia radicular, déficit hídrico y estrés por temperatura), y que además reporten ventajas agronómicas en comparación con los patrones tradicionales (Aleza et al., 2020).

En respuesta a la fuerte competencia internacional y al incremento de los costes de cultivo, uno de los principales criterios de selección del Programa de mejora genética de patrones del IVIA ha sido la capacidad de inducir un menor porte final de árbol (patrones enanizantes, semi-enanizantes y sub-estándar), con el fin de reducir los principales costes de producción (poda de los árboles y recolección de la fruta), sin obviar otros aspectos agronómicos importantes como son la afinidad variedad-patrón y la productividad, la maduración y la calidad de fruta inducida sobre la variedad.

Fruto de este Programa se han obtenido algunos híbridos interesantes por su capacidad de reducir el tamaño final del árbol y/o presentar buena tolerancia frente a los principales estreses bióticos y abióticos típicos de las regiones productoras de cítricos en España (Forner et al., 2003; Forner-Giner et al., 2014; Aleza et al., 2020):

- **Forner-Alcaide n.º 5:** mandarino 'Cleopatra' x *P. trifoliata*.

Patrón resistente al virus de la tristeza (CTV), al nematodo de los cítricos y a hongos del género *Phytophthora*. Su tolerancia a la salinidad es muy alta y presenta mejor comportamiento que c. Carrizo frente a la clorosis férrica (principal estrés abiótico de los suelos calcáreos). Patrón tolerante también al encharcamiento y al déficit hídrico. Induce sobre la variedad un porte de árbol estándar, similar al de c. Carrizo, así como buena productividad y excelente calidad de fruta (Forner et al., 2003; Aleza et al., 2020).

- **Forner-Alcaide n.º 517:** mandarino 'King' x *P. trifoliata*.

Patrón resistente al virus de la tristeza (CTV) y tolerante al nematodo de los cítricos y a hongos del género *Phytophthora*. Presenta alta tolerancia a la clorosis férrica y

tolerancia a la salinidad. Patrón con un carácter entre enanizante y semi-enanizante que disminuye significativamente la altura del árbol y el volumen de copa de las variedades injertadas en él. Induce sobre la variedad una alta productividad y calidad de fruta, aunque ésta de menor tamaño (Forner-Giner et al., 2014; Aleza et al., 2020).

- **Forner-Alcaide V17:** *C. volkameriana* x *P. trifoliata*.

Patrón tolerante al virus de la tristeza (CTV), al nematodo de los cítricos y a los hongos del género *Phytophthora*. Presenta buena tolerancia a la clorosis férrica, así como tolerancia intermedia a la salinidad. Induce sobre la variedad buena productividad y calidad de fruta. En algunas variedades tiene la capacidad de inducir un adelanto en la maduración de la fruta (Aleza et al., 2020), lo que resulta interesante en variedades de recolección temprana como 'Clementina de Nules'.

- **Forner-Alcaide nº 13:** mandarino 'Cleopatra' x *P. trifoliata*.

Patrón resistente al virus de la tristeza (CTV) y sensible al nematodo de los cítricos. No se han observado síntomas de *Phytophthora* en árboles injertados con variedades de naranja, apreciándose sin embargo una mayor susceptibilidad con 'Clementina de Nules' (Forner et al., 2003). Su tolerancia a la salinidad y al encharcamiento es muy alta, mostrándose sensible a la clorosis férrica (Fibla Queralt et al., 2014). Induce sobre la variedad un porte de árbol semi-enanizante, una buena productividad y una excelente calidad de fruta (Forner et al., 2003; Fibla Queralt et al., 2014).

- **Forner-Alcaide nº 418:** citrange Troyer x *C. deliciosa*.

Patrón tolerante al virus de la tristeza (CTV) pero sensible al nematodo de los cítricos y a los hongos del género *Phytophthora*. Presenta tolerancia intermedia a la clorosis férrica y a la salinidad. Patrón de carácter enanizante que induce sobre la variedad buena productividad y calidad de fruta (Fibla Queralt et al., 2014).

Al contrario de lo descrito anteriormente, los resultados obtenidos por Arenas-Arenas et al. (2013) denotan en este patrón una gran sensibilidad a la clorosis férrica.

3.2. Densidad de la plantación

3.2.1. Evolución de la densidad de plantación en España

La producción de cítricos en España ha estado tradicionalmente orientada al mercado para fresco, siendo su principal destino la exportación (54,9 %; MAPA, 2022), seguida del consumo interior (31,8 %) y por último de la industria de transformación (13,3 %).

Esta orientación de la producción ha condicionado en gran medida las características estructurales y culturales de las explotaciones, como son el diseño de las plantaciones y la recolección manual de la fruta (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021). Así, el sector de cítricos en España a inicios del siglo XXI se caracterizaba por presentar un alto porcentaje de plantaciones antiguas con marcos de plantación amplios (distancia entre árboles superiores a 6 m) y árboles de gran tamaño (alturas superiores a 4 m), lo que suponía un elevado coste de recolección y de otras técnicas de cultivo (**Fotografía 2**).



Fotografía 2. Plantación tradicional de cítricos en Andalucía. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

Dado que este diseño dificultaba y encarecía la realización de los tratamientos fitosanitarios, la poda de los árboles y la recolección de la fruta, en las dos últimas décadas se inició un proceso de intensificación del cultivo hacia marcos de plantación más estrechos, siendo actualmente el marco de plantación más habitual el de 5 a 6 metros entre líneas de plantación y de 3 a 4 metros entre árboles dentro de la misma línea (416 árboles/ha en naranjos) (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021)(**Fotografía 3**).

En los últimos años, se ha despertado un interés por las plantaciones de súper alta densidad (más de 1.900 árboles/ha) orientadas a la mecanización integral del cultivo (Arenas y Hervalejo, 2012; Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021) (**Fotografía 4**). Sistemas de plantación que se presentan como una estrategia interesante ante la necesidad de mejorar la rentabilidad del cultivo: adelantar la entrada en producción, mejorar el rendimiento de la plantación (kg/ha) y reducir los principales costes de cultivo (poda y recolección); afrontar la escasez de mano de obra disponible para el campo; y facilitar el control y la erradicación de posibles plagas y enfermedades emergentes. Así, en el

año 2009 se establecieron en Andalucía las primeras parcelas experimentales de plantaciones de cítricos de súper alta densidad dirigidas a la evaluación de diferentes marcos de plantación y material vegetal (variedades y patrones), así como a la identificación del manejo agronómico más adecuado para este sistema de plantación. Posteriormente y en los últimos años, se han establecido en Andalucía las primeras plantaciones comerciales de súper alta densidad en cítricos, principalmente orientadas para la industria.



Fotografía 3. Plantación de cítricos convencional en marcos de plantación de 6 x 4 m.

Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres



Fotografía 4. Plantación de cítricos en súper alta densidad en un marco de plantación de 3,5 x 1,0 m. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

3.2.2. Plantaciones de cítricos de mayor densidad

Existe una tendencia a nivel mundial hacia plantaciones de cítricos de mayor densidad (Donadio et al., 2019; Gonzatto et al., 2022). Las principales razones de este interés son la *mejora de la competitividad*: adelanto en la entrada en producción; reducción de los costes asociados a la recolección y a la poda de los árboles; *control más eficiente y sostenible de plagas y enfermedades del cultivo*; y *gestión más eficiente de los recursos naturales*. Otras razones importantes son la posibilidad de recoger la fruta sin necesidad de escaleras, lo que además de un abaratamiento de costes supone una medida importante en *prevención de riesgos laborales*, y de *reducir el impacto de determinadas enfermedades* (p. ej. Huanglongbing) sobre el rendimiento global de la plantación.

En el sureste de Brasil, las plantaciones de cítricos han mostrado en los últimos 30 años un incremento en la densidad de plantación, pasando de una media de 337 árboles/ha en los años 1980 a 600 árboles/ha a partir del 2013. En Brasil, las plantaciones de cítricos de alta densidad tienen entre 600 y 1.250 árboles/ha, presentando distancias entre 4 y 6 m entre líneas de plantación y entre 2 y 3 m entre árboles dentro de la misma línea. Plantaciones de súper alta densidad son consideradas aquellas que tienen entre 1.500 y 2.000 árboles/ha (Gonzatto et al., 2022).

En recientes trabajos realizados en la India con mandarino 'Nagpur' sobre lima 'Rangpur' se consideraron plantaciones de alta densidad aquellas que tenían entre 525 y 625 árboles/ha, mientras que plantaciones de súper alta densidad se consideraron aquellas que contenían entre 1.250 y 2.500 árboles/ha (Ladaniya et al., 2021).

En España, en el 2009 se establecieron en Andalucía las primeras parcelas experimentales de súper alta densidad en cítricos, siendo pionera a nivel mundial, con un número de árboles por hectárea entre 1.666 y 2.285. Las primeras parcelas comerciales con estas densidades han sido establecidas recientemente en Andalucía (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021), registrándose unas 1.000 hectáreas repartidas entre Huelva (800 ha) y Córdoba (120 ha).

Estos sistemas de plantación, de alta y súper alta densidad, requieren de un control efectivo sobre el crecimiento de la copa del árbol, siendo el empleo de patrones de reducido porte la estrategia más efectiva para ello (Gonzatto et al., 2022).

A este respecto, Bitters et al. (1979) propuso una clasificación para los patrones de cítricos según el tamaño final inducido sobre la variedad, en comparación con un árbol estándar de unos 6 metros de altura. Según esta clasificación, los patrones sub-

estándar, semi-enanizantes y enanizantes son aquellos que inducen un tamaño de árbol inferior al estándar en un 25, 50 y 75 %, respectivamente.

Actualmente existen diferentes patrones con la capacidad de reducir el tamaño del árbol, sin embargo, no todos ellos proporcionan un incremento en la eficiencia productiva de la variedad (kg/m³ de copa). El empleo de patrones de cítricos que induzcan un menor porte final del árbol junto a una mayor eficiencia productiva de la variedad es la clave para alcanzar, en plantaciones de mayor densidad, rendimientos similares, o incluso superiores, a los de las plantaciones tradicionales.

En este sentido y por estas razones, el patrón *Poncirus trifoliata* 'Flying dragon', patrón de carácter enanizante y de alta eficiencia productiva, es el patrón principalmente conocido y establecido en plantaciones de cítricos de mayor densidad (Donadio et al., 2019; Gonzatto et al., 2022). No obstante, su mala adaptación a determinados tipos de suelo (escaso desarrollo en suelos arenosos y/o alcalinos, con gran sensibilidad a la clorosis férrica), su sensibilidad al déficit hídrico y su incompatibilidad con determinadas variedades de cítricos (limón 'Eureka' en España) han propiciado su baja difusión por las regiones productoras del Mediterráneo. En el caso concreto de Andalucía, son varias las condiciones edafo-climáticas que limitan seriamente su implantación, tales como la alta presencia de suelos calizos y ph elevados, la textura arenosa típica de importantes zonas productoras de cítricos del litoral occidental o la escasez de precipitaciones en la región oriental.

Afortunadamente, existen varios programas de mejora genética que han obtenido nuevos patrones de cítricos semi-enanizantes y enanizantes (Gonzatto et al., 2022). Este es el caso del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), en el que cabría destacar el patrón US897 (*C. reshni* Hort. ex Tan. x *Poncirus trifoliata* 'Flying dragon'), la Universidad de Florida, en donde podría destacarse el patrón UFR-6 (*C. reticulata* 'Changsha' x *Poncirus trifoliata* '50-7'), la Corporación Brasileña de Investigación Agraria (EMBRAPA), con hibridaciones de mandarino 'Sunki' x *Poncirus trifoliata* 'Flying dragon' o 'Swingle' citrumelo, y el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), en donde se han obtenido diferentes patrones de reducido vigor, Forner-Alcaide nº 5, Forner-Alcaide nº 13, Forner-Alcaide nº 418 o Forner-Alcaide nº 517, por hibridaciones de mandarino 'King' o mandarino 'Cleopatra' x *Poncirus trifoliata*. Patrones de cítricos de los que, en general, no se dispone de mucha información sobre su adaptación o su comportamiento agronómico bajo condiciones agroclimáticas típicas del Mediterráneo.

Para estas plantaciones de mayor densidad interesa también un formato de planta más económico y pequeño, a fin de reducir los costes derivados del transporte y de la inversión inicial de la plantación (mayor necesidad de plantas por hectárea). En este sentido, el injerto de la variedad a una altura superior a la tradicional permitiría acortar los tiempos de multiplicación en vivero, reduciendo los costes de producción y abaratando los precios de la planta (Arenas-Arenas et al., 2020a).

Otro aspecto importante de estas plantaciones reside en el manejo adecuado de la plantación, a fin de potenciar las bondades del sistema y favorecer una gestión sostenible del mismo. El acolchado de la línea de plantación con malla negra se presenta como una estrategia compatible con estos sistemas de plantación, tanto de alta como de súper alta densidad, que presenta importantes ventajas económicas y medioambientales. Entre estas ventajas se encuentra un adelanto en la entrada en producción de los árboles, un control efectivo sobre las plantas adventicias de la línea de plantación y el aguado de los frutos (*Phytophthora* spp.) localizados en las ramas bajas del árbol y un ahorro hídrico del 30% en el riego de la plantación (Romero-Rodríguez et al., 2013; Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021). Por otro lado, el empleo de cubiertas vegetales entre líneas de plantación, junto con el acolchado de malla negra en la línea de plantación, permitiría el control total de las plantas adventicias de la plantación de una forma sostenible, fomentando además la biodiversidad y la calidad del suelo.

Finalmente, en plantaciones de súper alta densidad se recomienda la formación de los árboles en seto de dimensiones controladas (de unos 2,5 m de altura y 2 m de ancho) mediante el empleo de la poda mecanizada (**Fotografía 5**). Entre los principales objetivos de la formación de los árboles en seto están incrementar la eficiencia de los tratamientos fitosanitarios, reducir la necesidad de poda manual, facilitar la recolección manual de la fruta o, en el caso de plantaciones para industria, permitir la recolección mecanizada de la misma (Arenas-Arenas et al., 2017; Arenas-Arenas et al., 2020a).



Fotografía 5. Detalle de la poda mecanizada en una plantación de cítricos en súper alta densidad. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

3.3. Recolección mecanizada del cultivo

3.3.1. Equipos de recolección mecanizada

La orientación tradicional de la producción de los cítricos al mercado para fresco ha condicionado la recolección manual de la fruta (Arenas-Arenas y Hervalejo, 2021).

No obstante, en los últimos años se ha despertado un gran interés por la producción de cítricos para la industria con el objeto de diversificar la oferta y aprovechar la oportunidad del mercado europeo, principal consumidor mundial en zumos de naranja. Así, el sector de los cítricos en España presenta una posición geográfica estratégica con respecto a Europa, cuya cercanía le permite producir zumos de mayor calidad organoléptico-nutricional (zumos refrigerados) y medioambiental (menor huella de carbono) que los zumos concentrados procedentes de los principales países productores (Brasil y Estados Unidos). Otra oportunidad del mercado de zumos para Europa ha sido la fuerte caída de producción de zumos en el mercado internacional como consecuencia de la enfermedad del Huanglongbing de los cítricos.

El incremento de las explotaciones de cítricos para industria, unido a los actuales problemas de mano de obra para las labores de campo (escasa, cara y poco cualificada) ha despertado un interés por la recolección mecanizada de los cítricos.

Los avances en este sentido han ido principalmente orientados en dos líneas de trabajo según el destino de la producción: *herramientas o equipos de asistencia al operario*, para plantaciones de cítricos con destino al mercado en fresco, y *equipos de recolección*, para plantaciones de cítricos con destino a industria (Blanco-Roldán et al., 2011; Chueca et al., 2020).

Los equipos de recolección mecanizada en cítricos han sido desarrollados principalmente en Estados Unidos y en Australia (Brown, 2005; Sanders, 2005). Estos equipos comprenden aquellos sistemas y máquinas capaces de desprender el fruto del árbol. Existen diferentes tipos de equipos de recolección en función de su principio de funcionamiento: *vibradores de aire*, *vibradores de tronco*, *vibradores de rama* y *sacudidores de copa* (Sanders, 2005). Los sistemas de recolección que actualmente se han impuesto son los *vibradores de tronco* (**Fotografía 6**) y los *sacudidores de copa* (**Fotografía 7**), cuya conveniencia atienden al diseño de la plantación (Arenas-Arenas et al., 2018). Así, mientras que en las plantaciones más tradicionales (amplios marcos de plantación y árboles de gran tamaño) son los vibradores de tronco la única opción posible, en las plantaciones convencionales (marco de plantación rectangular y más estrecho) son los sistemas sacudidores de copa la alternativa de mayor interés, los cuales permiten el derribo continuo de los frutos a lo largo de la línea.



Fotografía 6. Equipo vibrador de tronco. Fuente: Chueca et al., 2020

El desarrollo de los equipos sacudidores de copa se lleva a cabo en cítricos desde los 70s, siendo muchos los ensayos que se han realizado en su adaptación a las necesidades del cultivo (Sanders, 2005; Blanco-Roldán et al., 2011). Estos equipos realizan una vibración en la parte fructífera de la copa a través de la introducción parcial de varas horizontales, agitando las ramas mediante un movimiento horizontal oscilatorio (Arenas-Arenas et al., 2018).

Existen diversos tipos de equipos sacudidores de copa con características y prestaciones muy diferentes (Blanco-Roldán et al., 2011; Arenas-Arenas et al., 2018): remolcado y accionado por un tractor (**Fotografía 7**) o autopropulsado; sin o con sistema

de recogida, limpieza y almacenamiento de la fruta (**Fotografía 8**); y con recogida a uno o a ambos lados del árbol (**Fotografía 9**).



Fotografía 7. Equipo sacudidor de copa accionado y remolcado por tractor y con derribo de la fruta al suelo (OXBO 3210). Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

Según varios ensayos realizados con sacudidores de copa en plantaciones de cítricos en Andalucía (Arenas-Arenas et al., 2011; Blanco-Roldán et al., 2011), la adecuada formación de la plantación (setos altos de faldas, o ramas bajas, elevadas) junto a la correcta regulación de los parámetros de trabajo de estos equipos permitirían obtener elevados porcentajes de derribo, sin ocasionar daños considerables al árbol ni alterar la calidad interna de los frutos con destino a industria. No obstante, dado el gran tamaño y peso de estos equipos, su implementación se limita a explotaciones de gran tamaño, orografía plana y suelos de textura ligera o media (sin riesgos de encharcamiento), lo cual es poco común entre las explotaciones de cítricos andaluzas. Es por tal motivo, que el cultivo de cítricos superintensivo, plantaciones de súper alta densidad y recolección mecanizada, ha despertado recientemente un gran interés en el sector andaluz.



Fotografía 8. Sacudidores de copa autopropulsados con estructuras de recogida (OXBO 3220) trabajando de forma sincronizada ambos lados de la línea de plantación.

Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres



Fotografía 9. Sacudidor de copa cabalgante autopropulsada (Colossus). Fuente:

Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

3.3.2. El cultivo superintensivo de cítricos

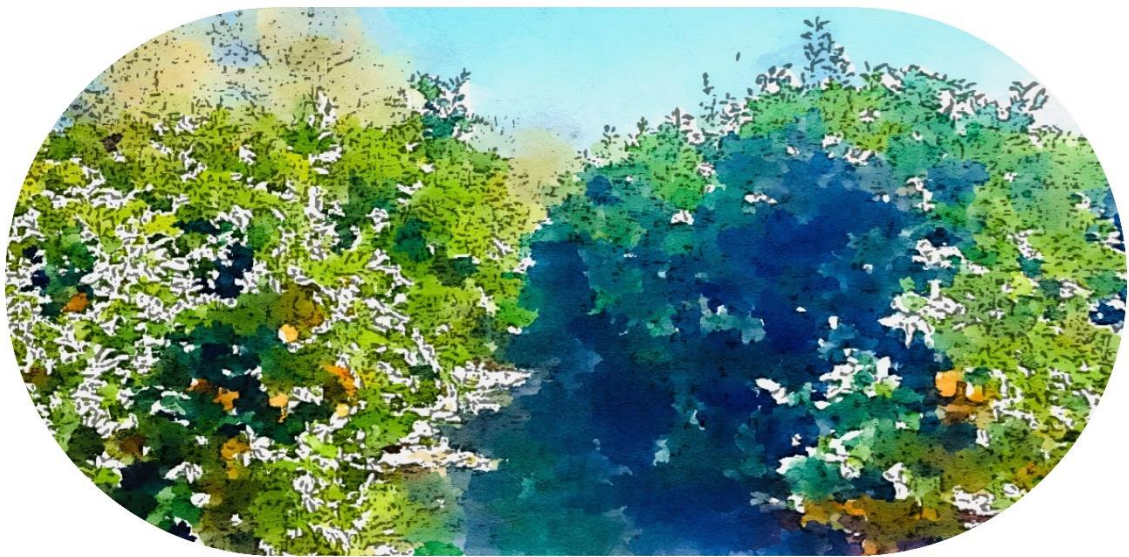
En el cultivo superintensivo de los cítricos, o plantaciones de súper alta densidad orientada a la mecanización integral del cultivo (Arenas y Hervalejo, 2012), los sacudidores de copa cabalgantes `tipo vendimiadora´ (**Fotografía 10**) se presentan como los equipos de recolección más apropiados. Las primeras experiencias de recolección mecanizada realizados en Andalucía con estos equipos han mostrado de

forma preliminar buenos resultados en plantaciones de cítricos con destino a industria (Bordas et al., 2012; Arenas-Arenas et al., 2016). No obstante, existen muy pocas experiencias en cuanto a la adaptación y el comportamiento de diferente material vegetal, variedades, patrones y combinaciones variedad-patrón, a marcos de plantación reducidos y recolección mecanizada con equipos sacudidores de copa cabalgantes `tipo vendimiadora´.

Por último, estos equipos de recolección también podrían tener buena acogida en las plantaciones de súper alta densidad para fresco en dos escenarios distintos (Arenas-Arenas et al., 2020b): como *recolección complementaria* tras la recolección manual de la fruta de calidad comercial, para recoger la fruta de destrío con destino a industria; o como *recolección ocasional* en campañas con exceso de oferta en cítricos, escasez de mano de obra o precios interesantes para la industria.



Fotografía 10. Equipo sacudidor de copa cabalgante `tipo vendimiadora´ (New Holland Braud 9090X): a) Detalle de los árboles antes del pase del equipo; b) Detalle de los árboles tras el pase del equipo. Fuente: Departamento de Cítricos. IFAPA Las Torres

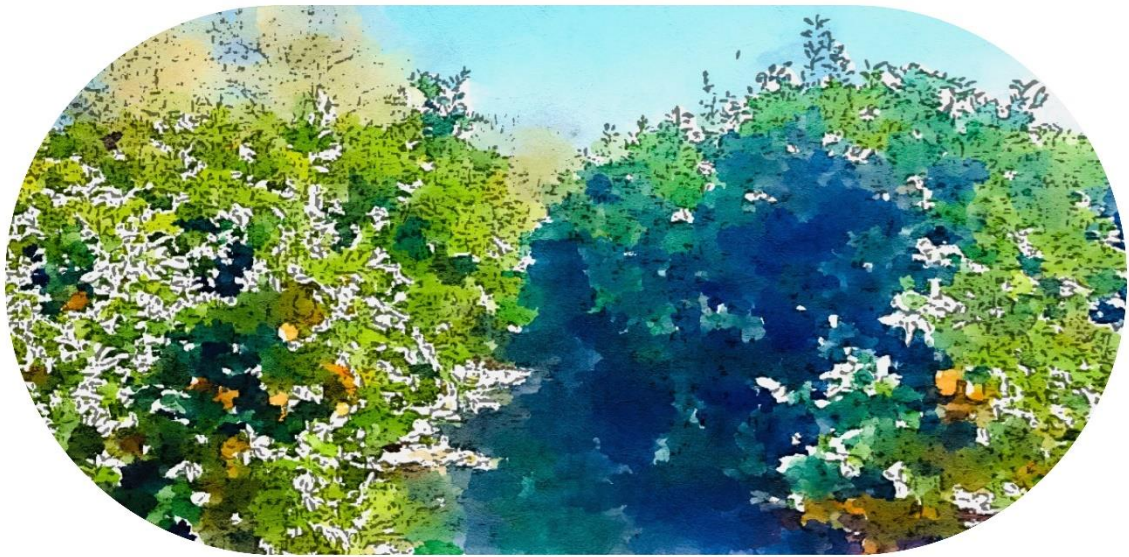


OBJETIVOS

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo de tesis ha sido evaluar la idoneidad y el interés agronómico de varios patrones de cítricos de menor porte, sub-estándar (Forner-Alcaide nº 5), semi-enanizantes (Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 41) y enanizantes (Forner-Alcaide nº 418 y Forner-Alcaide nº 517) del programa de mejora genética del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA, España), para el desarrollo de modelos de cultivo más rentables y sostenibles bajo condiciones edafo-climáticas de Andalucía Occidental. Este objetivo principal ha sido desarrollado en dos objetivos específicos, cada uno orientado a un grado de intensificación diferente, de una menor a una mayor densidad de plantación, a fin de generar un conocimiento científico que apoye el desarrollo de modelos de intensificación compatibles con la diversidad física y socioeconómica de la citricultura andaluza:

1. Caracterización agronómica de diferentes patrones de cítricos, sub-estándar y semi-enanizantes, interesantes para un sistema de plantación de alta densidad.
2. Evaluación agronómica de dos patrones de cítricos enanizantes bajo condiciones de cultivo de súper alta densidad con recolección mecanizada.



CAPÍTULOS

Capítulo I. Caracterización agronómica de diferentes patrones de cítricos, sub-estándar y semi-enanizantes, interesantes para un sistema de plantación de alta densidad

Este primer capítulo comprende *dos publicaciones científicas*:

- Hervalejo, A., Suárez, M.P., Moreno-Rojas, J.M., Arenas-Arenas, F.J., 2020. Overall fruit quality of `Lane Late´ orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks. J. Agr. Sci. Tech. Vol. 22(1), 235-246.

<http://jast.modares.ac.ir/article-23-16325-en.html>

- Hervalejo, A., Suárez, M.P., Arenas-Arenas, F.J. 2021., Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks for more intensive, higher-density, and sustainable plantation systems. Agronomy 11, 660.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11040660>

Resumen

El primer capítulo de esta tesis trata de la caracterización agronómica de tres patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes interesantes para sistemas de cultivo sostenibles de alta densidad. Este capítulo está compuesto por dos artículos en los que, por un lado, se caracteriza la calidad general de la naranja `Lane Late´ sobre estos tres patrones de cítricos y, por otro, se evalúa la conveniencia de éstos para sistemas de plantación más sostenibles y de mayor densidad.

En el primer artículo, **Overall fruit quality of `Lane Late´ orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks**, publicado en el 2020 en la revista Journal of Agricultural Science and Technology, se ha evaluado la apariencia o calidad morfológica, el sabor o calidad organoléptica y los compuestos bioactivos o calidad funcional de la naranja `Lane Late´ sobre tres patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes, Forner-Alcaide nº 5 (FA-5), Forner-Alcaide nº 13 (FA-13) y Forner-Alcaide nº 41 (FA-41), en comparación con tres patrones tradicionales, citrange Carrizo, *Citrus macrophylla* y mandarino 'Cleopatra', en España. Se obtuvieron diferencias entre patrones en el momento óptimo de recolección. Mandarino 'Cleopatra', FA-13 y FA-5 mostraron una fecha óptima de recolección más tardía (mes de marzo, entre uno y dos meses más tarde que *C. macrophylla*, c. Carrizo o FA-41) y más interesante para la variedad `Lane Late´. A pesar de recolectar los frutos de `Lane Late´ en la fecha más adecuada para cada patrón, se observaron diferencias significativas en la calidad general de la fruta.

Así, *C. macrophylla* indujo sobre 'Lane Late' fruta de mayor tamaño, pero de menor calidad organoléptica, c. Carrizo indujo el menor contenido en compuestos bioactivos, mientras que FA-5, FA-13 y mandarina 'Cleopatra' indujeron la mayor calidad interna. Los frutos de 'Lane Late' sobre FA-41 mostraron un comportamiento intermedio.

En el segundo artículo, **Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks for more intensive, higher-density, and sustainable plantation systems**, publicado en el 2021 en la revista *Agronomy*, se ha evaluado el desarrollo agronómico de la variedad 'Lane Late' sobre estos tres patrones de cítricos sub-estándar o semi-enanizantes (FA-5, FA-13 y FA-41) en comparación con los tres tradicionales (c. Carrizo, *C. macrophylla* y mandarina 'Cleopatra') bajo condiciones de baja fertilización en España. FA-13 y FA-41 indujeron los árboles de 'Lane Late' más pequeños. A pesar de que el patrón no indujo un efecto significativo en la eficiencia productiva de 'Lane Late' (kg/m^3), los valores más altos fueron registrados sobre *C. macrophylla*, mandarina 'Cleopatra' y FA-13. En este sentido, FA-13 mostró un alto potencial productivo (kg/ha), dado que el menor tamaño de los árboles otorga la posibilidad de estrechar la distancia entre los mismos. En cuanto al uso de los nutrientes del suelo, FA-13 fue el más eficiente. Así, FA-13 destacó como el patrón de cítricos más conveniente para sistemas de plantación de naranjo 'Lane Late' más intensivos y sostenibles bajo condiciones mediterráneas similares a las de este estudio.

En vista a los resultados obtenidos en este capítulo, varios patrones de cítricos de carácter sub-estándar y/o semi-enanizantes han sido identificados como patrones más interesantes que c. Carrizo y *C. macrophylla*, ambos patrones tradicionalmente empleados en las plantaciones de Andalucía. Así Forner-Alcaide nº 5 y Forner-Alcaide nº 13 se han mostrado de mayor interés desde el punto de vista comercial de la fruta, permitiendo obtener fruta de mejor calidad organoléptica y/o funcional en una fecha más competitiva para esta variedad de maduración tardía. Por otro lado, Forner-Alcaide nº 41 y Forner-Alcaide nº 13 mostraron un mayor potencial productivo en sistemas de plantación de mayor densidad, mostrando también una mayor eficiencia en el uso de los nutrientes del suelo que c. Carrizo. Así, teniendo en cuenta todos los parámetros estudiados, Forner-Alcaide nº 13 se presenta como el patrón más adecuado para el establecimiento de plantaciones de 'Lane Late' más sostenibles y competitivas bajo sistemas de cultivo de mayor densidad.

Artículo 1. Overall fruit quality of `Lane Late´ orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks

Título (en español): Calidad general de la naranja `Lane Late´ sobre patrones de cítricos semi-estándar y semi-enanizantes

Autores: Áurea Hervalejo^{1*}, María Paz Suarez², Jose Manuel Moreno Rojas³ y Francisco José Arenas Arenas¹

Afiliaciones:

¹ IFAPA Centro Las Torres. Ctra. Sevilla- Cazalla Km. 12,2. 41200. Alcalá del Río, Sevilla, España.

² Departamento de Ciencias Agroforestales, ETSIA, Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera Km. 1. 41013. Sevilla, España.

³ IFAPA Centro Alameda del Obispo. Avda. Menéndez Pidal s/n. 14004. Córdoba. España.

Revista: Journal of Agricultural Science and Technology

Año de Publicación: 2020

Número y páginas: 22(1), 235-246

URL: <http://jast.modares.ac.ir/article-23-16325-en.html>

Índice de impacto: 1,098 (JCR, 2020) (3^{er}Q)

Área y posición: Agriculture, Mutidisciplinary - SCIE (2020). Posición 35/57

Overall Fruit Quality of 'Lane Late' Orange on Sub-Standard and Semi-Dwarfing Rootstocks

A. Hervalejo^{1*}, M. P. Suarez², J. M. Moreno-Rojas³, and F. J. Arenas-Arenas¹

ABSTRACT

Appearance, taste, and bioactive compounds of 'Lane Late' orange fruits on three sub-standard or semi-dwarfing rootstocks [Forner-Alcaide no. 5, Forner-Alcaide no. 13 and Forner-Alcaide no. 41] were evaluated in Spain against three more traditional rootstocks [Carrizo citrange, *Citrus macrophylla* and 'Cleopatra' mandarin]. Different harvesting times were identified per rootstock. The most suitable harvesting time for 'Lane Late' orange fruits on 'Cleopatra' mandarin, Forner-Alcaide no. 13 or Forner-Alcaide no. 5 was March, between one and two months later than *Citrus macrophylla*, Carrizo citrange or Forner-Alcaide no. 41, more relevant date for this late-season navel orange. Despite harvesting 'Lane Late' orange fruits on the most suitable date for each rootstock, significant differences in overall fruit quality were observed among them. Thus, *Citrus macrophylla* induced the largest size but also the lowest organoleptic quality, Carrizo citrange induced the lowest bioactive compounds content, while Forner-Alcaide no. 5, Forner-Alcaide no. 13 and 'Cleopatra' mandarin induced the highest internal quality. Lane Late orange fruits on Forner-Alcaide no. 41 showed an intermediate behavior.

Keywords: Harvesting time, Ripening index, Traditional rootstocks, Physiological disorders, Polyphenols content

INTRODUCTION

Spain, the sixth producer of citrus fruits worldwide and the leading exporter of fresh citrus fruits, encompasses 294,258 hectares of citrus crop. Sweet orange [*Citrus sinensis* (L.) Osb] is the most important citrus species, for which the most widely cultivated cultivars in Spain belong to the Navel group (MAPAMA, 2017).

Most navel oranges fruits in Spain are used for fresh consumption (MAPAMA, 2017), thus, both the external and organoleptic fruit quality are of great importance. In addition, considering the current healthier lifestyle, the fruit's health promoting properties should be taken into account. Flavonoids, group of polyphenolic

compounds, appear to be associated with a lower risk of major diseases (Gattuso *et al.*, 2007).

Citrus fruits overall quality not only depends on the species or cultivar (Gorinnstein *et al.*, 2001; Cardeñosa *et al.*, 2015), but culture conditions (Hervalejo *et al.*, 2007; Navarro *et al.*, 2010), rootstock (Forner-Giner *et al.*, 2003; Hervalejo *et al.*, 2010; Legua *et al.*, 2014) or fruit ripening stage (Xu *et al.*, 2008) may also have a major impact.

In Spain, Carrizo citrange is the main rootstock used in citrus, over 80% of nursery production (Forner-Giner *et al.*, 2003). Therefore, new citrus rootstocks are necessary not only to adapt the citrus crop to different environmental conditions but to

¹ IFAPA Las Torres Center. Ctra. Sevilla- Cazalla Km. 12,2. 41200. Alcalá del Río, Seville, Spain.

*Corresponding author, e-mail: aurea.hervalejo@juntadeandalucia.es

² Department of Agroforestry Sciences, ETSIA, University of Seville. Ctra. Utrera Km. 1. 41013. Seville, Spain.

³ IFAPA Alameda del Obispo Center. Avda. Menéndez Pidal s / n. 14004. Cordoba. Spain.



improve the agronomical behavior of the grafted citrus cultivar or reduce the production cost (reduced vegetative growth rootstocks with less pruning needs and easier harvesting).

In this sense, in 1974, J.B. Forner began a program for breeding citrus rootstocks by traditional hybridization at the Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) in Spain (Forner and Alcaide, 1993, 1994; Forner-Giner *et al.*, 2003). New interesting citrus rootstocks to reduce tree size, such as Forner-Alcaide no. 5, Forner-Alcaide no. 13 and Forner-Alcaide no. 41, emerged from this program (Forner *et al.*, 2003).

In this context, this work aimed to evaluate the overall fruit quality of 'Lane Late' orange (appearance, taste and bioactive compounds) grafted on six rootstocks according to ripening stage, over five consecutive seasons. The study rootstocks included three sub-standard or semi-dwarfing rootstocks, and the other three were more traditional. This study discusses the most appropriate harvesting time of 'Lane Late' orange for each citrus rootstocks.

MATERIALS AND METHODS

Plant Material and Experimental Design

The study was carried out throughout five seasons (2009/2010-2013/2014) in an experimental plot in Sevilla (Spain) with Mediterranean climate, 18.1 °C average annual temperature, 586 mm annual rainfall, and 1292 mm reference evapotranspiration (ET_0), Loamy soil texture (25% clay, 32% sand and 43% silt), with organic matter level around 1.0%, 0.12 dS/m electrical conductivity of a 1:5 soil water extract, 4.8% active $CaCO_3$ and pH of 8.0.

Standard cultural practices were applied, including drip irrigation, chemical weed-control and hand-pruned annually after harvest. Irrigation was applied by two drip-

lines for each tree row, with 2.20 L/h drippers every 60 cm. Seasonal water requirements were calculated based on reference evapotranspiration (ET_0) and citrus crop coefficient (K_c) (Doorenbos and Pruitt, 1977).

The experimental plot consisted of 4800 m² with 'Lane Late' orange trees on *Citrus macrophylla* Wester, Carrizo citrange [*Citrus sinensis* (L.) Osb. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.], 'Cleopatra' mandarin (*Citrus reshni* Hot. ex Tan.) and three hybrid selections, sub-standard or semi-dwarfing rootstocks: Forner-Alcaide no. 5 [*Citrus reshni* Hort. ex Tan. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.], Forner-Alcaide no. 13 [*Citrus reshni* Hort. ex Tan. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.] and Forner-Alcaide no. 41 [*Citrus reshni* Hort. ex Tan. x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.].

The 'Lane Late' orange trees were 6 years old at the beginning of the experiment. Tree spacing was 6 m x 4 m. The design consisted of 4 randomized blocks, including a primary plot with 6 trees (N=24).

Samples

Three fruit samplings were conducted from January to April to establish the effect of the ripening stage on quality parameters at the beginning (January) and the end (April) of the 'Lane Late' orange harvesting period, taking March as an intermediate date. Samples consisting of 25 fruits were collected from each rootstock and replication. Morphological and organoleptic quality parameters were measured during five seasons (2009/2010-2013/2014). Bioactive compounds determination was performed during 2012/2013 and 2013/2014.

Morphological Parameters

Fruit morphological parameters evaluated were color index, weight (g), equatorial diameter (D, mm), height (H, mm), shape (D/H) and peel thickness (mm).

Color index was measured with a colorimeter (Konica Minolta, CR-300,

Ramsey, NJ, USA) at three points around the fruit equatorial plane. Using Hunter parameters, Color index (C.I.) was calculated as $C.I. = a \times 100 / (L \times b)$, where L indicates lightness and a and b are chromaticity coordinates (Jiménez-Cuesta *et al.*, 1981).

Samples were weighed using a digital scale, and fruit weight was determined by dividing fruit sample weight (g) by the total number of fruits in the sample.

Equatorial diameter (D), height (H) and peel thickness were determined using an electronic digital slide gauge (Mitutoyo, Absolute digimatic caliper, East Kilbride, UK).

Organoleptic Parameters

The juice parameters analyzed were juice content %, density (g/mL), titrable acidity (TA; g/100 mL), total soluble solids (TSS, °Brix) and ripening index ($RI = TSS/TA$).

The juice from each fruit sample was extracted using an electric squeezer, and juice percentage (w/w) was calculated by the juice weight over fruit sample weight ratio.

Juice density was determined by a Hydrometer 1000-1100 calibrated at 20 °C (Nahita, Madrid, Spain). The hydrometer was inserted into a 100 mL test tube full to overflowing with juice, being the density (g/cc) the reading of the point where the surface of the juice touches the stem of the hydrometer. Before measuring density, the juice was tempered at the reference temperature indicated in the hydrometer (20 °C).

TSS was measured using a digital refractometer (Atago, PR100, Bellevue, WA, USA) and TA was determined by titration of 5 mL of juice with 0.1 N NaOH using phenolphthalein as indicator (Forner-Giner *et al.*, 2003; Legua *et al.*, 2011a, b).

Physiological Disorders and Inner Firmness

The inner firmness and the degree of fruit creasing and granulation were evaluated.

Inner firmness was measured as the maximum penetration force (N) reached during tissue breakage and was determined with a 5 mm diameter flat probe. Penetration depth was 5 mm and the cross-head speed was 40 mm/s using a TA-XT Plus Texture Analyzer (Stable Micro Systems, Godalming, UK). 'Lane Late' orange fruits were peeled and firmness was measured in the equatorial zone.

The degree of creasing and granulation were determined using a 4-point rating scale: 0 = no disorder in the fruit, 1 = mild disorder, 2 = moderate disorder, 3 = severe disorder.

Total Polyphenolic and Total Flavonoid Content

Fresh 'Lane Late' orange fruit (1 g) was extracted with 3 mL dimethyl sulfoxide:methanol (50:50 v/v). The mixtures were vortexed for 2 minutes and, later, centrifuged at 5000 rpm for 15 minutes at 4 °C. Supernatants were transferred to vials, stored at -80 °C, and subsequently used to analyze total phenolics and flavonoids.

Total phenolics were determined with Folin-Ciocalteu reagent using the Slinkard and Singleton (1977) method. An aliquot of the extract (40 µL) was mixed with 1.9 mL of distilled water and subsequently with 120 µL of Folin-Ciocalteu reagent. After 3 minutes, 400 µL of a 20% aqueous sodium carbonate solution was added. Samples were allowed to stand for 2 hours and subsequently read at 765 nm with a spectrophotometer (Shimadzu UV 2401 PC, Columbia, MD, USA) and compared with a known concentration range of similarly prepared gallic acid standards. Results were expressed as milligrams of gallic acid equivalents per 100 g of fresh weight of orange fruits (mg EG/100 g FW).

Total flavonoids were determined by using a colorimetric method previously described by Dewanto *et al.* (2002). An aliquot of the previously diluted extract (250 µL) was



mixed with 1.5 mL of distilled water and subsequently with 75 μ L of a 5% NaNO₂ solution. After 6 minutes, 150 μ L of a 10% AlCl₃-6H₂O solution was added and allowed to stand for 5 minutes before further addition of 0.5 mL of 1 M NaOH. Samples were subsequently read 30 minutes at 415 nm against a prepared blank using a spectrophotometer (Shimadzu UV 2401 PC, Columbia, MD, USA) and compared with a known concentration range of quercetin standards similarly prepared. Results are expressed as micrograms of quercetin equivalents per gram of fresh weight of orange fruits (μ g EQ/g FW).

Statistical Analysis

Data were statistically analyzed using variance analysis (ANOVA) procedures. Means were separated through Tukey's multiple range test, using the STATISTICA 7.0 software package (Statsoft Inc. 2004). Normality and homogeneity assumptions were tested before ANOVA, using the Kolmogorov-Smirnov and Cochran's tests, respectively. In the case of non-observance of the normality and homogeneity assumptions, a nonparametric Kruskal-Wallis test was adopted.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, both ripening stage and rootstock affected the overall fruit quality: appearance, taste, and bioactive compounds. Thus, this effect needs to be established in order to properly identify the most suitable fruit harvesting time per rootstock and establish the best overall 'Lane Late' orange fruit quality.

Suitable Harvesting Time of 'Lane Late' Orange Fruits per Rootstock

All rootstocks showed a similar trend throughout the different sampling dates in

terms of morphological (Table 1) and bioactive compounds (Table 4), but not fruit organoleptic quality (Table 2) or physiological alterations (Table 3).

Morphological Parameters

Fruit size increased with fruit ripening (Table 1). These results are in line with those reported by Fattahi *et al.* (2011) and Merino *et al.* (2015). Thus, April might be more interesting in terms of obtaining larger fruits. Yet, by January, 'Lane Late' orange fruit on *Citrus macrophylla* had already reached significant diameter and weight (84.89 mm and 305 g), surpassed only by Carrizo citrange (85.00 mm and 321 g, respectively) in April (Table 1). The evolution towards a more elongated fruit and thicker peel (Table 1) does not have a major impact on fruit quality in itself. However, extremes in peel thickness are not desirable. Fruits with a thick peel are rougher fruits, whereas those of thin peel are more sensitive to peel disorders during postharvest handling and storage. Despite the fact that 'Lane Late' orange fruit partially reverted to a greener peel color in April (lower CI values; Table 1), which is known as 'regreening', 'Lane Late' orange fruit color index recorded in April was similar to the one obtained in January.

Organoleptic Parameters

Ripening index, the total soluble solids to acid ratio, is the basis for establishing commercial maturity (R (EU) no. 543/2011 of European Commission, of 7 June 2011) and fruit taste. In this respect, the "Pritchett tongue" (Baier, 1954) associated juice taste with the relationship between total soluble solids and the ripening index (RI). A minimum RI of 6.5 is required for commercial maturing of navel oranges fruits, while a RI greater than 16 requires a minimum total soluble solids content of 12 °Brix to preserve an acceptable organoleptic

Table 1. Effect of rootstock and sampling date on morphological 'Lane Late' orange fruit quality.^a

Rootstock	D(mm) ^a						H (mm)						D/H											
	January		March		April		January		March		April		January	March	April	Mean								
	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns								
CA	83.31	cd	83.81	b	85.00	bc	84.04	c	83.05	cd	85.17	bc	86.70	cd	84.97	cd	1.01	a	0.99	a	0.98	abc	0.99	a
CL	78.99	ab	80.78	a	81.27	a	80.43	ab	79.05	ab	82.58	ab	84.08	ab	82.04	ab	1.00	a	0.98	a	0.97	a	0.98	a
FA13	77.84	a	80.21	a	82.01	ab	80.06	a	76.81	a	80.73	a	83.01	a	80.19	a	1.02	a	1.00	a	0.99	bc	1.00	a
FA41	80.92	bc	81.90	ab	83.62	ab	82.20	bc	80.84	bc	83.65	ab	85.99	abc	83.49	bc	1.00	a	0.98	a	0.98	ab	0.99	a
FA5	80.97	bc	82.71	ab	83.31	ab	82.33	bc	80.49	bc	83.31	ab	85.42	abc	83.07	bc	1.01	a	1.00	a	0.98	abc	0.99	a
MP	84.89	d	87.27	c	87.70	c	86.62	d	84.27	d	88.60	c	88.63	d	87.16	d	1.01	a	0.99	a	0.99	c	1.00	a
Mean	81.15	A	82.78	B	83.82	C	82.61		80.75	A	84.01	B	85.64	C	83.49		1.01	B	0.99	A	0.98	A	0.99	
Rootstock*Date	ns																							
Rootstock	Tp (mm)						CI						W (g)											
	January		March		April		January		March		April		January	March	April	Mean								
	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns								
CA	5.53	a	5.91	a	6.12	ab	5.85	b	12.31	a	13.62	a	12.30	a	12.74	a	294	cd	297	ab	321	b	304	bc
CL	5.37	a	5.75	a	5.80	a	5.64	ab	12.13	a	13.65	a	12.31	a	12.70	a	250	ab	274	a	281	a	270	a
FA13	5.26	a	5.49	a	5.98	a	5.58	ab	11.37	a	12.48	a	12.47	a	12.11	a	244	a	267	a	286	a	266	a
FA41	5.55	a	5.83	a	6.31	ab	5.90	b	11.95	a	12.47	a	11.93	a	12.12	a	274	bc	287	a	301	ab	287	ab
FA5	5.21	a	5.60	a	5.50	a	5.44	a	12.17	a	13.65	a	11.97	a	12.60	a	276	c	290	a	297	ab	288	ab
MP	6.48	b	6.92	b	6.90	b	6.76	c	12.41	a	14.13	a	12.70	a	13.08	a	305	d	326	b	328	b	320	c
Mean	5.56	A	5.92	B	5.95	B	5.86		12.06	A	13.33	B	12.28	A	12.56		274	A	290	B	303	C	289	
Rootstock*Date	ns																							

^a Mean values in the same column followed by different lower case letters indicate significant differences between rootstocks, by Tukey's test ($P < 0.05$). Mean values in the same row followed by different upper case letters indicate significant differences between sampling dates. ns: no significant interaction. ns: no significant interaction. CA: Carrizo citrange; CL: Cleopatra mandarin; FA13: Former-Alcaide no. 13; FA41: Former-Alcaide no. 41; FA5: Former-Alcaide no. 5; MP: C. macrophylla Wester.



Table 2. Effect of rootstock and sampling date on 'Lane Late' orange organoleptic fruit quality. ^a

Rootstock	Juice (%) ^b				Density (g/cc)			
	January	March	April	Mean	January	March	April	Mean
	49.17 bc B	47.17 b B	43.14 b A	46.49 b	1.035 ab	1.050 a	1.043 a	1.043 ab
CL	47.79 bc A	47.56 b A	45.51 b A	46.98 bc	1.040 ab	1.049 a	1.049 a	1.047 b
FA13	49.35 c A	49.46 b A	46.85 b A	48.55 c	1.046 b	1.049 a	1.048 a	1.047 b
FA41	47.15 b A	47.46 b A	45.71 b A	46.77 bc	1.037 ab	1.052 a	1.042 a	1.043 b
FA5	47.66 bc A	48.87 b A	47.34 b A	47.96 bc	1.048 b	1.046 a	1.050 a	1.048 b
MP	43.17 a B	39.56 a A	38.51 a A	40.42 a	1.025 a	1.039 a	1.039 a	1.034 a
Mean	47.38 B	46.68 B	44.51 A	46.20 *	1.038 A	1.04 A	1.045 A	1.044
Rootstock*Date	ns							
Rootstock	TSS (°Brix)				TA (g/100cc)			
	January	March	April	Mean	January	March	April	Mean
	10.54 b	11.45 b	11.51 b	11.14 b	0.85 ab	0.64 a	0.58 b	0.68 b
CL	10.98 bc	11.93 bc	12.22 cd	11.71 cd	0.97 bc	0.77 b	0.63 bc	0.79 c
FA13	11.81 d	12.53 d	12.59 d	12.31 e	0.98 bc	0.83 b	0.68 c	0.83 c
FA41	11.02 bc	11.58 b	11.67 bc	11.39 bc	0.80 a	0.65 a	0.57 b	0.67 b
FA5	11.31 c	12.16 cd	12.44 d	11.97 de	0.99 c	0.80 b	0.70 c	0.83 c
MP	9.36 a	9.80 a	10.36 a	9.85 a	0.80 a	0.57 a	0.47 a	0.60 a
Mean	10.83 A	11.58 B	11.80 B	11.39	0.90 C	0.71 B	0.60 A	0.73
Rootstock*Date	ns							
Rootstock	RI				TA (g/100cc)			
	January	March	April	Mean	January	March	April	Mean
	13.13 ab	18.14 b	20.60 bcd	17.45 b	13.13 ab	18.14 b	20.60 bcd	17.45 b
CL	11.51 a	15.89 a	20.03 abc	15.77 a	11.51 a	15.89 a	20.03 abc	15.77 a
FA13	12.33 ab	15.61 a	19.34 ab	15.76 a	12.33 ab	15.61 a	19.34 ab	15.76 a
FA41	13.70 b	18.31 b	21.40 cd	17.95 b	13.70 b	18.31 b	21.40 cd	17.95 b
FA5	11.50 a	15.59 a	18.53 a	15.20 a	11.50 a	15.59 a	18.53 a	15.20 a
MP	12.20 ab	17.20 ab	22.44 d	17.24 ab	12.20 ab	17.20 ab	22.44 d	17.24 ab
Mean	12.39 A	16.79 B	20.39 C	16.56	12.39 A	16.79 B	20.39 C	16.56
Rootstock*Date	ns							

^a Mean values in the same column followed by different lower case letters indicate significant differences between rootstocks, by Tukey's test (P < 0.05). Mean values in the same row followed by different upper case letters indicate significant differences between sampling dates. ns: no significant interaction. ^b Juice content (Juice), juice density (Density), total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA) and ripening index (RI), during 2009/2010 to 2013/2014 seasons. CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no. 13; FA41: Forner-Alcaide no. 41; FA5: Forner-Alcaide no. 5; MP: C. *macrophylla* Wester.

Table 3. Effect of rootstock and sampling date on 'Lane Late' inner orange fruit firmness, during 2012/2013 and 2013/2014 seasons, and physiological alterations: creasing and granulation, during 2009/2010, to 2013/2014 seasons.

Rootstock	Firmness (N)						Creasing ^a						Granulation ^a														
	January		March		April		January		March		April		January		March		April		Mean								
	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns	Mean	ns							
CA	7.72 a	6.92 a	5.41 a	6.68 ab	0.06 a	0.21 a	0.17 a	0.63 b A	0.70 ab A	0.91 ab A	0.75 ab	0.57 b A	0.71 ab A	0.84 ab A	0.72 ab	0.30 a A	0.40 a A	0.74 a B	0.48 a	0.45 ab A	0.60 a A	0.86 ab A	0.64 a				
CL	7.53 a	7.45 a	5.70 ab	6.89 abc	0.06 a	0.36 a	0.23 a	0.36 a	0.16 a	0.16 a	0.18 a	0.51 ab A	0.77 ab AB	0.89 ab B	0.72 ab	0.06 a	0.16 a	0.16 a	0.24 a	0.21 a	0.64 a	0.50 a	0.59 b A	1.23 b B	1.15 b B	0.99 b	
FA13	8.27 a	7.13 a	6.46 b	7.28 c	0.00 a	0.16 a	0.22 a	0.18 a	0.16 a	0.16 a	0.22 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.00 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B
FA41	7.73 a	7.21 a	6.42 b	7.12 bc	0.06 a	0.16 a	0.22 a	0.18 a	0.16 a	0.16 a	0.22 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.00 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B
FA5	8.02 a	6.48 a	6.33 ab	6.94 abc	0.01 a	0.28 a	0.24 a	0.22 a	0.28 a	0.24 a	0.22 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.00 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B
MP	7.23 a	6.64 a	5.95 ab	6.61 a	0.21 a	0.64 a	0.50 a	0.45 a	0.64 a	0.50 a	0.45 a	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	
Mean	7.75 B	6.97 B	6.04 A	6.92	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	0.21	0.07 A	0.30 B	0.25 B	
Rootstock*Date	ns																										

^a <1: mild, 1-2: moderate and >2: severe alteration. Mean values in the same column followed by different lower case letters indicate significant differences between rootstocks, by Tukey's test (P < 0.05). Mean values in the same row followed by different upper case letters indicate significant differences between sampling dates. ns: no significant interaction. *: significant interaction. ns: no significant interaction; CA: Carrizo citrange; CL: Cleopatra mandarin; FA13: Former-Alcaide no. 13; FA41: Former-Alcaide no. 41; FA5: Former-Alcaide no. 5; MP: C. macrophylla Wester.

juice quality (the "Pritchett tongue"). During 'Lane Late' orange fruit ripening, total soluble solids increased while titratable acidity decreased (Table 2), evolving in line with the process noticed by Kahn *et al.* (2007) in certain Navel orange cultivars. Evolution of these parameters resulted in an increase in the ripening index (Table 2), which has also been observed for other navel orange cultivars or even other citrus species (Fattahi *et al.*, 2011; Merino *et al.*, 2015). Since January, the 'Lane Late' orange fruit recorded a RI that was much higher than the minimum required for its commercial maturity. Nevertheless, since March, *Citrus macrophylla*, Carrizo citrange and Former-Alcaide no. 41 induced bland juices taste as a result of a high RI together without enough total soluble solids contents (Table 2). Just like Kahn *et al.* (2007) observation, 'Lane Late' orange fruits experienced a reduction in juice content (Table 2), which was only significant on *Citrus macrophylla* in March (39.56%) and Carrizo citrange (43.14%) in April. Based on both parameters (juice content and RI), January provided the most appropriate timing to harvest 'Lane Late' orange fruit on *Citrus macrophylla*, Carrizo citrange, and Former-Alcaide no. 41. Conversely, in 'Cleopatra' mandarin, Former-Alcaide no. 13, and Former-Alcaide no. 5, the timing to harvest could be postponed until March (Table 2).

Physiological Disorders and Inner Firmness

Granulation is a serious pre-harvest fruit disorder, wherein juice sacs become hard, dry and enlarged (Sharma and Saxena, 2004). Granulation occurs most often in fruit picked late in the season (Table 3), as other authors point out (Kahn *et al.*, 2007). Degree of granulation of 'Lane Late' orange fruits increased from January to April (Table 3), but only significantly on *Citrus macrophylla* in March and on Former-Alcaide no. 13 and Former-Alcaide no. 5 in April. Hence, as reported in other research (Kumar *et al.*,

**Table 4.** Effect of rootstock and sampling date on total polyphenolic (TP) and flavonid (TF) content in 'Lane Late' orange fruit during 2012/2013 and 2013/2014 seasons.

Rootstock	TP (mg EG/100g FW) ^a				TF (mg EQ/100g FW) ^b			
	January	March	April	Mean	January	March	April	Mean
CA	68.88 a	63.89 a	64.39 a	65.72 a	46.57 a	47.10 a	48.60 a	47.43 a
CL	83.97 c	75.95 ab	67.21 a	75.71 c	56.99 b	62.80 b	55.63 ab	58.47 b
FA13	83.49 bc	80.26 b	67.78 a	77.18 c	58.85 b	56.07 ab	53.12 a	56.01 b
FA41	80.32 abc	72.16 ab	70.03 a	74.17 bc	56.80 ab	54.65 ab	64.91 b	58.79 b
FA5	81.76 bc	71.59 ab	66.61 a	73.32 abc	63.66 b	51.99 ab	58.01 ab	57.89 b
MP	71.56 ab	64.69 a	63.46 a	66.57 ab	57.51 b	52.95 ab	57.50 ab	55.99 b
Mean	78.33 C	71.42 B	66.58 A	72.11	56.73 A	54.26 A	56.30 A	55.76
Rootstock*Date	ns				ns			

^a mg of gallic acid equivalents per 100 g of fresh weight of oranges (mg EG/100g FW); ^b mg of quercetin equivalents per 100 g of fresh weight of oranges (mg EQ/100g FW); Mean values in the same column or row followed by different lower case letters indicate significant differences between, respectively, rootstocks or sampling dates, by Tukey's test ($P < 0.05$). ns: no significant interaction; CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no. 13; FA41: Forner-Alcaide no. 41; FA5: Forner-Alcaide no. 5; MP: *C. macrophylla* Wester.

1994; Sharma and Saxena, 2004; Kahn *et al.*, 2007), the highest granulation corresponded to a large fruit and vigorous rootstock (*Citrus macrophylla*; Table 3). Creasing is another pre-harvest fruit disorder, consisting of the albedo breakdown. Creasing increased in 'Lane Late' orange fruits during ripening (Table 3). Despite differences obtained among sampling dates, the maximum values reached did not exceed a slight degree in either creasing or granulation (Table 3). The inner firmness of the 'Lane Late' orange fruit decreased during ripening (Table 3). The lowest values reached in April could probably be consequence of lower juice content obtained at the same time (Table 2). Together, these two parameters are a good indicator of the loss of fruit flesh texture on the palate.

Total Polyphenolic and Total Flavonoid Content

The ripening stage has an effect on the bioactive compounds (Table 4). Large variations of the bioactive compounds in

relation to the ripening stage have also been observed in other citrus species and even plum cultivars (Fattahi *et al.*, 2011; Vlaic *et al.*, 2017). While total polyphenolic content in 'Lane Late' orange fruits progressively decreased during fruit ripening, flavonoids content (which is associated with a lower risk of major human diseases) did not change throughout the trial (Table 4).

A different effect of the ripening stage on bioactive compounds was reported by Fattahi *et al.* (2011) in other orange species. Not only were the results obtained by Fattahi *et al.* (2011) for cultivars other than 'Lane Late' navel orange, but also they were tested at a rather early fruit ripening stage, with a ripening index below 6.5 in most cases (R (EU) no. 543/2011 of European Commission, of 7 June 2011).

Considering all quality parameters collectively, the most suitable harvesting times for 'Lane Late' orange fruits per rootstock were different. Thus, January was the most suitable harvesting time for 'Lane Late' orange fruits on *Citrus macrophylla*, Carrizo citrange and Forner-Alcaide no. 41 and March for 'Lane Late' orange fruits on 'Cleopatra' mandarin, Forner-Alcaide no. 13

and Forner-Alcaide no. 5. Considering that the actual interest in 'Lane Late' navel orange cultivar lies in delaying fruit harvesting as much as possible, *Citrus macrophylla* or Carrizo citrange proved to be less interesting citrus rootstocks. This aspect must be considered by citrus producing countries for fresh market where these citrus rootstocks are either widely used or the acreage of trees on these citrus rootstocks is increased, such as Saudi Arabia (Al-Jaleel *et al.*, 2005) and Spain (Forner-Giner *et al.*, 2003).

Overall Quality of 'Lane Late' Orange Fruits on the Different Rootstocks

The overall quality of 'Lane Late' orange fruit was affected by the rootstock, which was found to significantly influence fruit size and peel thickness (Table 1). *Citrus macrophylla* produced significantly the biggest (diameter and height) and heaviest 'Lane Late' orange fruits (86.62 mm, 87.16 mm and 320 g, respectively; Table 1). Carrizo citrange showed an intermediate behavior, inducing 'Lane Late' orange fruits that were significantly larger and heavier than those on Forner-Alcaide no. 13 and 'Cleopatra' mandarin. The lowest diameter and weight values recorded on Forner-Alcaide no. 13 and 'Cleopatra' mandarin did not differ significantly from those recorded on Forner-Alcaide no. 41 or Forner-Alcaide no. 5 on any of the sampling dates. On the other hand, *Citrus macrophylla* induced significantly the highest peel thickness (6.76 mm; Table 1). It was observed that the largest fruits tend to have the thickest peels, as previously identified by Kahn *et al.* (2007). Forner-Alcaide no. 13 and Forner-Alcaide no. 41 induced higher fruit inner firmness (6.46 and 6.42 N, respectively), which was even statistically different from Carrizo citrange (5.41 N) in April (Table 3). There was no significant effect by rootstock in terms of color, shape index (Table 1) or fruit creasing (Table 3). On the contrary, 'Lane Late' orange fruit on *Citrus*

macrophylla experienced the highest granulation, which was statistically different from those on Forner-Alcaide no. 13 and Forner-Alcaide no. 41. Regardless of the rootstock, neither the physiological disorders nor creasing or granulation exceeded a slight degree in April (Table 3). 'Lane Late' orange fruits on *Citrus macrophylla* or Carrizo citrange showed lower internal quality than those on the other rootstocks (Tables 2 and 3). 'Lane Late' orange fruits on *Citrus macrophylla* recorded the lowest total soluble solids (9.85 °Brix; Table 2) and the lowest juice content (40.42%, Table 2), while Carrizo citrange induced the lowest polyphenolic and flavonoid contents (65.72 mg EG/100g FW and 47.43 mg EQ/100g FW, respectively; Table 4). Similar results in terms of the low internal fruit quality induced by *Citrus macrophylla* have also been reported by other authors (Al-Jaleel *et al.*, 2005; Hervalejo *et al.*, 2010; Legua *et al.*, 2011b). Conversely, 'Lane Late' orange fruits on Forner-Alcaide no. 13, followed by Forner-Alcaide no. 5 and 'Cleopatra' mandarin, induced the highest internal fruit quality (Table 2), recording the highest soluble solids (12.31 °Brix) and juice content (48.55%). Moreover, 'Cleopatra' mandarin and Forner-Alcaide no. 13 showed the highest values in bioactive compounds contents (Table 4).

CONCLUSIONS

Different harvesting times were identified as the most suitable for 'Lane Late' orange fruits per rootstock in order to determine the best overall fruit quality. In 'Lane Late' orange fruits on *Citrus macrophylla*, Carrizo citrange and Forner-Alcaide no. 41, January was the recommended harvesting time. However, the most suitable harvesting time for 'Lane late' orange fruit on 'Cleopatra' mandarin, Forner-Alcaide no. 13 and Forner-Alcaide no. 5 was March, a more interesting timing since 'Lane Late' orange is a late-season navel orange.



Despite harvesting 'Lane Late' orange fruits on the most suitable date for each rootstock, *Citrus macrophylla* induced the largest fruit size but also the poorest organoleptic juice quality, while Carrizo citrange showed the lowest bioactive compounds contents. However, Forner-Alcaide no. 5, Forner-Alcaide no. 13, and 'Cleopatra' mandarin recorded the highest internal quality, while Forner-Alcaide no. 41 showed an intermediate behavior.

Among the three citrus rootstocks more suitable for 'Lane Late' orange fruits, Forner-Alcaide no. 5, Forner-Alcaide no. 13, and 'Cleopatra' mandarin, the only slight differences found were that 'Cleopatra' mandarin induced higher flavonoids content, Forner-Alcaide no. 13 induced greater organoleptic quality and higher polyphenolic contents, and Forner-Alcaide no. 5 induced higher fruit size and weight. In the choice between the three latter citrus rootstocks, other aspects such as local biotic and abiotic conditions should also be considered.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to Dr. J.B. Forner for providing the plant material for the trial from the Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA; Spain).

This research was carried out under the project Transforms Citrus: 2009-2013, which was co-financed 80% by the European Regional Development Fund within the FEDER Operational Programme of Andalusia 2007-2013, and the project Network of Experimentation and Transfer in Andalusian Citrus, which was co-financed 80% by the European Regional Development Fund within the FEDER Operational Programme of Andalusia 2014-2020.

REFERENCES

1. Al-Jaleel, A., Zekri, M. and Hammam, Y. 2005. Yield, Fruit Quality and Tree Health of 'Allen Eureka' Lemon on Seven Rootstocks in Saudi Arabia. *Sci. Hort.*, **105**: 457-465.
2. Baier, W.E. 1954. The Pritchett Tongue. *Calif. Citrogr.* **37**: 442.
3. Cardeñosa, V., Barreira, J. C. M., Barros, L., Arenas-Arenas, F. J., Moreno-Rojas, J. M. and Ferreira, I. C. F. R. 2015. Variety and Harvesting Season Effects on Antioxidant Activity and Vitamins Content of *Citrus sinensis* Macfad. *Molecules*, **20**: 8287-8302.
4. Dewanto, V., Wu X., Adom, K. K. and Liu, R. H. 2002. Thermal Processing Enhances the Healthy Value of Tomatoes by Increasing Total Antioxidant Activity. *J. Agric. Food. Chem.*, **50**: 3010-3014.
5. Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. 1977. *Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 24, Food and Agric. Organiz. of the UN, Rome.
6. European Union. 2011. Commission Implementing Regulation (EU) No. 543/2011 of 7 June 2011. Laying down Detailed Rules for the Application of Council Regulation (EC) No 1234/2007 in Respect of the Fruit and Vegetables and Processed Fruit and Vegetables Sectors. *Official Journal of the European Union*, **L157**: 1-163.
7. Fattahi, J., Hamidoghli, Y., Fotouhi, R., Ghasemnejad, M. and Bakhshi, D. 2011. Assessment of Fruit Quality and Antioxidant Activity of Three Citrus Species during Ripening. *J. Hortic. Biol. Environ.*, **2**: 113-128.
8. Forner, J. B., Forner-Giner, M. A. and Alcaide, A. 2003. Forner-Alcaide 5 and Forner-Alcaide 13: Two New Citrus Rootstocks Released in Spain. *Hortscience*, **38(4)**: 629-630.
9. Forner, J. B. and Alcaide, A. 1993. La Mejora Genética de Patrones de Agrios Tolerantes a Tristeza en España: 20 Años de Historia (I). *Levante Agrícola*, **325**: 261-267.
10. Forner, J. B. and Alcaide, A. 1994. La Mejora Genética de Patrones de Agrios Tolerantes a Tristeza en España: 20 Años de Historia (II). *Levante Agrícola*, **329**: 273-279.
11. Forner-Giner, M. A., Alcaide, A. Primo-Millo, E. and Forner, J. B. 2003. Performance of 'Navelina' Orange on 14

- Rootstocks in Northern Valencia (Spain). *Sci. Hort.*, **98**: 223-232.
12. Gattuso, G., Barreca, D., Gargiulli, C., Leuzzi, U. and Caristi, C. 2007. Review of the Flavonoid Composition of Citrus Juices. *Molecules*, **12**: 1641-1673.
 13. Gorinnstein, S., Martin-Belloso, O., Yongseo, P., Haruenkit, R., Lojek, A. and Milan, C. 2001. Comparison of Some Biochemical Characteristics of Different Citrus Fruits. *Food Chem.*, **74**: 309-315.
 14. Hervalejo, A., Jiménez, M., Trapero, S., Lastres, J. M. and Martínez-Ferri, E. 2007. Respuesta al riego deficitario de 'Clementina de Nules' (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.) Injertada sobre Diferentes Patrones de Cítricos. *Levante Agrícola*, **387**: 320-328.
 15. Hervalejo, A., Martínez-Ferri, E., Salguero, A. and Arenas-Arenas, F. J. 2010. Growth, Yield and Fruit Quality of 'Clemenules' Grown on Six Rootstocks in the Southern Region of Spain during 2008/2009 Season. *28th International Horticultural Congress (IHC)*, Lisboa (Portugal).
 16. Jiménez-Cuesta, M., Cuquerella, J. and Martínez-Javega, J. M. 1981. Determination of a color index for citrus fruit degreening. *Proc. Int. Soc. Citriculture*, **2**: 750-753.
 17. Kahn, T. L., Bier, O. J. and Beaver, R. J. 2007. New Late-Season Navel Orange Varieties Evaluated for Quality Characteristics. *Calif. Agric.*, **61(7)**: 138-143.
 18. Kumar, H., Chohan, G. S. and Vij, V. K. 1994. Studies on the Tree Survival, Growth, Yield and Fruit Quality of Pineapple Cultivar of Sweet Orange on Different Rootstocks. *J. Res. Punj. Agric. Univ. India*, **31(1)**: 27-31.
 19. Legua, P., Bellver, R., Forner, J. B. and Forner-Giner, M. A. 2011a. Trifoliata Hybrids Rootstocks for 'Lane Late' Navel Orange in Spain. *Sci. Agric.*, **68(5)**: 548-553.
 20. Legua, P., Bellver, R., Forner, J. B. and Forner-Giner, M. A. 2011b. Plant Growth, Yield and Fruit Quality of 'Lane Late' Navel Orange on Four Citrus Rootstocks. *Span. J. Agric. Res.*, **9(1)**: 271-279.
 21. Legua, P., Forner, J. B., Hernández, F. and Forner-Giner, M. A. 2014. Total Phenolics, Organics Acids, Sugars and Antioxidant Activity of Mandarin (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.): Variation from Rootstock. *Sci. Hortic.*, **174**: 60-64.
 22. MAPAMA. 2017. Superficies y Producciones Anuales de Cultivo. *Datos Avances de Frutales Cítricos año 2017 Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, España*.
 23. Merino, C., Hervalejo, A., Salguero, A., González, D. and Arenas-Arenas, F. J. 2015. Yield and Fruit Quality of Two Early Maturing Orange Cultivars, 'Navelina' and 'Fukumoto', in Andalusia, Spain. *Acta Hortic.*, **1065**: 255-260.
 24. Navarro, J. M., Pérez-Pérez, J.G., Romero, P. and Botía, P. 2010. Analysis the Changes in Quality in Mandarin Fruit, Produced by Deficit Irrigation Treatments. *Food Chem.*, **119**: 1591-1596.
 25. Sharma, R. R. and Saxena, S. K. 2004. Rootstocks Influence Granulation in Kinnow Mandarin (*Citrus nobilis* x *C. deliciosa*). *Sci. Hortic.*, **101**: 235-242.
 26. Slinkard, K. and Singleton, V. L. 1977. Total Phenol Analysis: Automation and Comparison with Manual Methods. *Am. J. Enol. Vitic.*, **28**: 49-55.
 27. Vlaic, R. A., Socaci, S. A., Mureşan, A. E., Mureşan, C. O., Moldovan, P., Muste, S. and Mureşan, V. 2017. Bioactive Compounds and Volatile Profile Dynamics during Fruit Growth of Several Plums Cultivars. *J. Agr. Sci. Tech. (JAST)*, **19**: 1565-1576.
 28. Xu, G.L.D., Chen, J., Yea, X., Ma, Y. and Shi, J. 2008. Juice Components and Antioxidant Capacity of Citrus Varieties Cultivated in China. *Food Chem.*, **106**: 545-551.



کیفیت کلی میوه پرتقال Lane Late روی پایه های زیر-استاندارد و نیمه کوتاه

۱. هروالجو، م. پ. سوارز، ج. م. مورنو-روجاز، و ف. ج. آرناس-آرناس

چکیده

هدف این پژوهش ارزیابی شکل ظاهری، طعم، و مواد زیست فعال میوه پرتقال Lane Late روی سه پایه زیراستاندارد یا نیمه کوتاه شامل *Forner-Alcaide no. 5*، *Forner-Alcaide no. 13*، *Citrus Carrizo citrange* و *Forner-Alcaide no. 41* در مقایسه با سه پایه سنتی شامل *Citrus macrophylla* و *Cleopatra' mandarin* در اسپانیا بود. برای هر پایه زمان برداشت متفاوتی شناسایی شد. مناسبترین زمان برداشت برای میوه پرتقال Lane Late روی پایه های *Cleopatra' mandarin*، *Forner-Alcaide no. 13* یا *Forner-Alcaide no. 5* در ماه مارس بود که بین یک تا دو ماه دیرتر از *Citrus macrophylla*، *Carrizo citrange*، یا *Forner-Alcaide no. 41* بود و برای این پرتقال ناول دیررس مناسب تر است. با وجود آنکه میوه پرتقال Lane Late روی هر پایه در مناسبترین زمان برداشت شد، تفاوت های معناداری در مورد کیفیت کلی میوه میان آنها مشاهده شد. از این قرار، *Citrus macrophylla* بزرگترین اندازه را القا کرد ولی در عین حال میوه کمترین کیفیت ارگانولپتیک را داشت، در حالیکه پایه *Carrizo citrange* کمترین محتوای مواد زیست فعال را القا کرد و پایه های *Forner-Alcaide no. 5*، *Forner-Alcaide no. 13* و *Cleopatra' mandarin* بیشترین کیفیت درونی را القا کردند. میوه پرتقالهای Lane Late روی پایه *Forner-Alcaide no. 41* رفتاری میانه نشان دادند.

Artículo 2. Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks for more intensive, higher-density, and sustainable plantation systems

Título (en español): Patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes para sistemas de plantación más intensivas, de mayor densidad, y sostenibles

Autores: Áurea Hervalejo^{1*}, María Paz Suárez² y Francisco José Arenas-Arenas¹

Afiliaciones:

¹ IFAPA Centro Las Torres. Ctra. Sevilla- Cazalla Km. 12,2. 41200. Alcalá del Río, Sevilla, España.

² Departamento de Ciencias Agroforestales, ETSIA, Universidad de Sevilla. Ctra. Utrera Km. 1. 41013. Sevilla, España.

Revista: Agronomy

Año de Publicación: 2021

Número y páginas: 11, 660



doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy11040660>

Índice de impacto: 3,949 (JCR, 2021) (1^{er}Q)

Área y posición: Agronomy - SCIE (2021). Posición 18/90

Article

Substandard and Semi-Dwarfing Citrus Rootstocks for More Intensive, Higher-Density, and Sustainable Plantation Systems

Aurea Hervalejo ^{1,*} , María Paz Suárez ²  and Francisco José Arenas-Arenas ¹

¹ Andalusian Institute for Agricultural Research (IFAPA)—Centre Las Torres, Alcalá del Río, 41200 Seville, Spain; fjose.arenas@juntadeandalucia.es

² Department of Agronomy, ETSIA, University of Seville, 41013 Seville, Spain; maripaz@us.es

* Correspondence: aurea.hervalejo@juntadeandalucia.es

Abstract: An increasing number of intensive, dense, and sustainable citrus plantations have fostered a growing interest in addressing the future challenges of citrus crops: An increase in the world's population, climate change, and globalization. Nutrient efficiency and the absence of vigorous citrus rootstocks are required for the success of these plantation systems. The agronomic performances of the 'Lane Late' orange cultivar on three substandard or semi-dwarfing citrus rootstocks (Forner-Alcaide no.5 (FA5), Forner-Alcaide no.13 (FA13), and Forner-Alcaide no.41 (FA41)) were evaluated in Spain in comparison with more traditional Mediterranean citrus rootstocks (Carrizo citrange (CA), *Citrus macrophylla* (MP), and 'Cleopatra' mandarin (CL)) under a poor mineral fertilization program over six growing seasons. FA13 and FA41 induced the smallest 'Lane Late' trees. Although the rootstock did not induce a significant effect on the 'Lane Late' yield efficiency (kg m^{-3}), the highest values were recorded for 'Lane Late' on MP, CL and FA13. In this sense, FA13 showed a high productive potential (kg ha^{-1}), given the possibility of narrowing the tree spacing (smaller tree size). Regarding the use of soil nutrients, FA13 was the most efficient citrus rootstock. Thus, FA13 stands out as the most suitable citrus rootstock for more intensive and sustainable plantation systems of the 'Lane Late' orange under Mediterranean conditions similar to those of this study.

Keywords: alternate bearing index; leaf nutrient levels; tree size; yield efficiency



Citation: Hervalejo, A.; Suárez, M.P.; Arenas-Arenas, F.J. Substandard and Semi-Dwarfing Citrus Rootstocks for More Intensive, Higher-Density, and Sustainable Plantation Systems.

Agronomy **2021**, *11*, 660. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040660>

Academic Editors: María Teresa Lao Arenas, Juan A. Fernández and Pedro Garcia-Caparrós

Received: 9 March 2021

Accepted: 28 March 2021

Published: 30 March 2021

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2021 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The future viability of citrus crops of the main citrus growing countries of the Mediterranean basin is seriously threatened by the increase in the world's population, climate change, and globalization [1].

Citrus fruit cultures, like agriculture in general, face the challenge of becoming more productive to feed a much larger global population under a general landscape of climate change, which threatens to increase temperature, reduce water availability, and impact soil health and quality.

On the other hand, globalization compromises the profitability of many Mediterranean citrus farms, mainly on account of competition from third countries and the onset of exogenous pest and crop diseases in terms of yield losses and higher costs involved in their inspection and control [2–4]. Moreover, Mediterranean citrus crops, highly dependent on manpower, are facing an uncertain and complex scenario regarding Covid-19, which could lead to a foreign labor shortage.

Because of this reality, it is of the highest priority to increase the citrus crop productivity from sustainable intensification. More intensive and higher-density citrus and other crop plantation systems are an interesting strategy to allow an improvement in competitiveness—earlier and higher crop yields [5–7]—and a lower environmental impact—less pressure on natural resources by production unit. The success of these plantation systems lies in the use of size-controlling citrus rootstocks, which leads to smaller and more accessible canopy trees and results in a reduction of harvesting and pruning costs, as well as easier,

economical, and effective pest inspection and management. Moreover, this citrus plantation system could be aiming at super high densities and may also be useful for mechanical harvesting by over-the-row harvesters [8] for citrus production in industry, obtaining additional benefits in terms of lower harvesting costs and manpower requirements.

On the other hand, in view of the high risk of Mediterranean soil desertification, more efficient citrus rootstocks in the uptake of mineral elements of the soil are required to achieve both a greater citrus crop resilience and soil recovery by more sustainable fertilization programs. In fact, the effect of rootstocks on the performance and leaf nutrient levels of different citrus cultivars is known [9–13], as well as of other fruit crops [14,15]. This is an important aspect to consider in citrus crops, as tree growth, yield, and health, as well as fruit quality, are closely affected by its nutrition status.

Carrizo citrange (*Citrus sinensis* (L.) Osb. × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) is one of the most important citrus rootstocks in Mediterranean citrus growing countries. However, in view of its susceptibility to lime-induced chlorosis and salinity [16,17], Carrizo citrange, a standard growing citrus rootstock, is unsuitable for many soils of the Mediterranean area. In addition, Carrizo citrange is susceptible to *Diaphorina citri* [18], a vector of the citrus greening, or HLB, the most devastating citrus disease worldwide [19], which threatens its possible arrival in the Mediterranean Basin. Other conventional citrus rootstocks, such as ‘Cleopatra’ mandarin (*Citrus reshi* Hort. ex Tan.) and *Citrus macrophylla*, which are standard growing citrus rootstocks, display other abiotic and biotic limitations, such as a higher sensibility to nematodes and root asphyxia. Moreover, ‘Cleopatra’ mandarin has been reported as highly susceptible to HLB [20]. Thus, the search for more interesting citrus rootstocks is the major aim in many citrus producing countries.

Different breeding programs have resulted in many interesting citrus rootstocks. This is the case for Forner-Alcaide no.5, Forner-Alcaide no.13, and Forner-Alcaide no.41, which are substandard or semi-dwarfing citrus rootstocks from a breeding program by traditional hybridization carried out at the Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) in Spain [21,22]. In addition, these three citrus rootstocks, hybrids to *Poncirus trifoliata*, could show a better response to HLB, as has been reported in *P. trifoliata* L. Raf. and some of its hybrids [20].

The purpose of this study was to identify new citrus rootstocks that are suitable for sustainable, more intensive, and higher-density plantation systems as an interesting alternative to conventional citrus plantations in the Mediterranean area. The performance of the ‘Lane Late’ navel orange cultivar on six citrus rootstocks (three substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks (Forner-Alcaide no.5, Forner-Alcaide no.13, and Forner-Alcaide no.41) and three more traditional standard citrus rootstocks (Carrizo citrange, *Citrus macrophylla*, and ‘Cleopatra’ mandarin)) was evaluated under low fertilization conditions in Spain. The nutritional status, growth, and yield of ‘Lane Late’ orange trees on the six citrus rootstocks were considered in this study.

2. Materials and Methods

2.1. Plant Material and Experimental Design

The study was carried out throughout six growing seasons (2008/2009–2013/2014) in an experimental plot in Sevilla (Spain; Figure 1): Mediterranean climate, with an average temperature of 18.1 °C, annual rainfall of 586.7 mm, and reference evapotranspiration (ET_0) of 1292.4 mm; loam soil (25% of clay, 32% of sand, and 43% of silt), with an organic matter level around 1.0%, electrical conductivity of a 1:5 soil water extract of 0.12 dS m⁻¹, 4.8% of active CaCO₃, and pH of 8.7. The parameters related to soil fertility in the 2009/2010 growing season were 675 mg/kg of nitrogen, 23 mg/kg of phosphorus, and 18.38, 3.08, 0.15 and 0.86 meq/100 g of extractable calcium, magnesium, sodium and potassium respectively, with 0.41 mg/kg of boron.



Figure 1. Overview of the experimental plot.

Standard cultural practices were applied, with regard to drip irrigation, and were hand-pruned annually after harvest. Irrigation was applied by two drip-lines in each tree row, with 2.2 L h^{-1} of drippers every 60 cm. Seasonal water requirements were calculated based on the reference evapotranspiration (ET_0) and citrus crop coefficient (K_c) [23].

Trees were fertilized using a fertigation system. A poor fertilization program (180 g tree^{-1} of N, 50 g tree^{-1} of P_2O_5 , and 100 g tree^{-1} of K_2O) was implemented by applying about 50% of the optimum fertilizer dosage calculated according to the procedure established by Quiñones et al. [24], in order to achieve a greater understanding of the performance of the different rootstocks under restricted mineral fertilization conditions, leading to more sustainable plantation systems being established.

The experimental plot of 4800 m^2 was consistent with ‘Lane Late’ cultivar trees on three traditional and standard citrus rootstocks: *Citrus macrophylla* Wester (MP), Carrizo citrange (CA; *Citrus sinensis* (L.) Osb. \times *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.), and ‘Cleopatra’ mandarin (CL; *Citrus reshni* Hort. ex Tan.); one substandard hybrid selection: Forner-Alcaide no.5 (FA5; *Citrus reshni* Hort. ex Tan. \times *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.); and another two semi-dwarfing hybrid selections: Forner-Alcaide no.13 (FA13; *Citrus reshni* Hort. ex Tan. \times *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) and Forner-Alcaide no.41 (FA41; *Citrus reshni* Hort. ex Tan. \times *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.).

The ‘Lane Late’ trees were 6 years old at the beginning of the experiment. The tree-spacing was 6 m (between tree lines) \times 4 m (between trees within the same tree line). The design consisted of 4 randomized blocks, including a primary plot with 6 trees ($N = 24$).

2.2. Measurements

In the six growing seasons (2008/2009–2013/2014), the tree height (TH) and canopy spread (canopy diameter longitudinal to the tree line (DL) and canopy diameter transverse to the tree line (DT)) were recorded after harvest. The canopy volume (CV; m^3) was calculated according to Turrell [25]. In the 2009/2010, 2010/2011, and 2013/2014 growing seasons, the trunk diameters of the scion (D_s ; at 10 cm above the level of the graft) and of the rootstock (D_r ; at 10 cm below the level of the graft) were recorded as well. The rootstock–

scion affinity was determined as the rootstock/scion ratio (Dr/Ds), which became more affine as Dr/Ds approached 1.

In all six growing seasons (2008/2009–2013/2014), each tree was harvested in April and the yield per tree was recorded (kg tree^{-1}). The yield efficiency (kg m^{-3}) was estimated as the yield (kg tree^{-1})-to-canopy volume (m^3) ratio for each tree.

The alternate bearing index (ABI; %) was estimated for the six growing seasons according to the equation suggested by Pearce and Dobersek-Urbanc [26]. ABI values above 50% show an alternate bearing, while values lower than 50% are indicative of a regular bearing.

In November in the 2009/2010 and 2012/2013 growing seasons, 4–6 months-old-mature 100 leaves, from terminal and nonfruiting shoots, from all orientations on the tree were collected from three trees of each primary plot for the determination of leaf nutrient levels. These leaves were washed with tap water with a nonionic detergent solution and then rinsed with distilled water. Leaf samples were dried in a hot air oven at $60\text{ }^\circ\text{C}$ for 72 h and ground at a mill Foss. The dried and ground samples, except for an aliquot part for nitrogen determination by using the Kjeldahl digestion method, were burnt to a crisp with a muffle oven. The aliquot parts for macro- and micro-nutrients were led to an acid solution and measured using an atomic absorption spectrophotometer (Perkim Elmer UV/Vis LAMBDA™) with a specific lamp for each compound [27–30].

The leaf nutrient contents of the 'Lane Late' navel orange on different citrus rootstocks were compared with threshold values given by Legaz et al. [31].

2.3. Statistical Analysis

Data were statistically analyzed using variance analysis (ANOVA) procedures. Means were separated through Tukey's multiple range test, using the STATISTICA 7.0 software package (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA, 2004). p values < 0.05 were considered as significant. Normality and homogeneity assumptions were tested before ANOVA, using the Kolmogorov–Smirnov and Cochran's tests, respectively. In the case of the nonobservance of the normality and homogeneity assumptions, a nonparametric Kruskal–Wallis test was adopted. The relationships among vegetative growth parameters, yield, and leaf nutrient contents were computed using Pearson's simple correlation to $p < 0.05$.

3. Results and Discussion

The success of more intensive, higher-density, and sustainable citrus plantations relies largely on the use of nonvigorous citrus rootstocks, which moreover, promote an efficient soil nutrient uptake and an optimal agronomic development of the citrus cultivar under defined soil and climate conditions.

3.1. 'Lane Late' Navel Orange Trees Size

Many studies have reported the effect of citrus rootstocks on tree growth [11,32–34]. In fact, substandard, semi-dwarfing, and dwarfing citrus rootstocks are known [35]. Substandard and semi-dwarfing citrus rootstocks established in more intensive and higher-density plantations would reduce the main cultivation costs, like pruning and harvesting, and a more efficient use of agricultural supplies, like fertilizers, would be applied.

In our results obtained on a twelve-years-old 'Lane Late' navel orange plantation, containing adult trees with a definitive tree size or close to it, statistical differences ($p < 0.05$) were found for the tree height and canopy volume among rootstocks throughout the six growing seasons (Figure 2). Thus, lower tree sizes were obtained on FA13 (2.24 m and 10.28 m^3) and FA41 (2.27 m and 11.23 m^3) in terms of tree height and canopy volume, respectively, while larger 'Lane Late' tree sizes were recorded on CA (3.34 m and 24.62 m^3) and MP (2.87 m and 20.75 m^3). The remaining rootstocks, CL and FA5, showed an intermediate behavior. In line with our results, Bassal [36] reported that the 'Marisol' clementine tree on CL recorded a lower tree height than on CA, while Forner et al. [21] reported that FA5 and FA13 were able to reduce the tree size by 25 to 50% compared with standard rootstocks.

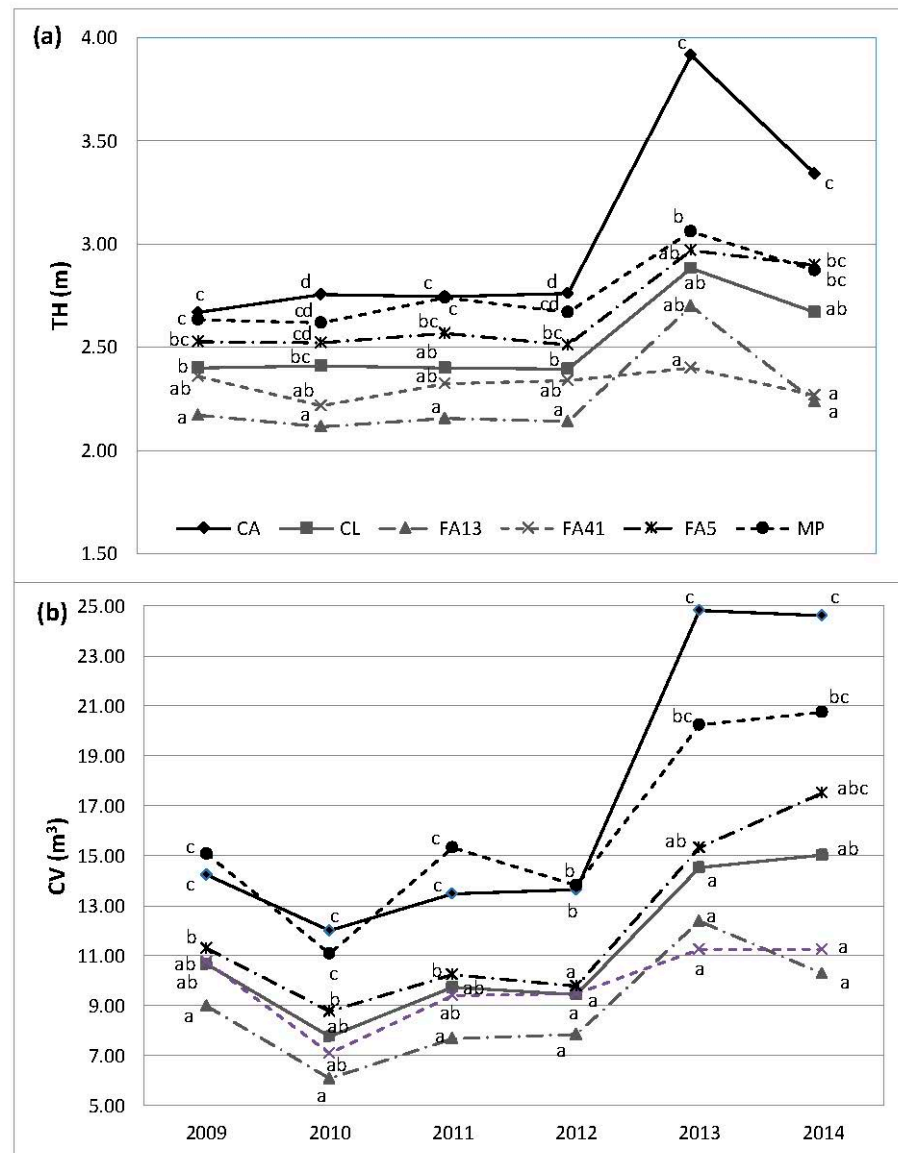


Figure 2. Effect of rootstocks on height (TH; a) and canopy volume (CV; b) in the 'Lane Late' navel orange tree over six growing seasons: 2008/2009–2013/2104. Mean values in the same growing season with different letters denote significant differences among rootstocks, based on Tukey's test ($p < 0.05$). CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no.13; FA41: Forner-Alcaide no.41; FA5: Forner-Alcaide no.5; MP: *C. macrophylla* Wester.

In the last growing season, statistical differences were found for the canopy spread (canopy diameters) among rootstocks (Table 1). Thus, 'Lane Late' trees on CA and MP had the highest longitudinal diameter (3.94 and 3.98 m, respectively; DL) and transverse diameter (3.65 and 3.50 m, respectively; DT), while trees on FA13, similar to FA41 and CL, reported the lowest values in both parameters (3.23 m DL and 3.11 m DT). FA5 induced an intermediate canopy spread.

The lower canopy spread recorded in 'Lane Late' trees on some citrus rootstocks (Table 1), especially on FA13 and FA41, reveal the possibility of using more intensive and higher-density trees than traditional plantations (417 trees ha⁻¹). Thus, more intensive and higher-density 'Lane Late' navel orange plantations could be established by adjusting the tree spacing to the tree size induced by each citrus rootstock, which in our case, would result in more than 540 trees ha⁻¹ on FA13, FA41, and CL without needing to force the tree size by pruning. Other authors [33] have remarked an interest in considering the citrus tree

growth induced by rootstocks in order to reduce the gap between trees and crop lines as much as possible, provided it does not affect productivity and fruit quality.

'Lane Late' trees on CA and FA5 recorded significantly ($p < 0.05$) the highest trunk diameters of the rootstock (16.29 and 16.22 cm, respectively; Table 1). Trees on FA13 and FA41 recorded the lowest means (13.57 and 12.56 cm, respectively), while CL and MP had intermediate values. Except for FA5, a similar relationship was found among rootstocks in regard to the trunk diameter of the scion (Table 1). Thus, FA5 recorded the highest trunk diameter of the rootstock and one of the lowest trunk diameters of the scion (10.70 cm), the latter being similar those of FA41 and FA13.

Table 1. Effect of rootstock on the canopy spread of 'Lane Late' navel orange trees [canopy diameter longitudinal (DL) and transverse (DT) to the tree line and average canopy diameter squared (D^2)], in the latest growing season 2013/2014, and on the trunk diameter of 'Lane Late' navel orange trees [trunk diameter of the rootstock (Dr) and of the scion (Ds)] and on rootstock–scion affinity (Dr/Ds), over three growing seasons: 2008/2009, 2010/2011 and 2012/2013.

	DL (m)		DT (m)		D^2 (m ²)		Dr (cm)		Ds (cm)		Dr/Ds	
CA	3.94	b	3.65	b	14.49	c	16.29	c	12.49	c	1.31	b
CL	3.33	a	3.32	ab	11.22	ab	13.85	b	11.93	bc	1.17	a
FA13	3.23	a	3.11	a	10.10	a	13.57	ab	9.55	a	1.45	cd
FA41	3.31	a	3.30	ab	10.98	a	12.56	a	9.47	a	1.33	bc
FA5	3.55	ab	3.36	ab	12.09	abc	16.22	c	10.70	ab	1.52	d
MP	3.98	b	3.50	ab	14.15	bc	14.44	b	11.24	bc	1.28	ab

Mean values in the same column followed by different letters denote significant differences among rootstocks, based on Tukey's test ($p < 0.05$). CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no.13; FA41: Forner-Alcaide no.41; FA5: Forner-Alcaide no.5; MP: *C. macrophylla* Wester.

The trunk diameter was negatively correlated with leaf Zn content ($r = -0.42$; Table 2), the latter being the only significant correlation obtained between the 'Lane Late' trees growth parameters and leaf nutrient contents, contrary to Dubey and Sharma [11], on 'Kagzi Kalan' lemon trees, which was reported to have a positive correlation of vegetative growth with leaf Ca content.

Table 2. Pearson's simple correlation among tree height (TH), tree canopy spread [canopy diameter longitudinal (DL) and transverse (DT) to the tree line], trunk diameters [trunk diameter of the rootstock (Dr) and of the scion (Ds)], rootstock–scion affinity (Dr/Ds), yield, yield efficiency, and leaf nutrient contents in 'Lane Late' navel orange trees on six citrus rootstocks over the 2009/2010 and 2011/2012 seasons.

		%						ppm				
	Kg tree ⁻¹	N	P	K	Ca	Mg	B	Cu	Fe	Mn	Zn	
Kg tree ⁻¹	1.00	0.58 *	0.47 *	0.52 *	−0.17	−0.33	−0.32	0.24	−0.34 *	0.27	−0.14	
Kg m ⁻³	0.88 *	0.61 *	0.63 *	0.48 *	−0.06	−0.30	−0.28	0.25	−0.54 *	0.16	−0.04	
TH (m)	0.13	−0.18	0.11	−0.22	−0.13	−0.10	−0.19	−0.02	0.05	−0.10	−0.22	
DL (m)	0.29	−0.04	0.24	0.09	−0.30	−0.21	0.11	0.03	0.16	−0.01	−0.20	
DT (m)	0.13	−0.15	0.04	−0.11	−0.19	−0.15	−0.08	−0.20	0.05	−0.01	−0.24	
Vc (m ³)	0.15	−0.15	0.16	−0.11	−0.23	−0.17	−0.09	−0.08	0.07	−0.07	−0.24	
Dr (cm)	0.19	−0.14	0.00	−0.36	0.15	0.26	−0.21	0.16	0.17	−0.04	−0.42 *	
Ds (cm)	0.28	−0.27	0.05	−0.22	0.17	0.09	−0.28	−0.17	0.02	−0.02	−0.21	
Dr/Ds	−0.12	0.25	0.01	−0.07	−0.13	0.05	0.13	0.37	0.15	0.06	−0.11	

* Denotes significant correlation ($p < 0.05$).

As there were no significant differences among rootstocks in leaf Zn content (Table 3), the differences found in vegetative growth should not be attributed to the efficiency of the rootstock in the uptake of nutrients. Thus, other physiological aspects must be involved in the differences found among the studied citrus rootstocks in the vegetative tree growth.

Table 3. Effect of rootstocks on ‘Lane Late’ navel orange leaf micro-nutrients (B, Cu, Fe, Mn, and Zn) contents over two growing seasons, 2009/2010 and 2012/2013.

	B (ppm)				Cu (ppm)				Fe (ppm)			
	2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013	
CA	43.33	a	59.05	a	6.33	a	5.74	a	57.00	a	107.13	bc
CL	60.67	ab	66.40	a	4.00	a	3.13	a	63.00	a	64.77	a
FA13	70.00	ab	67.78	a	6.00	a	5.20	a	58.00	a	71.46	a
FA41	89.33	b	70.15	a	6.67	a	4.10	a	65.33	a	72.03	a
FA5	53.33	a	61.19	a	5.00	a	3.99	a	58.00	a	86.43	ab
MP	44.00	b	65.90	a	5.67	a	2.05	a	66.00	a	114.20	c
Optimal range *	31–100				6–14				61–100			
	Mn (ppm)				Zn (ppm)							
	2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013					
CA	26.00	a	25.93	a	18.00	a	17.27	a				
CL	36.33	ab	28.60	a	18.00	a	17.30	a				
FA13	40.00	bc	31.51	a	24.67	a	16.15	a				
FA41	28.33	ab	29.51	a	21.67	a	15.16	a				
FA5	38.33	abc	45.38	b	17.00	a	15.41	a				
MP	49.33	c	69.61	c	16.33	a	18.98	a				
Optimal range *	26–60				26–70							

* According to Legaz et al., 1995. Mean values in the same column followed by different letters denote significant differences among rootstocks, based on Tukey’s test ($p < 0.05$). CA: Carrizo citrange; CL: ‘Cleopatra’ mandarin; FA13: Forner-Alcaide no.13; FA41: Forner-Alcaide no.41; FA5: Forner-Alcaide no.5; MP: *C. macrophylla* Wester.

3.2. ‘Lane Late’ Navel Orange-Rootstock Affinity

The rootstock/scion diameter ratio is an indicator of the equality in growth rate between rootstock and scion (cultivar), so the difference among diameters may be an incompatibility measure [34].

In ‘Lane Late’ trees, this ratio was higher on FA5 (1.52) because, while it reported the highest rootstock trunk diameter, it induced the lowest scion trunk diameter (Table 1). On the other hand, the rootstock/scion ratio was lower (and closer to 1.00) on CL (1.17) and MP (1.28). Likewise, a good affinity in different citrus cultivars has also been found on MP [37] or CL [33,36].

In our study, a higher rootstock/scion ratio may not be understood as an incompatibility between the scions and the rootstocks, as there were no correlations of this ratio with any leaf nutrient content in the twelve-year-old ‘Lane Late’ trees (Table 2).

3.3. ‘Lane Late’ Navel Orange Trees Productivity

‘Lane Late’ trees did not show an alternate bearing on any rootstock (ABI < 50%; Table 4), without significant differences among rootstocks.

As in other studies [11,13,37], the results revealed an effect of citrus rootstocks on yield (kg tree⁻¹; Table 4). Thus, ‘Lane Late’ trees on MP recorded higher yields (60.93 kg tree⁻¹), which were statistically significant in most growing seasons, while ‘Lane Late’ trees on FA13 (32.44 kg tree⁻¹) and FA41 (36.85 kg tree⁻¹) had almost always the lowest yield. CA, CL, and FA5 showed an intermediate behavior, without statistical differences from FA13. Nevertheless, the low spread canopy associated with high yield efficiencies (kg m⁻³) in more intensive plantations is the key to reaching or even exceeding the yield per hectare versus traditional system plantations (417 trees ha⁻¹).

While there was no clear correlation of yield (kg tree⁻¹) with canopy volume (Table 2), the differences obtained among rootstocks in yield (kg tree⁻¹) disappeared when it concerned canopy volume (yield efficiency; kg m⁻³). Without statistical differences among rootstocks, ‘Lane Late’ trees on MP (4.10 kg m⁻³), CL (3.94 kg m⁻³), and FA13 (3.80 kg m⁻³) had a higher yield efficiency than ‘Lane Late’ trees on the remaining rootstocks (Table 4). On the contrary, ‘Lane Late’ trees on CA recorded the lowest mean (2.76 kg m⁻³). In the

same way, Legua et al. [37] reported the highest yield efficiency on MP compared to other citrus rootstocks, but in this case, with significant differences.

Hence, taking into account both the spread canopy (DL and DT; m; Table 1) and yield efficiency (kg m^{-3} ; Table 4) of 'Lane Late' trees on the different rootstocks, FA13, FA41, and CL would have a high potential for use in more intensive and higher-density plantations with similar or even higher yields per hectare than traditional citrus plantations on CA, which is one of the most important citrus rootstocks in Mediterranean citrus growing countries. These results become more relevant when considering the results obtained by Hervalejo et al. [38] on the same citrus rootstocks, who pointed to FA13 and CL, together with FA5, as the most interesting citrus rootstocks for the 'Lane Late' navel orange cultivar in order to obtain a more suitable harvesting time and higher internal fruit quality.

Table 4. Effect of rootstocks on the yield and average of yield (kg tree^{-1}), yield efficiency (kg m^{-3}), and alternate bearing index (ABI) of 'Lane Late' navel orange trees over six growing seasons (2008/2009–2013/2014).

	CA	CL	FA13	FA41	FA5	MP						
kg tree⁻¹												
2008/2009	52.95	ab	32.92	a	43.30	a	47.45	a	49.07	a	70.59	b
2009/2010	32.47	ab	26.25	ab	26.21	ab	22.59	a	27.54	ab	39.28	b
2010/2011	53.03	a	46.98	a	43.50	a	41.02	a	52.93	a	86.83	b
2011/2012	48.32	a	40.91	a	35.27	a	44.58	a	34.20	a	51.16	a
2012/2013	28.25	ab	27.87	ab	17.74	a	21.62	a	28.38	ab	46.03	b
2013/2014	42.99	a	69.33	a	44.83	a	46.54	a	58.88	a	70.93	a
Averages												
kg tree ⁻¹	43.04	ab	42.05	ab	32.44	a	36.85	a	40.08	ab	60.93	b
kg m ⁻³	2.76	a	3.94	a	3.80	a	3.72	a	3.55	a	4.10	a
ABI (%)	23.36	a	31.86	a	35.48	a	32.13	a	23.30	a	15.39	a

Mean values in the same row followed by different lowercase letters denote significant differences among rootstocks, based on Tukey's test ($p < 0.05$). CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no.13; FA41: Forner-Alcaide no.41; FA5: Forner-Alcaide no.5; MP: *C. macrophylla* Wester.

There are significant positive correlations of the yield (kg tree^{-1}) and yield efficiency (kg m^{-3}) with leaf N ($r = 0.58$ and 0.61 , respectively), P ($r = 0.47$ and $r = 0.63$), and K ($r = 0.52$ and $r = 0.48$) contents (Table 2). In fact, N and K are known to be among the main essential nutrients involved in yield and fruit quality [39]. This correlation was observed very clearly on MP and FA13, which recorded the highest yield efficiencies (kg m^{-3}), with their greater leaf N, P, and K contents (Table 5) being noteworthy.

On the other hand, these correlations could explain the low yields obtained in general, as leaf N and/or P contents were below the recommended optimum range by Legaz et al. [31] on all rootstocks. Nevertheless, Legua et al. [37] reported similar yields (kg tree^{-1}) and yield efficiencies (kg m^{-3}) in 'Lane Late' trees under no deficient fertilization conditions.

3.4. 'Lane Late' Navel Orange Trees Nutrient Status

In sustainable plantation systems, the use of citrus rootstocks with a higher ability to uptake and translocate soil nutrients could be used as an important tool to reduce the use of chemical fertilizers. Citrus rootstocks are known to have an effect on performance and plant nutrient status [9,11–13]. A significant effect of the rootstocks ($p < 0.05$) was found in certain macro-nutrients' concentrations of 'Lane Late' leaves (Table 5).

'Lane Late' trees on MP and FA13 showed a greater efficiency in N uptake than on the other citrus rootstocks, with only deficient leaf N contents in the 2012/2013 growing season by Legaz et al. [31] (Table 5). In this sense, the efficient use of N by citrus rootstocks has a particular interest in Mediterranean areas, where the nitrate contamination of ground waters is concerning.

Likewise, 'Lane Late' trees on FA13 showed a greater efficiency in P uptake (Table 5), recording the highest P accumulation in leaves in both growing seasons, within or very

close to the optimum recommended range (0.12% according to Legaz et al. [31]). On the contrary, 'Lane Late' trees on FA5 had the lowest leaf P concentration in both seasons.

Leaf K, Ca, and Mg contents in 'Lane Late' trees were within the recommended optimal range on all rootstocks except CA (Table 5), which recorded a deficient leaf K in the 2012/2013 growing season, and MP, which had a deficient leaf Mg content in both growing seasons. MP and FA13 had the highest leaf K content, but with the lowest leaf Ca in the case of MP, which was statistically significant in the second growing season. Pérez-Zamora [40], in Valencia orange on MP, recorded a lower leaf Ca content than on the other citrus rootstocks, as well as a higher leaf N content than on CA or CL.

Table 5. Effect of rootstocks on 'Lane Late' navel orange leaf macro-nutrients (N, P, K, Ca and Mg) contents over two growing seasons, 2009/2010 and 2012/2013.

	N (%)				P (%)				K (%)			
	2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013	
CA	2.38	ab	2.29	a	0.15	a	0.12	a	0.92	a	0.68	a
CL	2.39	ab	2.23	a	0.14	a	0.09	a	1.00	a	0.75	a
FA13	2.74	b	2.27	a	0.16	a	0.12	a	1.07	a	0.75	a
FA41	2.20	a	2.37	a	0.16	a	0.11	a	0.99	a	0.75	a
FA5	2.43	ab	2.29	a	0.14	a	0.05	a	0.89	a	0.71	a
MP	2.69	b	2.25	a	0.14	a	0.10	a	1.17	a	1.14	b
Optimal range *	2.51–2.80				0.13–0.16				0.71–1.00			
	Ca (%)				Mg (%)							
	2009/2010		2012/2013		2009/2010		2012/2013					
CA	3.54	a	3.65	b	0.28	a	0.39	b				
CL	3.76	a	3.69	b	0.30	a	0.34	ab				
FA13	3.44	a	3.44	b	0.30	a	0.29	ab				
FA41	3.30	a	3.47	b	0.27	a	0.33	ab				
FA5	3.96	a	3.54	b	0.34	a	0.41	b				
MP	3.07	a	3.04	a	0.22	a	0.21	a				
Optimal range *	3.00–5.00				0.25–0.45							

* According to Legaz et al., 1995. Mean values in the same column followed by different letters denote significant differences among rootstocks, based on Tukey's test ($p < 0.05$). CA: Carrizo citrange; CL: 'Cleopatra' mandarin; FA13: Forner-Alcaide no.13; FA41: Forner-Alcaide no.41; FA5: Forner-Alcaide no.5; MP: *C. macrophylla* Wester.

As regard to leaf micro-nutrients (Table 3), a significant effect of the rootstocks was found on leaf Mn, B, and Fe contents of 'Lane Late' navel orange in at least one of the two growing seasons. 'Lane Late' trees recorded higher leaf Mn levels on MP, FA13, and FA5, while the lowest leaf Mn content was obtained on CA, which was the only citrus rootstock that showed deficient (2012/2013) or close-to-deficient leaf Mn levels (2009/2010).

In general, an optimal 'Lane Late' leaf B was recorded in both growing seasons (Table 3) on any evaluated citrus rootstock, including FA13 and FA41, which recorded the maximum values. On the contrary, a deficient leaf Zn content was recorded in both growing seasons (Table 3), which is a general problem in many citrus regions of the world [41] either from low Zn contents and/or from high carbonate content and pH [24] conditions, the latter existing in the experimental plot of the current study.

The 'Lane Late' leaf recorded a deficient Fe concentration in the 2009/2010 growing season only on CA, FA13, and FA5 (Table 3). The results obtained in leaf Fe content in 2009/2010 agree with Zekri and Obreza's statements [42], who reported that trifoliolate orange and its hybrids were the least able to absorb Fe. Thus, all trifoliolate orange's hybrids (CA, FA5, and FA13), except FA41, recorded a deficient leaf Fe concentration in the 2009/2010 growing season. Nevertheless, FA13 did not differ from the remaining no vigorous citrus rootstocks, which are relevant for more intensive citrus plantations. On the other hand, a deficient leaf Fe content can be effectively and sustainability corrected by synthetic iron chelates applied to foliage.

The 'Lane Late' leaf recorded a deficient Cu concentration in both growing seasons on almost all citrus rootstocks (Table 3), except on FA13, FA41, and CA.

'Lane Late' trees on CA showed the lowest efficiency in the uptake of soil nutrients, as opposed to FA13, which appears to be the citrus rootstock with better behavior in reference to leaf N, P, and K contents, nutrients mainly linked to the 'Lane Late' tree yields (Table 5). Moreover, FA13 has received particular interest in some Mediterranean areas due to its excellent resistance to salinity [22], unlike CA. Nevertheless, FA13, similar to CA, is sensitive to lime-induced chlorosis, requiring special attention to the active limestone of the soils.

4. Conclusions

There are considerable differences in the tree vegetative growth, yield, and efficiency in macro- and micro-nutrient uptakes among citrus rootstocks in 'Lane Late' navel orange. The tree size of the 'Lane Late' navel orange was not related to plant nutrient status in this study, while the yield (kg tree^{-1}) and yield efficiency (kg m^{-3}) was linked to plant nutrient status (or ability to uptake the soil nutrients), more specifically, N, P, and K leaf contents.

Forner-Alcaide no.13 (FA13) and Forner-Alcaide no.41 induced the smallest 'Lane Late' trees, while the largest trees were obtained on *Citrus macrohyla* and Carrizo citrange (CA). Forner-Alcaide no.5 and 'Cleopatra' mandarin (CL) induced an intermediate tree size. The higher yield efficiency (kg m^{-3}) recorded in 'Lane Late' trees on CL and FA13, along with the smaller tree size induced by them, revealed the high potential of these two citrus rootstocks to be used in more intensive and higher-density plantations, reaching similar or even higher yields per hectare than traditional citrus plantations on CA, one of the most important citrus rootstocks in the Mediterranean citrus growing countries.

Finally, FA13 was the most efficient citrus rootstock in the use of soil nutrients under poor mineral fertilization conditions, recording higher leaf N, P, K, Zn, and Cu contents in 'Lane Late' trees. FA13 showed only less efficiency in the uptake of Fe than other citrus rootstocks, but similar to the other nonvigorous citrus rootstocks, which can be easily and sustainably compensated by synthetic iron chelates applied to foliage.

Taking an overall view of the results, FA13 appeared to be the most promising rootstock for a more intensive, higher-density, and sustainable plantation system of the 'Lane Late' navel orange cultivar for regions with similar ecological conditions to this survey.

Author Contributions: Conceptualization, F.J.A.-A.; methodology, F.J.A.-A. and A.H.; data curation, F.J.A.-A. and A.H.; formal analysis and writing—original draft preparation, A.H.; formal analysis and writing review and editing, A.H. and M.P.S.; supervision, M.P.S. and F.J.A.-A.; project administration, F.J.A.-A.; funding acquisition, F.J.A.-A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was carried out under the project Transforma de cítricos: 2009–2013, which was co-financed 80% by the European Regional Development Fund within the FEDER Operational Programme of Andalusia 2007–2013, and the project Red de Experimentación y Transferencia de Cítricos en Andalucía, which was co-financed 80% by the European Regional Development Fund within the FEDER Operational Programme of Andalusia 2014–2020.

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available on request from the corresponding author.

Acknowledgments: The authors are grateful to J.B. Forner (IVIA) for supplying plant material for this trial.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. FAO. *The Future of Food and Agriculture. Trends and Challenges*; Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy, 2017.
2. Arenas-Arenas, F.J.; Duran-Vila, N.; Quinto, J.; Hervalejo, A. Is the presence of *Trioza erytreae*, vector of huanglongbing disease, endangering the Mediterranean citrus industry? Survey of its population density and geographical spread over the last years. *J. Plant Pathol.* **2018**, *100*, 567–574. [[CrossRef](#)]
3. Arenas-Arenas, F.J.; Duran-Vila, N.; Quinto, J.; Hervalejo, Á. Geographic spread and inter-annual evolution of populations of *Trioza erytreae* in the Iberian Peninsula. *J. Plant Pathol.* **2019**, *101*, 1151–1157. [[CrossRef](#)]
4. Arenas-Arenas, F.J.; Romero-Rodríguez, E.; Quinto, J.; Hervalejo, A. Nuevos desafíos de la citricultura Española. *Horticultura* **2018**, *68*, 68–73.
5. Mademba-Sy, F.; Lemerre-Desprez, Z.; Lebegin, S. Use of Flying Dragon trifoliate orange as dwarfing rootstock for citrus under tropical climatic conditions. *HortScience* **2012**, *47*, 11–17. [[CrossRef](#)]
6. Diez, C.M.; Moral, J.; Cabello, D.; Morello, P.; Rallo, L.; Barranco, D. Cultivar and tree density as key factors in the long-term performance of super high-density olive orchards. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*. [[CrossRef](#)]
7. Ladaniya, M.S.; Marathe, R.A.; Das, A.K.; Rao, C.N.; Huchche, A.D.; Shigure, P.S.; Murkute, A.A. High density planting studies in acid lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). *Sci. Hortic.* **2020**, *261*, 108935. [[CrossRef](#)]
8. Arenas-Arenas, F.J.; Romero-Rodríguez, E.; Hervalejo, A. Intensificación del cultivo de cítricos. *Vida Rural* **2020**, *480*, 38–42.
9. Toplu, C.; Uygur, V.; Kaplankıran, M.; Demirkese, T.H.; Yıldız, E. Effect of citrus rootstocks on leaf mineral composition of ‘Okitsu’, ‘Clausellina’ and ‘Silverhill’ mandarin cultivars. *J. Plant Nutr.* **2012**, *35*, 1329–1340. [[CrossRef](#)]
10. Incesu, M.; Yeşiloğlu, T.; Çimen, B.; Yılmaz, B. Influences of different iron levels on plant growth and photosynthesis of W. Murcott mandarin grafted on two rootstocks under high pH conditions. *Turk. J. Agric. For.* **2015**, *39*, 838–844. [[CrossRef](#)]
11. Dubey, A.; Sharma, R.M. Effect of rootstocks on tree growth, yield, quality and leaf mineral composition of lemon (*Citrus limon* (L.) Burm.). *Sci. Hortic.* **2016**, *200*, 131–136. [[CrossRef](#)]
12. Kumar, S.; Awasthi, O.P.; Dubey, A.K.; Pandey, R.; Sharma, V.K.; Mishra, A.K.; Sharma, R.M. Root morphology and the effect of rootstocks on leaf nutrient acquisition of Kinnow mandarin (*Citrus nobilis* Loureiro × *Citrus reticulata* Blanco). *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2018**, *93*, 100–106. [[CrossRef](#)]
13. Yılmaz, B.; Cimen, B.; Incesu, M.; Uysal, K.M.; Yesiloglu, T. Rootstock influences on seasonal changes in leaf physiology and fruit quality of Rio Red grapefruit variety. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2018**, *16*, 4065–4080. [[CrossRef](#)]
14. Mestre, L.; Reig, G.; Betrán, J.A.; Moreno, M.A. Influence of plum rootstocks on agronomic performance, leaf mineral nutrition and fruit quality of ‘Catherina’ peach cultivar in heavy-calcareous soil conditions. *Spanish J. Agric. Res.* **2017**, *15*, e0901. [[CrossRef](#)]
15. Shahkoomahally, S.; Chaparro, J.X.; Beckman, T.G.; Sarkhosh, A. Influence of rootstocks on leaf mineral content in the subtropical peach cv. UFSun. *HortScience* **2020**, *55*, 496–502. [[CrossRef](#)]
16. Newcomb, D.A. Selection of rootstocks for salinity and disease resistance. In Proceedings of the International Society of Citriculture II, Orlando, FL, USA, 3–7 December 1978; pp. 117–120.
17. Forner, J.B.; Aparicio, M.; Alcaide, A.; Giner, J.; Pina, J.A.; Sala, J. Present status of citrus rootstocks in Spain. In Proceedings of the International Society of Citriculture, Tokyo, Japan, 9–12 November 1981.
18. Urbaneja-Bernat, P.; Carrillo, D.; Jaques, J.A. Behavior of *Diaphorina citri*: An investigation of the potential risk to the most commonly used citrus rootstock in Europe. *Entomol. Gen.* **2020**, *40*, 79–86. [[CrossRef](#)]
19. Duran-Vila, N.; Bové, J.M. Citrus HLB is an emerging disease transmitted by psyllid vectors. Can it be prevented? If not, can it be managed? *Int. Cent. Adv. Mediterr. Agron. Stud. Watch Lett.* **2015**, *33*, 9.
20. Albrecht, U.; Bowman, K.D. Tolerance of the Trifoliate Citrus Hybrid US-897 (*Citrus reticulata* Blanco × *Poncirus trifoliata* L. Raf.) to Huanglongbing. *HortScience* **2011**, *46*, 16–22. [[CrossRef](#)]
21. Forner, J.B.; Forner-Giner, M.A.; Alcaide, A. Forner-Alcaide 5 and Forner-Alcaide 13: Two new citrus rootstocks released in Spain. *HortScience* **2003**, *38*, 629–630. [[CrossRef](#)]
22. Forner-Giner, M.A.; Forner, J.B. Nuevos patrones de cítricos resistentes a la salinidad. *Vida Rural* **2009**, *298*, 35–37.
23. Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. *Crop Water Requirements*; Food: Rome, Italy, 1977; Volume 24.
24. Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Primo-Millo, E.; Legaz, F. Fertigation: Concept and application in citrus. In *Advances in Citrus Nutrition*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; pp. 281–301. ISBN 9789400741713.
25. Turell, F.M. *Tables of Surfaces and Volumes of Spheres and of Prolate and Oblate Spheroids, and Spheroidal Coefficients*; University of California Press: Berkeley, CA, USA, 1946.
26. Pearce, S.C.; Doberšek-Urbanc, S. The measurement of irregularity in growth and cropping. *J. Hortic. Sci.* **1967**, *42*, 295–305. [[CrossRef](#)]
27. Steyn, W.J.A. Plant tissue analysis, errors involved in the preparative phase of leaf analysis. *J. Agric. Food Chem.* **1959**, *7*, 344–348. [[CrossRef](#)]
28. Ulrich, A.; Hills, F.J. Principles and practices of plant analysis. In *Soil Testing and Plant Analysis*; Westerman, R.L., Ed.; Soil Science Society of America: Madison, WI, USA, 1967; pp. 11–24.
29. Ashby, D.L. Washing techniques for the removal of nutrient element deposits from the surface of apple, cherry and peach leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* **1969**, *94*, 266–268.

30. IEDF. Comité interinstitucional para el estudio de diagnóstico foliar Métodos de referencia para la determinación de elementos minerales en vegetales. *An. Edafol. Agrobiol.* **1969**, *28*, 409–460.
31. Legaz, F.; Serna, M.D.; Ferrer, P.; Cebolla, V.; Primo-Millo, E. *Análisis de Hojas, Suelos y Aguas de Riego Para el Diagnóstico Nutricional de Plantaciones de cítricos. Procedimiento de Toma de Muestras*; Generalitat Valenciana—Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentació: Valencia, Spain, 1995.
32. Forner-Giner, M.A.; Rodríguez-Gamir, J.; Martínez-Alcantara, B.; Quiñones, A.; Iglesias, D.J.; Primo-Millo, E.; Forner, J. Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418). *Sci. Hortic.* **2014**, *179*, 376–387. [[CrossRef](#)]
33. Da Silva Rodrigues, M.J.; De Araújo Neto, S.E.; De Carvalho Andrade Neto, R.; Dos Santos Soares Filho, W.; Girardi, E.A.; Lessa, L.S.; De Almeida, U.O.; De Araújo, J.M.I. Agronomic performance of the ‘Pera’ orange grafted onto nine rootstocks under the conditions of Rio Branco, Acre, Brazil. *Rev. Bras. Ciências Agrar.* **2019**, *14*, e6642. [[CrossRef](#)]
34. Martins, C.R.; de Carvalho, H.W.L.; Teodoro, A.V.; de Barros, I.; de Carvalho, L.M.; Soares Filho, W.d.S.; Passos, O.S. Performance of the pineapple sweet orange on different rootstocks. *Biosci. J.* **2020**, *36*. [[CrossRef](#)]
35. Donadio, L.C.; Lederman, I.E.; Roberto, S.R.; Stucchi, E.S. Dwarfing-canopy and rootstock cultivars for fruit trees. *Rev. Bras. Frutic.* **2019**, *41*. [[CrossRef](#)]
36. Bassal, M.A. Growth, yield and fruit quality of ‘Marisol’ clementine grown on four rootstocks in Egypt. *Sci. Hortic.* **2009**, *119*, 132–137. [[CrossRef](#)]
37. Legua, P.; Bellver, R.; Forner, J.B.; Forner-Giner, M.A. Plant growth, yield and fruit quality of ‘Lane Late’ navel orange on four citrus rootstocks. *Span. J. Agric. Res.* **2011**, *9*, 271–279. [[CrossRef](#)]
38. Hervalejo, A.; Suarez, M.P.; Moreno-Rojas, J.M.; Arenas-Arenas, F.J. Overall fruit Quality of ‘Lane Late’ Orange on Sub-Standard and Semi-Dwarfing Rootstocks. *J. Agric. Sci. Tech.* **2020**, *22*, 235–246.
39. Li, Z.; Zhang, R.; Xia, S.; Wang, L.; Liu, C.; Zhang, R.; Fan, Z.; Chen, F.; Liu, Y. Interactions between N, P and K fertilizers affect the environment and the yield and quality of satsumas. *Glob. Ecol. Conserv.* **2019**, *19*, e00663. [[CrossRef](#)]
40. Perez-Zamora, O. Leaf nutrient concentration, yield, production efficiency, juice quality and nutrimental indexes on Valencia orange grafted on citrus rootstocks. *Agrociencia* **2004**, *38*, 141–154.
41. Ranjha, A.M.; Akram, M.; Mehdi, S.M.; Sadiq, M.; Sarfraz, M.; Hassan, G. Nutritional status of citrus orchards in Sahiwal district. *J. Biol. Sci.* **2002**, *2*, 453–458. [[CrossRef](#)]
42. Zekri, M.; Obreza, T.A. Micronutrient Deficiencies in Citrus: Iron, Zinc, and Manganese. *EDIS* **1969**, *2003*. [[CrossRef](#)]

Capítulo II. Evaluación de dos patrones de cítricos enanizantes bajo condiciones de cultivo de súper alta densidad con recolección mecanizada

Este segundo capítulo engloba el pre-print de *una publicación científica*:

- Hervalejo, A., Arjona-López, J.M., Romero-Rodríguez, E., Arenas-Arenas, F.J., 2022. Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for `Salustiana` orange trees grown under super-high-density conditions with mechanical harvesting. N. Z. J. Crop Hortic. Sci. DOI: 10.1080/01140671.2022.2090385

Resumen

El segundo capítulo de esta tesis trata, por un lado, de evaluar el comportamiento agronómico de dos patrones de cítricos enanizantes en una plantación de súper alta densidad y, por otro lado, de determinar su aptitud frente a la recolección mecanizada con un equipo sacudidor de copa cabalgante `tipo vendimiadora`, identificando a su vez aspectos de la estructura o formación del árbol condicionantes en el rendimiento de estos equipos.

Este capítulo, compuesto por el pre-print del artículo **Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for `Salustiana` orange trees grown under super-high-density conditions with mechanical harvesting**, publicado en el 2022 en la revista New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, surgió del interés de estos sistemas de plantación como estrategia para afrontar los principales desafíos a los que se enfrenta el sector. Así, aunque los sistemas de plantación de súper alta densidad podrían maximizar el rendimiento por hectárea e inducir una entrada en producción más temprana, pocos estudios de investigación han sido llevados a cabo en cítricos en la Cuenca del Mediterráneo. En este artículo se ha evaluado la idoneidad de la variedad de naranja `Salustiana` (*Citrus sinensis*) injertada sobre dos patrones de cítricos enanizantes (Forner-Alcaide nº 418 y Forner-Alcaide nº 517) para sistemas de plantación de súper alta densidad. Para ello, el crecimiento del árbol, el rendimiento y la calidad de la fruta de `Salustiana` fueron evaluados sobre los dos patrones de cítricos. Además, con una orientación al cultivo superintensivo (plantaciones de súper alta densidad y recolección mecanizada de la producción), se evaluó el potencial de un equipo sacudidor de copa cabalgante `tipo vendimiadora` para la recolección mecanizada de estos sistemas de plantación, determinándose a su vez la respuesta e idoneidad de los dos patrones de cítricos enanizantes a este sistema de recolección.

Para este último propósito, se determinó el efecto de la recolección mecanizada sobre el derribo y la recogida de los frutos, así como sobre el daño ocasionado a la estructura del árbol. Los resultados mostraron que `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 517 obtuvo un mejor comportamiento en condiciones de cultivo de súper alta densidad, en términos de crecimiento vegetativo, eficiencia productiva y calidad de fruta, que sobre Forner-Alcaide nº 418. Además, Forner-Alcaide nº 517 mostró una mejor respuesta frente a la recolección mecanizada, registrando una alta eficiencia en el derribo de los frutos. Se corroboró la importancia de una correcta formación de los árboles, mediante poda mecanizada, para la mejora de la eficiencia de derribo de los frutos y la reducción del daño ocasionado en el árbol. Así, aunque con la necesidad de algunas mejoras técnicas, el equipo sacudidor de copa `tipo vendimiadora´ presentó un gran potencial para la recolección de plantaciones de cítricos de súper alta densidad con destino a la industria del zumo.

Artículo 3. Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for `Salustiana´ orange trees grown under super-high-density conditions with mechanical harvesting

Título (en español): Idoneidad de dos patrones de cítricos enanizantes para una plantación de naranja `Salustiana´ bajo condiciones de súper alta densidad con recolección mecanizada.

Autores: Áurea Hervalejo, Juan Manuel Arjona López, Estefanía Romero Rodríguez y Francisco José Arenas Arenas.

Afiliaciones:

IFAPA Centro Las Torres. Ctra. Sevilla- Cazalla Km. 12,2. 41200. Alcalá del Río, Sevilla, España.

Revista: New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science

Año de Publicación: 2022

Doi: <https://doi.org/10.1080/01140671.2022.2090385>

Índice de impacto: 1,094 (JCR, 2021) (3^{er} Q).

Área y posición: Horticulture - SCIE (2021). Posición 26/36.



Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for super-high-density conditions with mechanical harvesting

Journal:	<i>New Zealand Journal of Crop & Horticultural Science</i>
Manuscript ID	NZJC-2022-0049
Manuscript Type:	Research Paper
Date Submitted by the Author:	05-Mar-2022
Complete List of Authors:	Hervalejo, Aurea; Andalusian Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA), Department of Agri-Food Engineering and Technology Arjona-López, Juan; Andalusian Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA), Department of Agri-Food Engineering and Technology Romero-Rodríguez, Estefanía; Andalusian Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA), Department of Agri-Food Engineering and Technology Arenas-Arenas, Francisco; Andalusian Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA), Department of Agri-Food Engineering and Technology
Keywords:	citrus, effective yield, Forner-Alcaide 418, Forner-Alcaide 517, mechanical canopy shaker

SCHOLARONE™
Manuscripts

Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for super-high-density conditions with mechanical harvesting

Aurea Hervalejo, Juan M. Arjona-López*, Estefanía Romero-Rodríguez, Francisco J. Arenas-Arenas

Department of Agri-Food Engineering and Technology, Andalusian Institute of Agricultural and Fisheries Research and Training (IFAPA), “Las Torres” Center, Ctra. Sevilla-Cazalla de la Sierra Km. 12.2, 41200, Alcalá del Río, Seville, Spain

Provide full correspondence details here including e-mail for the

*corresponding author: juanm.arjona@juntadeandalucia.es

Suitability of two dwarfing citrus rootstocks for super-high-density conditions with mechanical harvesting

Even though super-high-density plantation systems could maximize yield per acre and induce an early entry production, few research have been conducted in citrus crops worldwide. In this study, we assessed the suitability of ‘Salustiana’ orange fruit (*Citrus sinensis*) on two dwarfing rootstocks [Forner-Alcaide 418 (FA418) and Forner-Alcaide 517 (FA517)] under super-high-density plantation systems. Tree growth, yield and fruit quality of ‘Salustiana’ on both citrus rootstocks were evaluated. Furthermore, the suitability of mechanical harvesting was evaluated using an over-the-row continuous canopy shaker for this citrus plantation system. For this last purpose, the effects of mechanical harvesting on fruit detachment and fruit harvested and tree damage were analyzed. The results showed that ‘Salustiana’ orange on FA517 obtained better response than on FA418 in terms of vegetative growth, effective yield and fruit quality under super high density conditions. ‘Salustiana’ orange fruits were properly harvested by an over-the-row continuous canopy shaker, but only focused for the juice industry. Nevertheless, some canopy shaker improvements are still required to enhance harvesting efficiency and to reduce tree damage caused by the mechanical harvesting system, which was from slight to moderate.

Keywords: citrus; effective yield; Forner-Alcaide 418; Forner-Alcaide 517; mechanical canopy shaker

Introduction

In 2020, Spain covered the sixth highest citrus production in the world with more than six million tons in 297,970 hectares and the first fresh citrus fruits exporting quantity (more than 3.7 million tons). Sweet orange [*Citrus sinensis* (L.) Osb.] is the most important citrus species in Spain, which accounts for nearly half of the national production (FAOSTAT, 2022).

Harvesting and pruning constitutes more than half of the production costs for citrus crops in Spain, similar than other Mediterranean citrus growing countries (Torregrosa et al.

2010; Gutiérrez et al. 2012). This condition could be explained for the main destination of Spanish citrus fruits, which is fresh consumption; hence, citrus fruits are harvested by hand in order to get an optimal fruit quality. Moreover, the strong international competition demands the development of more competitive citrus production systems.

Super-high-density plantation systems have been emphasized as a good option to enhance the profitability of many fruit crops worldwide (Díez et al. 2016; Pellegrini et al. 2017; Ladaniya et al. 2020; Iglesias et al. 2021). In super-high-density citrus plantations, rapid growth into the desired bearing canopy volume and early entry into production are some of the most important advantages (Wheaton et al. 1990). In this plantation system, the use of semi-dwarfing or dwarfing citrus rootstocks plays an important role, because they can induce a reduced tree size and getting remarkable labour savings without compromising the optimum yield rate per hectare (Martins et al. 2020; Hervalejo et al. 2021). Moreover, the use of citrus rootstocks are an essential tool to induce tolerance to different abiotic and biotic disorders (Aparicio-Durán et al. 2021a; Aparicio-Durán et al. 2021b; Aparicio-Durán et al. 2021c; Aparicio-Durán et al. 2021d; Hervalejo et al. 2021). Thus, new dwarfing citrus rootstocks have been reported with better field adaptation than conventional ones against common stress conditions, such as lime induced chlorosis, salinity, water deficit and/or biotic factors (Forner et al. 2003; Forner-Giner et al. 2014; Bowman et al. 2016; Aleza and Forner-Giner 2020). Indeed, Carrizo citrange [*C. sinensis* (L.) Osb. × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.], one of the most grown citrus rootstocks in Mediterranean citrus producing countries (Forner-Giner et al. 2014; Tallón Vila 2015), is a standard citrus rootstock characterized by inducing high vigour and susceptible to lime induced chlorosis and salinity (Newcomb 1978; Forner et al. 1981; Forner-Giner et al. 2014). Thus, the search of more interesting citrus rootstocks is the major aim in many of these countries for providing updated plant material technology.

On the other hand, the future viability of citrus crops in main citrus producing countries, including those from Mediterranean Basin, is seriously threatened by the Huanglongbing or citrus greening disease (HLB). Suggested actions for HLB mitigation include eradication of infected trees and their replacement with disease-free trees. The increase of plantation density allows not only an early bearing and yield, including less yield disruption as trees die (Stover et al. 2008; Schumann et al. 2012). Hence, plantation density should be increased to compensate the large number of eradicated trees.

In addition, an adequate mechanical harvesting system is essential for improving the competitiveness of super-high-density citrus plantations (Arenas and Hervalejo 2012; Arenas et al. 2012; Arenas-Arenas et al. 2018). The most important factors affecting harvesting, just like pruning, include fruit type and its utilization or destination (fresh consumption or juice industry), grove characteristics and labour requirements (Whitney 1995; Hervalejo et al. 2021). Thus, recent studies assessing the mechanical harvesting of several citrus species and cultivars have shown that the trunk shaker is ideal for fruit detachment in conventional citrus plantations, with detachment percentage between 70 and 85% in all cases, showing minimal damage to bark of the tree (Torregrosa et al. 2009; Torregrosa et al. 2010; Ortiz and Torregrosa 2013; Moreno et al. 2015). But this mechanical harvesting system is not suitable in super-high-density plantation systems, in which canopy shakers systems have been proposed as a valid alternative due to their effectiveness to harvest citrus cultivars for industry in super-high-density conditions (Peterson 1998; Arenas and Hervalejo 2012; Ehsani and Khot 2012; Arenas-Arenas et al. 2020).

The aim of this research was to assess the suitability of two dwarfing citrus rootstocks, Forner-Alcaide no. 418 and Forner-Alcaide no. 517, grafted with 'Salustiana' under super-high-density citrus plantations. The evaluation of an over-the-row continuous

canopy shaker was carried out with the working capacity in terms of fruit detachment and fruit and tree damages.

Materials and methods

Plant material and experimental field

This study was carried out in an experimental super-high-density sweet orange plantation with approximately one hectare and located in the municipality of Villarrasa, Huelva, in the south-western of Spain. This citrus plantation was established in 2007 with 'Salustiana' orange cultivar grafted on two dwarfing citrus rootstocks: Forner-Alcaide no. 517 (FA517) and Forner-Alcaide no. 418 (FA418). The citrus plantation was grown with a tree spacing of four meters (among rows) and 1.5 meters (among trees into the row), this distribution has been reported as the suitable tree spacing for super-high-density citrus plantation systems (Stuchi et al. 2003). The experimental field was composed by 25 tree rows, with approximately 100 meters and 66 trees per each row (1,666 trees/ha) and a goblet pruning system with three main branches established by hand pruning.

'Salustiana' is a mid-season sweet orange cultivar with an optimal fruit quality for juice industry. Otherwise, FA418 (citrange 'Troyer' x *Citrus deliciosa* Ten.), has been described as a dwarfing citrus rootstock that induces high productivity, fruit size and quality with Navel orange cultivars (Forner-Giner et al. 2014). It is tolerant to Citrus Tristeza Virus (CTV), but sensitive to nematodes, salinity, limestone soils and *Phytophthora* spp. (Martínez-Cuenca et al. 2016). Further, FA517 ['King' mandarin x *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.] has been reported as dwarfing citrus rootstock that provides high productivity and optimal fruit quality (Forner-Giner et al. 2014). It is tolerant to CTV, limestone soils, salinity excess, *Phytophthora* spp. and *Tylenchulus semipenetrans* (Aleza and Forner-Giner 2020).

The experimental field was divided in two sections or subplots (one section per rootstock) with approximately 8,000 m² of 'Salustiana' on FA418 and 2,000 m² of 'Salustiana' on FA517. In each subplot, three tree lines were chosen and four random trees (hereafter known as "marked trees") were selected per each line (n = 12).

Mechanical harvesting system

An experimental field trial was carried out in this super-high density citrus plantation during the 2013/2014 growing season, the fruits were harvested at the end of March, 2014 (conventional harvesting period of 'Salustiana' orange fruits). The over-the-row continuous canopy shaker NEW HOLLAND VX7090 (CNH Industrial, Amsterdam, Netherlands) was evaluated in this experimental field with a forward speed of 1.40 km h⁻¹ and a shaking frequency of 400 cpm (6.67 Hz), following the previous optimal experiences obtained in preliminary assays.

Measurements and procedures

To evaluate the differences in tree growth and fruit quality between the two citrus rootstocks, several measurements were carried out in the marked trees at the end of March 2014 and prior to the mechanical harvesting trial. For tree growth, tree height (TH; m), longitudinal (LD) and transversal (TD) canopy diameter (m) were measured. Canopy volume (Cv; m³) was calculated according to (Turrell 1946).

The fruit retention force (*FRF*: N) and fruit quality parameters were considered. *FRF*, which is defined as the tension strength needed to separate the stalk (fruit stem) from the fruit, were measured in 16 fruits per tree by using a dynamometer FK Model (Sauter AG, Basel, Switzerland). On the other hand, ten fruits per citrus rootstock were randomly hand harvested by hand from both orientations (east and west) and from each tree row selected

for the trial. Morphological and organoleptic fruit quality were measured in lab. The fruit morphological parameters evaluated were equatorial diameter (D , mm) and height (H , mm), from which the fruit shape index was calculated (D/H), colour index (a common indicator of external fruit quality and fruit ripening) and peel thickness (mm). Color index was measured by using the chromatometer CR-300™ (Konica Minolta, CR-300, Ramsey, NJ, USA), with three reading at different locations around the fruit equatorial plane, and considering Hunter's a , b and L parameters described by (Jiménez-Cuesta et al. 1981). Fruit diameter, height and peel thickness of each fruit were measured by using a digital slide gauge CD-15 DAX Model (Mitutoyo Corporation, Kawasaki, Japan). The fruit organoleptic parameters analysed were juice content %, titratable acidity (TA; g/100cm), total soluble solids (TSS, °Brix) and ripening index ($RI = TSS/TA$). Fruit juice from each fruit sample was extracted by using an electric squeezer, and juice percentage (w/w) was calculated as the ratio between the weight of the juice and the weight of the sample, multiplying this ratio by 100. TSS was measured by using a digital refractometer PR100 (Atago Corporation Ltd., Tokyo, Japan) and TA was determined by titration of 5 ml of juice with 0.1 N NaOH using phenolphthalein as indicator (Forner-Giner et al. 2003; Legua et al. 2011a; Legua et al. 2011b).

To estimate the average annual yield, the total number of fruits on each marked tree were accounted immediately before the mechanical harvesting trial. The average yield per tree row was later calculated by multiplying the average number of fruits per tree by the average fruit weight (from the fruit sample) and by the total number of trees on the row.

After mechanical harvesting trial, the number of remaining fruits on each marked tree, as well as the number of its fallen fruits on the soil surface, were counted independently. The fruit detachment percentage (FD, %) achieved by the assessed over-the-row harvester continuous canopy shaker was calculated by using the Equation 1:

$$(1) \text{FD}\% = (\text{No. Fruits}_i - \text{No. Fruits}_f) * 100 / \text{No. Fruits}_i$$

where No. Fruits_i is the number of fruits before mechanical harvesting and No. Fruits_f is the number of fruits remaining on the tree after mechanical harvesting.

Likewise, the fruit harvested percentage (FH, %) was calculated by using the Equation 2:

$$(2) \text{FH}\% = (\text{No. Fruits}_i - \text{No. Fruits}_f - \text{No. Fallen Fruits}) * 100 / \text{No. Fruits}_i$$

The height above ground level (cm) at which the fruits remained on the tree after mechanical harvesting was recorded. Furthermore, the fruit damages were also evaluated after mechanical harvesting. For that purpose, two fruit samples, each consisting of 25 fruits, were stored for a week under environmental conditions, one of them from mechanical harvesting and the other one from harvesting by hand.

A visual evaluation was made of the tree damage caused by the canopy shaker. It was used four points rating scale according to the severity of the damage: 0 = no appreciable visual tree damage, 1 = light abrasion in the bark, 2 = broken small branches and 3 = broken main branches.

Statistical analysis

The variation in continuous variables between the two citrus rootstocks was assessed using the STATISTICA 7.0 software package (StatSoft Inc., Palo Alto, CA, USA). To evaluate significant differences in terms of tree growth, fruit morphological quality and yield an ANOVA analysis was performed. Normality and homogeneity assumptions were tested before ANOVA, using the Kolmogorov-Smirnov and Cochran's tests, respectively. In the case of non-observance of the normality and homogeneity assumptions, a nonparametric Kruskal-Wallis test was adopted. In the same way, the fruit retention force,

fruit detachment and harvested percentage were statistically compared between both citrus rootstocks.

Results

Vegetative growth and yield

We found significant differences in tree canopies between citrus rootstocks ($P < 0.05$). Thus, 'Salustiana' sweet orange displayed greater canopy volume and tree height on FA517 than FA418. On the other hand, FA517 provided higher average number of fruits and yield per tree than FA418, which was statistically different in the case of the number of fruits per tree (Table 1).

Fruit quality

In the fruit quality parameters, only statistical differences were found in the color index response between both rootstocks ($P < 0.05$). 'Salustiana' fruits from FA517 obtained higher degree of external ripeness than FA418, for both rootstocks all the assessed oranges had attained the right degree of ripeness, higher than 7 (Jiménez-Cuesta et al. 1981), when the measurements were taken (end of March). Regarding the equatorial diameter, height, fruit shape index and peel thickness did not evince differences between rootstocks ($P > 0.05$), being the fruits from FA418 slightly wider and higher (Table 2).

Regardless of the citrus rootstock, 'Salustiana' sweet orange recorded a good fruit organoleptic quality, showing a juice content around 49.00% and a ripening index slightly above 14.50. 'Salustiana' sweet orange fruits had slightly higher values of TSS and TA on FA517 than FA418 (Table 2).

Effectiveness of mechanical harvesting and retention force

The FRF varied between rootstocks with statistical differences ($P < 0.05$), being higher on FA517 than on FA418. Similarly, 'Salustiana' fruit detachment response was significantly higher on FA517 than on FA418. Conversely, no significant differences were found between rootstocks with the fruit harvested percentage, in which, 'Salustiana' fruits from FA517 obtained better response than FA418 (Table 3). On the other hand, the height above ground level at which orange fruits were not properly harvested by the assessed canopy shaker ranged from 51.50 cm for FA517 and from the ground level to 39.78 cm for FA418 (data not showed).

Lastly, the action of the over-the-row continuous canopy shaker harvester caused slight damage to trees in FA418 (light abrasion in the bark with some broken small branches) and moderate damage to trees in FA517 (broken small branches with an occasional broken main branch) (Table 3). Moreover, oranges harvested by hand hardly suffered damage; whereas, mechanically harvested oranges were highly damaged (close to 50% of the fruits were rotten after a week of storage under environmental conditions) (data not showed).

Discussion

Differences in vegetative growth and yield between rootstocks

The size-controlling capacity of dwarfing citrus rootstocks is associated with their lower hydraulic conductance (smaller lumen area of root xylem vessels) and higher hydraulic resistance of stem bud union segments in comparison to conventional vigorous rootstocks (Iwasaki et al. 2011; Martínez-Alcántara et al. 2013; Forner-Giner et al. 2014; Martínez-Cuenca et al. 2016). This diminishes water provisioning during high evaporative demand periods, which causes a reduction in stomatal conductance and leads to a lower

translocation of photo-assimilates from leaves to roots (resistance to sucrose) and long-term growth stunting (Martínez-Alcántara et al. 2013; Martínez-Cuenca et al. 2016). However, not all dwarfing rootstocks perform equally, even if they are closely related. Dwarfing or semi-dwarfing citrus rootstocks are especially suitable for super-high-density plantation systems in order to reduce the gap between trees and tree lines, provided that it does not affect productivity or fruit quality (da Silva Rodrigues et al. 2019; Hervalejo et al. 2021).

In our study, FA517 clearly induced higher vegetative growth and fruit yields in six-year-old 'Salustiana' orange trees than FA418. A better performance of 'Navel' orange on FA517 has also been obtained in traditional plantation systems (Forner-Giner et al. 2014). These findings denote that FA517 could be considered as an interesting citrus rootstock for establishing super-high-density citrus plantations, because it induces a suitable tree size with a considerable yield. Moreover, both FA517 and FA418 have the added advantage of being resistant to salinity, being FA517 also tolerant to lime induced chlorosis (Forner-Giner et al. 2014; Martínez-Cuenca et al. 2016), which are two limiting factors present in many soils of the Mediterranean area.

Fruit quality

Several studies have shown an effect of the citrus rootstocks on the citrus fruit quality (Arenas et al. 2011; Legua et al. 2011a; Forner-Giner et al. 2014; Hervalejo et al. 2020). In this sense, 'Salustiana' orange fruits on FA418 recorded a slightly greater size (diameter and height), but FA517 induced a more attractive peel colour and a slightly higher organoleptic quality (total soluble solids and acidity).

Response to mechanical harvesting

The detachment efficiency of mechanical harvesting systems is often below 85% in oranges, clementines or lemons, even when ethephon, monopotassium phosphate or another abscission chemical is sprayed before harvesting (Torregrosa et al. 2010; Moreno et al. 2015). In our case, the over-the-row continuous canopy shaker reached 92.10% for FA517 and 77.72% for FA418 without using any abscission agent. These results did not correspond to the fruit retention force, thus 'Salustiana' orange fruits on FA517 recorded higher values of this (94 N) than those on FA418 (83 N), neither to the fruit weight, where FA418 induced the more weight and size 'Salustiana' orange fruits. On the contrary, the largest number of fruits located on the low branches of the 'Salustiana' orange trees on FA418 could explain the lowest values reached in fruit detachment. Thus, fruits at low height branches (less than 40 cm over ground level) were not properly harvested by the assessed canopy shaker. Considering this, tree pruning to maintain a steady height would allow for improving the detachment efficiency by the over-the-row canopy shaker. The successful implementation of this harvester system requires pruning branches growing below the first 45-50 cm of the tree trunk (Arenas and Hervalejo 2012) which should not have a negative impact on yield or fruit quality (Whitney et al. 2003; Chhetri and Kandel 2019), inducing production in higher areas of the tree canopy. The differences obtained in fruit harvesting between citrus rootstocks were mainly due to detachment percentage, being the harvesting capacity of the canopy shaker similar between citrus rootstocks.

Mechanical harvesting systems may cause damage to citrus trees or yield, such as defoliation, twig loss, removal of flowers and young fruits, exposure of roots and occasionally, partial bark removal (Li and Syvertsen 2004). In the current study, the action of the canopy shaker caused slight damage to trees in FA418 and moderate damage to trees in FA517. The smaller size of the 'Salustiana' orange trees induced by FA418

could explain the least damage caused by the canopy shaker. Nevertheless, mechanical pruning of the trees is oriented to the lifting for low branches tree and to the disposal of trees in continuous hedge, which may reduce the tree damage (Arenas-Arenas et al. 2018; Arenas-Arenas et al. 2020).

Moreover, oranges harvested by hand hardly suffered damage, whereas close to 50% of the mechanically harvested oranges were highly damaged. These findings discourage the use of this machine for harvesting fruits destined for fresh markets; however, it is especially suitable for super-high-density crops destined for juice production, because fruits are processed shortly after harvesting.

The assessed canopy shaker worked properly at 400 cpm and 1.4 km/h in ‘Salustiana’ orange on both citrus rootstocks without causing damages that would exceed their suitability to yield. Thus, other canopy shaker models operating at lower frequencies cause more substantial damage (Peterson 1998; Savary et al. 2010). On the other hand, given the expected high productivity of super-high-density citrus crops when trees reach the full yield (adult citrus trees), the fruit collection and unloading systems must be improved to larger charging hoppers and higher speed of uploading and unloading the fruit in trailers. Thus, new over-the-row continuous canopy shaker models have partially solved some harvesting constraints in grape or olive super-high-density plantations; e.g., the unload system has been redesigned with a side conveyor system has been assembled for unloading on the go, as well as non-stop harvesting, which promotes a better work performance and a significant reduction in harvesting costs. Although this kind of canopy shakers still needs upgrading, there are a lot of potential for harvesting super-high-density citrus plantations.

Conclusions

The results showed that ‘Salustiana’ orange on FA517 performed better than on FA418 in terms of vegetative growth, yield and fruit quality under super high-density conditions, showing also a better response to mechanical harvesting by the over-the-row canopy shaker. Nevertheless, ‘Salustiana’ orange fruits on both citrus rootstocks were properly harvested by this over-the-row continuous canopy shaker, but only in citrus fruits for juice industry. Although some canopy shaker improvements are still required to enhance harvesting efficiency, the over-the-row harvesting equipment displayed lot of potential for harvesting super-high-density citrus crops. Moreover, a special relevance acquires the mechanical pruning of trees, oriented to the lifting for low branches tree and to the disposal of trees in continuous hedge, in order to reduce tree damage and improve the harvesting efficiency with the over-the-row continuous canopy shaker.

Acknowledgements

We are very grateful to J. Torrents and Dr. M. Bordas from Agromillora Iberia S.A. for the supplied plant material. We also want to thank J.C. Rituerto and J.M. Gersol, for providing the area in which the trials were carried out, and to Lora Lora Hnos. S.C. for the mechanical harvesting equipment employed for the trial. Financial support was provided by the Project ‘Citrusrec’ (RTA2014-0025-C05-04) and co-financed by the Spanish National Institute for Agricultural and Food Research and Technology (INIA) and the European Regional Development Fund (ERDF).

References:

Aleza P, Forner-Giner MA. 2020. El panorama varietal y los nuevos patrones. Análisis de la situación actual. In: García Álvarez-Coque JM, Moltó García E, editors. Una hoja ruta para la Citric española. Almería, Spain: Cajamar Caja Rural; p. 151–166.

Aparicio-Durán L, Gmitter Jr. FG, Arjona-López JM, Grosser JW, Calero-Velázquez R, Hervalejo A, Arenas-Arenas FJ. 2021a. Evaluation of three new citrus rootstocks under boron toxicity conditions. *Agronomy*. 11(12):2490.

Aparicio-Durán L, Hervalejo A, Calero-Velázquez R, Arjona-López JM, Arenas-Arenas

FJ. 2021b. Salinity effect on plant physiological and nutritional parameters of new Huanglongbing disease-tolerant Citrus rootstocks. *Agronomy*. 11(4):653.

Aparicio-Durán L, Gmitter Jr. FG, Arjona-López JM, Calero-Velázquez R, Hervalejo Á, Arenas-Arenas FJ. 2021c. Water-stress influences on three new promising HLB-tolerant Citrus rootstocks. *Horticulturae*. 7(10):336.

Aparicio-Durán L, Arjona-López JM, Hervalejo A, Calero-Velázquez R, Arenas-Arenas FJ. 2021d. Preliminary findings of new Citrus rootstocks potentially tolerant to foot rot caused by *Phytophthora*. *Horticulturae*. 7(10):389.

Arenas-Arenas FJ, Romero-Rodríguez E, Corredera JM, Hervalejo A. 2018. Recolección mecanizada del cultivo de cítricos, una alternativa de futuro. *Vida Rural*. 446:26–35.

Arenas-Arenas FJ, Romero-Rodríguez E, Hervalejo A. 2020. Intensificación del cultivo de cítricos. *Vida Rural*. 480:38–42.

Arenas FJ, Hervalejo A. 2012. Primeras experiencias del sistema de cultivo superintensivo en cítricos. *Vida Rural*. 352:36–40.

Arenas FJ, Hervalejo A, Merino C, Salguero A. 2012. Possibilities for citrus mechanical harvesting in Spain. *Acta Hort.* 6(965):65–72.

Arenas FJ, Hervalejo A, Prats T, Salguero A, Forner-Giner MA. 2011. Resultados preliminares del comportamiento de Clemenules injertada sobre varios patrones. *Vida Rural*. 335:44–48.

Bowman KD, Faulkner L, Kesinger M. 2016. Field Performance and Nursery Characteristics. *Hortscience*. 51(10):1208–1214.

Chhetri LB, Kandel BP. 2019. Intensive fruit cultivation technology of citrus fruits: High density planting: A brief review. *J Agric Stud*. 7(2):63–74.

Díez CM, Moral J, Cabello D, Morello P, Rallo L, Barranco D. 2016. Cultivar and tree density as key factors in the long-term performance of super high-density olive orchards. *Front Plant Sci*. 7:1226.

Ehsani R, Khot L. 2012. Over-the-row mechanical harvesting machine for dwarf and young citrus trees. *Citrus Ind*. 93:10–11.

FAOSTAT, 2022. Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations. [accessed 2022 Jan 11]. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>

Forner-Giner M., Alcaide A, Primo-Millo E, Forner JB. 2003. Performance of “Navelina” orange on 14 rootstocks in Northern Valencia (Spain). *Sci Hortic (Amsterdam)*. 98(3):223–232.

Forner-Giner MA, Rodriguez-Gamir J, Martinez-Alcantara B, Quiñones A, Iglesias DJ, Primo-Millo E, Forner J. 2014. Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418). *Sci Hortic (Amsterdam)*. 179:376–387.

Forner JB, Aparicio M, Alcaide A, Giner J, Pina JA, Sala J. 1981. Present status of citrus rootstocks in Spain. In: Matsumoto K, editor. *Int Soc Citric Int Citrus Congr*. Tokyo, Japan: Shimizu, Japan: 1982-1983; p. 106–109.

Forner JB, Forner-Giner MA, Alcaide A. 2003. Forner-Alcaide 5 and Forner-Alcaide 13: Two new citrus rootstocks released in Spain. *HortScience*. 38(4):629–630.

Gutiérrez A, Blasco J, Chueca P, Garcerá C, Alegre S, López S, Cubero S, Moltó E. 2012. Harvesting and in-field sorting of citrus with a self-propelled machine. *Acta Hortic*.(965):149–152.

Hervalejo A, Suarez M, Moreno-Rojas J, Arenas-Arenas F. 2020. Overall fruit quality of ‘Lane Late’ orange on sub-standard and semi-dwarfing rootstocks. *J Agric Sci Technol*. 22(1):235–246.

Hervalejo A, Suárez MP, Arenas-Arenas FJ. 2021. Substandard and Semi-Dwarfing Citrus Rootstocks for More Intensive, Higher-Density, and Sustainable Plantation Systems. *Agronomy*. 11(4):660.

Iglesias I, Foles P, Oliveira C. 2021. El cultivo del Almendro en España y Portugal: situación, innovación tecnológica, costes, rentabilidad y perspectivas. *Rev Frutic*. 81:6–49.

Iwasaki M, Fukamachi H, Satoh K, Nesumi H, Yoshioka T. 2011. Development of tree vigor prediction method at an early stage based on stem hydraulic conductance of seedlings in citrus rootstocks. *J Japanese Soc Hortic Sci*. 80(4):390–395.

Jiménez-Cuesta M, Cuquerella J, Martínez-Javaga JM. 1981. Determination of a color index for citrus fruit degreening. In: *Int Soc Citric Int Citrus Congr Novemb 9-12*. Tokyo, Japan: Shimizu, Japan: International Society of Citriculture, 1982-1983.; p. 750–753.

Ladaniya MS, Marathe RA, Das AK, Rao CN, Huchche AD, Shirgure PS, Murkute AA.

2020. High density planting studies in acid lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). *Sci Hortic* (Amsterdam). 261:108935.

Legua P., Bellver R, Forner JB, Forner-Giner MA. 2011a. Plant growth, yield and fruit quality of 'Lane Late' navel orange on four citrus rootstocks. *Spanish J Agric Res.* 9(1):271–279.

Legua P, Bellver R, Forner JB, Forner-Giner MA. 2011b. Trifoliata hybrids rootstocks for 'Lane Late' navel orange in Spain. *Sci Agric.* 68(5):548–553.

Li K-T, Syvertsen JP. 2004. Does mechanical harvesting hurt your trees? *Citrus Ind.* 85x:30–33.

Martínez-Alcántara B, Rodríguez-Gamir J, Martínez-Cuenca MR, Iglesias DJ, Primo-Millo E, Forner-Giner MA. 2013. Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raft var. *monstruosa*). *Trees.* 27(3):629–638.

Martínez-Cuenca M-R, Primo-Capella A, Forner-Giner MA. 2016. Influence of rootstock on Citrus tree growth: effects on photosynthesis and carbohydrate distribution, plant size, yield, fruit quality, and dwarfing genotypes. In: Rigobelo EC, editor. *Plant Growth.* Vol. 16. Rijeka, Croatia: IntechOpen; p. 107–129.

Martins CR, Carvalho HWL de, Teodoro AV, Barros I de, Carvalho LM de, Soares Filho W dos S, Passos OS. 2020. Performance of the pineapple sweet orange on different rootstocks. *Biosci J.* 36(2).

Moreno R, Torregrosa A, Moltó E, Chueca P. 2015. Effect of harvesting with a trunk shaker and an abscission chemical on fruit detachment and defoliation of citrus grown under Mediterranean conditions. *Spanish J Agric Res.* 13(1):1–12.

Newcomb DA. 1978. Selection of rootstocks for salinity and disease resistance. In: *Int Soc Citric.* Orlando, Florida; p. 117–120.

Ortiz C, Torregrosa A. 2013. Determining adequate vibration frequency, amplitude, and time for mechanical harvesting of fresh mandarins. *Trans ASABE.* 56(1):15–22.

Pellegrini G, La Sala P, Camposeo S, Contò F. 2017. Economic sustainability of the oil high and super-high density cropping systems in Italy. *Glob Bus Econ Rev.* 19(5):553–569.

- Peterson DL. 1998. Mechanical harvester for process oranges. *Appl Eng Agric.* 14(5):455–458.
- Savary S, Ehsani R, Schueller JK, Rajaraman BP. 2010. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. *Trans ASABE.* 53(5):1373–1381.
- Schumann A, Hostler K, Waldo L. 2012. Advanced citrus production systems—grove designs for higher efficiencies. *Citrus Ind.:*6–9.
- da Silva Rodrigues MJ, de Araújo Neto SE, de Carvahlo Andrade Neto R, Soares Filho W, Girardi EA, Lessa LS, de Almeida UO, de Araújo JM. 2019. Agronomic performance of the ‘Pera’ orange grafted onto nine rootstocks under the conditions of Rio Branco, Acre, Brazil. *Rev Bras Ciências Agrárias - Brazilian J Agric Sci.* 14(4):1–8.
- Stover E, Castle WS, Spyke P. 2008. The citrus grove of the future and its implications for Huanglongbing management. In: *Florida State Hort Soc.* Vol. 121. Lake Alfred, Florida, USA; p. 155–159.
- Stuchi ES, Donadio LC, Sempionato OR. 2003. Performance of Tahiti lime on *Poncirus trifoliata* var. *monstrosa* Flying Dragon in four densities. *Fruits.* 58(1):13–17.
- Tallón Vila CI. 2015. Biotechnology applied to the genetic improvement of citrus rootstocks. Development of a protocol for micropropagation and adventitious regeneration for use in generating salt toleran mutant lines. [place unknown]: Universidad de Murcia, Murcia, Spain.
- Torregrosa A, Ortí E, Martín B, Gil J, Ortiz C. 2009. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain. *Biosyst Eng.* 104(1):18–24.
- Torregrosa A, Porras I, Martín B. 2010. Mechanical harvesting of lemons (cv. Fino) in Spain using abscission agents. *Trans ASABE.* 53(3):703–708.
- Turrell FM. 1946. Tables of surfaces and volumes of spheres and of prolate and oblate spheroids, and spheroidal coefficients. Berkeley, CA: University of California Press.
- Wheaton TA, Castle WS, Whitney JD, Tucker DPH, Muraro RP. 1990. A high density citrus planting. In: *Florida State Hort Soc.* Vol. 103. Lake Alfred, Florida, USA; p. 55–59.
- Whitney JD. 1995. A review of citrus harvesting in Florida. In: *ASME Citrus Eng Symp.*

Lakeland, Florida, USA: American Society of Mechanical Engineers; p. 33–59.

Whitney JD, Wheaton TA, Castle WS, Tucker DPH. 2003. Tree skirting effects on yield and quality of Valencia oranges. In: Florida State Horticultural Soc. Orlando, Florida, USA; p. 236–239.

For Peer Review Only

Abbreviations:

CTV: Citrus Tristeza Virus

TH: tree height

LD: longitudinal diameter

TD: transversal diameter

Cv: canopy volume

FRF: fruit retention force

D: diameter

H: height

TA: titratable acidity

TSS: total soluble solids

FD: fruit detachment percentage

FH: fruit harvested percentage

For Peer Review Only

Table 1. Mean values \pm standard error (SE) for parameters of tree growth [tree height (m) and canopy volume (m³)] and fruit production [number of fruits/tree and yield (kg/tree)] of 'Salustiana' sweet orange cultivar grafted on two different citrus rootstocks [FA517 and FA418].

Tree growth and fruit production parameters	Mean values \pm SE	
	FA517	FA418
Tree height (m)	2.28 \pm 0.075 a	2.00 \pm 0.058 b
Canopy volume (m ³)	5.37 \pm 0.22 a	4.05 \pm 0.18 b
Number of fruits/tree	171.5 \pm 6.38 a	134.3 \pm 9.34 b
Yield (kg/tree)	34.34 \pm 1.28 ns	29.12 \pm 2.00 ns

Values in the same row followed by different letters denote significant differences between rootstocks ($P < 0.05$). ns: not significant differences.

Table 2. Mean values \pm standard error (SE) for fruit parameters of morphological quality [equatorial diameter (mm), height (mm), peel thickness (mm) and color index] and organoleptic quality [juice content (%), titrable acidity (g/100 cm³), total soluble solids ($^{\circ}$ Brix) and ripening index] of 'Salustiana' sweet orange cultivar on two different citrus rootstocks [FA517 and FA418].

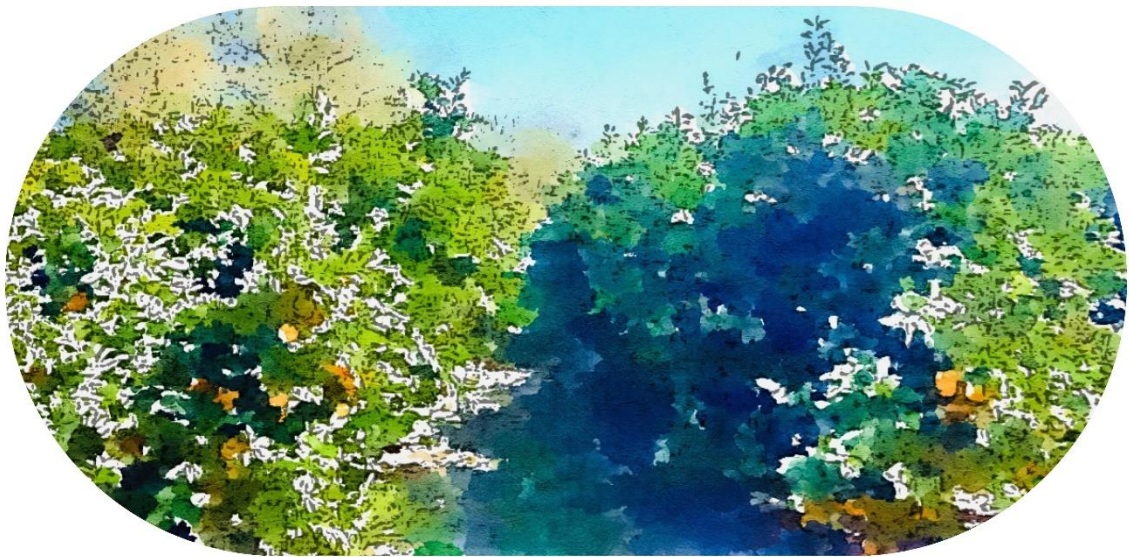
Quality fruit parameters	Mean values \pm SE	
	FA517	FA418
Equatorial diameter (mm)	74.14 \pm 1.63 ns	76.65 \pm 1.33 ns
Height (mm)	72.01 \pm 1.71 ns	73.81 \pm 1.83 ns
Peel thickness (mm)	5.82 \pm 0.24 ns	5.98 \pm 0.33 ns
Color index	9.09 \pm 0.29 a	7.44 \pm 0.26 b
Juice content (%)*	48.99	49.27
TA (g/100cm ³)*	0.84	0.75
TSS ($^{\circ}$ Brix)*	12.20	11.10
RI (TA/TSS)*	14.60	14.82

Values in the same row followed by different letters denote significant differences between rootstocks ($P < 0.05$). ns: not significant differences. *Value measured in the juice from all the fruits of the sample (Mean value).

Table 3. Mean values \pm standard error (SE) of mechanical harvesting parameters [FRF (N), FD (%) and FH (%)] of 'Salustiana' sweet orange cultivar on two different citrus rootstocks [FA517 and FA418].

Mechanical harvesting parameters	Mean values \pm SE	
	FA517	FA418
FRF (N)	94.25 \pm 1.92 a	83.03 \pm 2.89 b
FD %	92.10 \pm 1.24 a	77.72 \pm 5.03 b
FH%	84.30 \pm 1.40 ns	72.30 \pm 6.66 ns
Tree damage	2.25 \pm 0.25 ns	1.25 \pm 0.48 ns

Values in the same row followed by different letters denote significant differences between rootstocks ($P < 0.05$). ns: not significant differences. FRF: Fruit retention force (N); FD: Fruit detachment percentage (%); FH: Fruit harvesting percentage (%).



DISCUSIÓN GENERAL

Discusión General

La intensificación sostenible del cultivo de los cítricos se presenta como una estrategia de gran interés ante los nuevos desafíos a los que se enfrenta el sector (FAO 2017): el incremento de la población mundial, el cambio climático, la globalización y los nuevos compromisos europeos en materia de sostenibilidad. Una intensificación que, comprometida con el medio ambiente y la biodiversidad, debe asentarse en tres pilares fundamentales: la adecuada elección del patrón, una mayor densidad de plantación y la mecanización de la producción (Arenas y Hervalejo, 2012; Arenas-Arenas et al., 2020a; 2020b).

1. Patrones de cítricos

El patrón tiene la capacidad de influir sobre diferentes aspectos agronómicos de la variedad, tales como el crecimiento vegetativo (Forner-Giner et al., 2014; Dubey y Sharma, 2016; Da Silva Rodrigues et al., 2019; Martins et al., 2020), la producción (Legua et al., 2011a; Dubey y Sharma, 2016; Yilmaz et al., 2018) y el momento óptimo de maduración y la calidad de la fruta (Forner-Giner et al., 2003; Filho et al., 2007; Hervalejo et al., 2010; Legua et al., 2014).

1.1. Patrones de cítricos sub-estándar y semi-enanizantes

En el **Capítulo I**, donde se evaluaron **tres patrones de cítricos sub-estándar** (Forner-Alcaide nº 5) **y semi-enanizantes** (Forner-Alcaide nº 41 y Forner-Alcaide nº 13) frente a otros tres tradicionales (citrange Carrizo, *Citrus macrophylla* y mandarina 'Cleopatra') sobre la variedad 'Lane Late' y en sistema de plantación convencional (6 x 4 m), se obtuvieron diferencias significativas entre patrones en lo referente al desarrollo y crecimiento del árbol, producción, momento óptimo de recolección y calidad general de la fruta.

1.1.1. Estado nutricional de los árboles de 'Lane Late'

Ante el alto riesgo de desertificación de los suelos mediterráneos y el objetivo de la estrategia "De la Granja a la Mesa" de la Unión Europea en reducir como mínimo un 20 % el uso de fertilizantes para el 2030 (Comisión Europea, 2020), se requiere de patrones de cítricos más eficientes en la absorción de los elementos minerales del suelo. Varios trabajos respaldan el efecto de los patrones de cítricos sobre el desarrollo y el estado nutricional de los árboles (Dubey y Sharma, 2016; Yilmaz et al., 2018). La mayor

eficiencia en la absorción y/o uso de los nutrientes del suelo se presenta como una estrategia de gran interés para plantaciones de cítricos sostenibles, reduciendo así la necesidad del empleo de fertilizantes de síntesis.

En este trabajo se encontraron diferencias significativas entre patrones en las concentraciones foliares de macro y micronutrientes, poniéndose de manifiesto un efecto del patrón sobre el estado nutricional del árbol de `Lane Late`.

Según los umbrales establecidos por Legaz et al. (1995) para el cultivo del naranjo, la plantación de `Lane Late`, independientemente del patrón, registró niveles muy bajos o bajos de N, P y Cu en la última de las dos campañas estudiadas (2012/2013) así como un nivel bajo de Zn en las dos campañas de estudio (2009/2010 y 2012/2013). En este sentido, la deficiencia en Zn se presenta como un problema habitual en muchas regiones cítricas del mundo (Ranjha et al., 2002), bien por un bajo contenido de los suelos en Zn, un alto contenido en carbonatos y/o, como ocurre en la parcela experimental del estudio, un elevado pH del suelo (Quiñones et al., 2012).

No obstante, se observó un comportamiento diferente entre patrones en los niveles foliares de N, K, Ca, Mg, Cu, Fe y Mn en una o en ambas campañas de estudio, obteniéndose valores bajos sobre algunos de estos patrones. Considerando estas diferencias en los niveles foliares de macro y micronutrientes se identificaron patrones más o menos eficientes en la absorción de los nutrientes del suelo.

Así, *C. macrophylla* y Forner-Alcaide nº 13 destacaron por ser los únicos patrones sobre los que `Lane Late` registró valores óptimos de N en la campaña 2009/2010. En este sentido, patrones de cítricos más eficientes en la absorción y/o uso del N adquiere una gran relevancia en áreas del Mediterráneo, donde la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas es un hecho preocupante. Del mismo modo, *C. macrophylla* registró las mayores concentraciones foliares de K en ambas campañas de estudio (seguido de Forner-Alcaide nº 13) y los niveles más altos de Mn (seguido de Forner-Alcaide nº 5 y Forner-Alcaide nº 13). Por el contrario, *C. macrophylla* fue el único patrón sobre el que `Lane Late` registró concentraciones foliares bajas de Mg, registrando también, aunque dentro del rango óptimo, las menores concentraciones foliares en Ca. En línea con estos resultados, Pérez-Zamora (2004) en un trabajo sobre naranjo Valencia observó que *C. macrophylla* registró una concentración foliar de Ca inferior al de los demás patrones estudiados, al contrario que la concentración foliar de N, la cual fue superior a la registrada sobre *C. Carrizo* o mandarina `Cleopatra`. Por último, *C. macrophylla* registró niveles foliares bajos en Cu en las dos campañas de estudio (al igual que Forner-Alcaide

nº 5 y mandarina 'Cleopatra'), llegando incluso a registrar niveles deficientes en 2012/2013.

C. Carrizo fue el único patrón sobre el que 'Lane Late' registró concentraciones foliares bajas de K y Mn en 2012/2013. El hecho de que c. Carrizo, Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 5 fuesen los únicos patrones sobre los que 'Lane Late' registró niveles foliares bajos de Fe en 2009/2010, respalda los resultados obtenidos por Zekri y Obreza (1969), en los que el naranjo trifoliado y sus híbridos mostraron una menor capacidad de absorción de Fe. No obstante, las deficiencias de Fe pueden corregirse de forma efectiva y sostenible mediante la aplicación de quelatos de hierro vía foliar.

Forner-Alcaide nº 5 registró sobre las hojas de 'Lane Late' los valores más bajos en P, llegando a alcanzar, al igual que mandarina 'Cleopatra', niveles deficientes o muy bajos en la campaña 2012/2013.

Por el contrario, 'Lane Late' sobre Forner-Alcaide nº 13 mostró, en comparación con el resto de los patrones, la mayor concentración foliar de P en las dos campañas de estudio, con valores óptimos en la campaña 2009/2010 y muy próximos al recomendado (Legaz et al., 1995) en la campaña 2012/2013. Así también, y aunque 'Lane Late' registró en general niveles foliares de B óptimos en ambas campañas de estudio, Forner-Alcaide nº 13 registró los valores más elevados, de forma similar a Forner-Alcaide nº 41.

Así, los árboles de 'Lane Late' sobre c. Carrizo mostraron la menor eficiencia en el uso de los nutrientes del suelo, al contrario que sobre Forner-Alcaide nº 13. Este último patrón indujo sobre 'Lane Late' los mejores niveles foliares de N, P y K, macronutrientes esenciales que están involucrados en la producción y la calidad de la fruta (Li et al., 2019). Resultados similares en Forner-Alcaide nº 13 fueron obtenidos por Forner-Giner et al. (2011) sobre plántones de naranjo del grupo Valencia.

Además, Forner-Alcaide nº 13 se presenta como un patrón de gran interés para las áreas del Mediterráneo dada su excelente resistencia a la salinidad (Forner-Giner y Forner, 2009), al contrario que c. Carrizo, así como su mayor resistencia a la asfixia radical (Martínez-Cuenca et al., 2016). No obstante, la sensibilidad de Forner-Alcaide nº 13 a la clorosis férrica y nematodos (Martínez-Cuenca et al., 2016), similar a la de c. Carrizo, requiere tener en cuenta los niveles de caliza activa, así como la presencia de nematodos en el suelo, este último principalmente en las replantaciones.

1.1.2. Crecimiento vegetativo de los árboles de 'Lane Late'

Muchos estudios apoyan el efecto de los patrones de cítricos sobre el crecimiento de los árboles, de hecho, se conocen patrones de cítricos de carácter sub-estándar, semi-enanizantes y enanizantes (Martínez-Cuenca et al., 2016; Donadio et al., 2019).

En los resultados obtenidos en este trabajo sobre árboles de 'Lane Late' de doce años de edad se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre patrones en lo referente al tamaño final del árbol. Así, los árboles de 'Lane Late' expresaron una menor altura, diámetro transversal y volumen de copa sobre Forner-Alcaide nº 13 (2,24 m, 3,11 m y 10,28 m³, respectivamente) y Forner-Alcaide nº 41 (2,27 m, 3,33 m y 11,23 m³), mientras que c. Carrizo (3,34 m, 3,65 m y 24,62 m³) y *C. macrophylla* (2,87 m, 3,50 m y 20,75 m³) indujeron los árboles de mayor porte. El resto de los patrones, mandarino 'Cleopatra' y Forner-Alcaide nº 5, mostraron un comportamiento intermedio. Resultados similares han sido obtenidos por otros autores, tales como Forner et al. (2003) quienes apreciaron en Forner-Alcaide nº 5 y Forner-Alcaide nº 13 la capacidad de reducir el tamaño del árbol entre un 25 y un 50 % frente a patrones estándar, Bassal (2009) quien observó una menor altura del árbol de clementina 'Marisol' sobre mandarino 'Cleopatra' en comparación con c. Carrizo, o Jover et al. (2012) quienes reportaron una menor altura, diámetro y volumen de copa en árboles de naranja Navel sobre Forner-Alcaide nº 13 en comparación con mandarino 'Cleopatra'.

Un buen parámetro para evaluar el desarrollo del árbol y el crecimiento relativo entre el patrón y la variedad es la ratio entre los diámetros de tronco de ambos (Martínez-Cuenca et al., 2016). La relación entre los diámetros del patrón y de la variedad (D_r/D_s) es un indicador de la similitud en la tasa de crecimiento entre las dos fracciones del árbol, por lo que es usado como un indicador de la afinidad entre ambos (Roose et al., 1989; Martins et al., 2020).

Los árboles de 'Lane Late' sobre c. Carrizo y Forner-Alcaide nº 5 registraron de forma significativa ($p < 0,05$) los diámetros de tronco de patrón (D_r) más elevados (16,29 y 16,22 cm, respectivamente), mientras que los árboles sobre Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 41 tuvieron los valores más bajos (13,57 y 12,56 cm). Mandarino 'Cleopatra' y *C. macrophylla* obtuvieron valores intermedios. En general, el diámetro de tronco de la variedad (D_s) mostró una tendencia entre patrones similar a la obtenida en el diámetro de tronco del patrón (D_r), salvo en Forner-Alcaide nº 5, el cual registró uno de los mayores diámetros de tronco de patrón, induciendo por el contrario sobre 'Lane Late' uno de los diámetros de tronco más bajos. Como resultado de esto, los árboles de 'Lane Late' sobre Forner-Alcaide nº 5 registraron la mayor relación entre el diámetro del

patrón y el diámetro de la variedad (Dr/Ds ; 1,52), mientras que, por el contrario, esta relación fue menor, y próxima a la unidad, en `Lane Late´ sobre mandarino `Cleoptara´ (1,17) y sobre *C. macrophylla* (1,28). De la misma manera, otros trabajos han identificado una buena afinidad de diferentes variedades con *C. macrophylla* (Legua et al., 2011a) y mandarino `Cleopatra´ (Bassal, 2009; Da Silva Rodrigues et al., 2019). No obstante, en nuestro trabajo, una mayor relación entre el diámetro del patrón y el diámetro de la variedad (Dr/Ds) no debe ser entendida como una incompatibilidad entre ambas fracciones de la planta ya que no se obtuvo una correlación entre Dr/Ds y la concentración foliar de los distintos nutrientes.

Por otro lado, a diferencia de Dubey y Sharma (2016), quienes encontraron en árboles de limón `Kagzi Kalan´ una correlación positiva entre el crecimiento vegetativo y el contenido foliar de Ca, en nuestro trabajo la única correlación obtenida entre el crecimiento vegetativo de `Lane Late´ y los contenidos foliares de nutrientes fue la del diámetro del patrón con el Zn ($r = 0,42$). No obstante, no se obtuvieron diferencias significativas entre patrones en el contenido foliar de Zn, por lo que las diferencias registradas en el crecimiento vegetativo de `Lane Late´ no deben vincularse a aspectos nutricionales sino a otros factores fisiológicos del patrón. Así, Lliso et al. (2004) sugirieron que el efecto enanizante inducido por algunos patrones era mediado por un mayor desarrollo reproductivo en detrimento del crecimiento vegetativo. Jover et al. (2012) sugirieron que el menor tamaño obtenido en naranjo Navel sobre Forner-Alcaide nº 13 pareció responder, en cierto grado, a un cambio en el patrón de distribución de los fotoasimilados como consecuencia de la competencia entre los órganos vegetativos y reproductivos.

1.1.3. Productividad de los árboles de `Lane Late´

Ninguno de los patrones aquí estudiados indujo en `Lane Late´ una alternancia en la cosecha considerable. Aunque sin diferencias significativas, *C. macrophylla* presentó las producciones más uniformes (ABI 15,39%), al igual que ha sido observado por Legua et al. (2011a). No obstante, el resto de los patrones indujeron valores de alternancia en la cosecha bajos (entre 23,30 y 35,48 %).

Los resultados revelaron un efecto del patrón sobre la producción de `Lane Late´. Así, `Lane Late´ sobre *C. macrophylla* registró la mayor producción media (60,93 kg/árbol), con valores anuales significativamente diferentes ($p < 0,05$) en cuatro de las seis campañas de cultivo. Por el contrario, `Lane Late´ sobre Forner-Alcaide nº 13 (32,44 kg/árbol) y Forner-Alcaide nº 41 (36,85 kg/árbol) registró la producción media más baja,

mientras que c. Carrizo (43,04 kg/árbol), mandarino 'Cleopatra' (42,05 kg/árbol) y Forner-Alcaide nº 5 (40,08 kg/árbol) mostraron una producción media intermedia. Producciones similares fueron notificadas por Legua et al. (2011a) en árboles de 'Lane Late' bajo condiciones estándar de fertilización.

Las diferencias en producción registradas entre patrones se debieron en gran parte al diferente crecimiento vegetativo inducido sobre los árboles de 'Lane Late', así al referir la producción al volumen de copa (eficiencia productiva; kg/m³) las diferencias significativas entre patrones desaparecieron. Aún sin diferencias significativas, *C. macrophylla*, mandarino 'Cleopatra' y Forner-Alcaide nº 13 registraron las mayores eficiencias productivas en 'Lane Late' (4,10, 3,94 y 3,80 kg/m³, respectivamente), seguidos de Forner-Alcaide nº 41 (3,72 kg/m³) y Forner-Alcaide nº 5 (3,55 kg/m³), situándose en último lugar c. Carrizo (2,76 kg/m³).

Se obtuvo una correlación positiva entre la eficiencia productiva (kg/m³) y el contenido foliar en N (r= 0,61), P (r=0,63) y K (r=0,48). Esta correlación se observó de forma más evidente en 'Lane Late' sobre *C. macrophylla* y Forner-Alcaide nº 13, patrones que indujeron mayores eficiencias productivas y registraron mayores contenidos foliares en N, P y K. En este sentido, N y K son dos de los principales nutrientes esenciales involucrados en la producción y la calidad de la fruta (Li et al., 2019).

1.1.4. Maduración y calidad de la fruta de naranja 'Lane Late'

El patrón influye en el proceso de maduración y en la calidad de los frutos, por lo que su elección debe orientarse a alcanzar la mejor calidad de fruta en conformidad con la demanda del mercado: calidad morfológica (apariencia), calidad organoléptica (sabor) y calidad funcional (compuestos bioactivos o promotores de la salud).

- *Maduración de la fruta de 'Lane Late'*

Tanto los parámetros morfológicos como el contenido en compuestos bioactivos de la fruta de 'Lane Late' registraron una evolución similar independientemente del patrón empleado. Por el contrario, las diferencias obtenidas entre patrones en la evolución de los parámetros organolépticos recomendaron momentos de recolección diferentes en función del patrón a fin de obtener la mejor calidad de la fruta de 'Lane Late'.

En cuanto a los parámetros morfológicos se observó, al igual que en otros trabajos (Fattahi et al., 2011; Merino et al., 2015), que el tamaño de fruta de 'Lane Late' incrementó con la maduración, identificándose el mes de abril como la fecha más interesante para alcanzar los mayores calibres de fruta. No obstante, los frutos de 'Lane

Late´ sobre *C. macrophylla* presentaron ya en el mes de enero calibres de fruta superiores o similares a los registrados en el mes de abril sobre los otros patrones.

La fruta de `Lane Late´ en general evolucionó hacia formas más alargadas y cortezas más gruesas. Estos parámetros por sí solos no tienen un gran impacto sobre la calidad de la fruta. No obstante, los valores extremos de espesor de corteza no son deseables para su comercialización. Así, frutos con una corteza gruesa son considerados frutos bastos, normalmente relacionados con un bajo contenido en zumo, mientras que aquellos con piel fina se presentan más propensos al rajado y más sensibles a las alteraciones fisiológicas de la piel en almacén (Martínez-Cuenca et al., 2016). Por último, la fruta de `Lane Late´ adquirió de forma general una mayor coloración en el mes de marzo (13,33), mientras que en abril se volvieron a registrar valores similares a los de enero (12,06) como consecuencia de un ligero reverdecimiento de la corteza de los frutos. Este reverdecimiento de los frutos podría estar relacionado con una variación de la temperatura ambiental, tal y como ocurre con otros pigmentos como los antocianos bajo condiciones cálidas (Steyn, 2008; Morales et al., 2021).

En cuanto a las alteraciones fisiológicas se encuentran la granulación (Sharma y Saxena, 2004), alteración grave de la fruta en precosecha, en la que las vesículas del zumo se agrandan, endurecen y secan, y la clareta, alteración consistente en la rotura del albedo. En consonancia con lo expresado por otros autores (Kahn et al., 2007), en este trabajo se obtuvo que la granulación de la fruta de `Lane Late´ fue más intensa al final de su periodo de maduración, registrándose incluso de forma significativa con el patrón *C. macrophylla* en el mes de marzo y con los patrones Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 5 en el mes de abril. Por otro lado, se observó un incremento general de la incidencia de clareta en el mes de marzo. No obstante, ni la desintegración ni la clareta alcanzaron un grado de incidencia superior a leve (<1) en ninguno de los patrones, salvo en *C. macrophylla* en el que la fruta de `Lane Late´ mostró un grado de incidencia moderado desde el mes de marzo.

El índice de madurez interna, definido como la relación entre el contenido en sólidos solubles totales (°Brix) y la acidez (g/100 cc), es el parámetro más ampliamente empleado para determinar la madurez comercial de los cítricos (European Union, 2011). Por otro lado, la relación entre el índice de madurez y el contenido en sólidos solubles totales aporta información sobre el sabor del zumo ("lengua de Pritchett") (Baier, 1954).

Durante la maduración de los frutos de `Lane Late´, los sólidos solubles totales incrementaron mientras que la acidez total descendió, lo que se tradujo en un incremento del índice de madurez. Esta misma evolución ha sido observada en distintos

grupos y variedades de naranjas (Fattahi et al., 2011; Merino et al., 2015). Desde enero, los frutos de `Lane Late´ registraron un índice de madurez (12,39) superior al mínimo requerido para su madurez comercial (6,5). Sin embargo, desde marzo *C. macrophylla*, c. Carrizo y Forner-Alcaide nº 41 mostraron zumos de baja calidad organoléptica o zumos descompensados según la gráfica de "lengua de Pritchett" (Baier, 1954), como consecuencia de un contenido en sólidos solubles totales insuficiente (< 12ºBrix) para el alto índice de madurez alcanzado (> 16). Los frutos de `Lane Late´ experimentaron una reducción en el contenido de zumo con la maduración de los mismos, reducción que sólo se registró de forma significativa sobre el patrón *C. macrophylla* en el mes de marzo (39,56 %) y sobre c. Carrizo (43,14 %) en el mes de abril. Una evolución similar en sólidos solubles totales, acidez y contenido en zumo fue descrita por Kahn et al. (2007) sobre determinadas variedades del grupo Navel.

La firmeza de los frutos es un parámetro que ha adquirido mucha importancia en los últimos años ya que condiciona su aptitud para la comercialización, especialmente cuando los frutos son expuestos a largos trayectos o a un periodo de almacenamiento prolongado. Por otro lado, la combinación de la firmeza interna y el contenido en zumo de los frutos, constituyen un buen indicador de la textura en boca de la pulpa de la fruta. En este sentido, en este trabajo se obtuvo que la firmeza interna de la naranja `Lane Late´ descendió con la maduración de la fruta, registrándose de forma significativa en el mes de abril. Esta menor firmeza registrada en el mes de abril probablemente esté relacionada con la pérdida de zumo experimentada en ese mes.

La maduración tuvo un efecto sobre el contenido en los compuestos bioactivos de la fruta de `Lane Late´, como también ha sido observado en otras variedades de cítricos o incluso en otros frutales (Fattahi et al., 2011; Vlaic et al., 2017). Así, el contenido de polifenoles totales descendió de forma progresiva con la maduración de la fruta de `Lane Late´. Por el contrario, el contenido de flavonoides se mantuvo más o menos constante a lo largo de las diferentes fechas de muestreo. Una respuesta diferente fue obtenida por Fattahi et al. (2011) en otras variedades de naranja. No obstante, hay que tener en cuenta que el trabajo de Fattahi et al. (2011) no sólo se llevó a cabo en naranjas no pertenecientes al grupo `Navel´, sino que además los análisis se realizaron en una fase muy temprana de maduración, incluso, en la mayoría de los casos, inferior a la maduración mínima comercial (European Union, 2011).

Integrando la evolución de los diferentes parámetros de calidad para cada uno de los patrones se obtuvieron diferentes momentos óptimos de recolección de la fruta de `Lane Late´. Así, se identificó el mes de enero como la fecha de recolección más adecuada

para `Lane Late` sobre *C. macrophylla*, c. Carrizo y Forner-Alcaide nº 41, mientras que sobre mandarina `Cleopatra`, Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 5 fue el mes de marzo el momento de recolección más apropiado. Teniendo en cuenta el interés comercial en retrasar la recolección de la naranja `Lane Late` (variedad de media estación) lo máximo posible, *C. macrophylla* o c. Carrizo mostraron un menor interés. Este aspecto tendría que ser considerado por determinados países productores de cítricos para el mercado en fresco, como Arabia Saudí y España, en donde estos dos patrones son ampliamente usados o su superficie va en aumento (Forner-Giner et al., 2003; Al-Jaleel et al., 2005).

- *Calidad general de la fruta de naranja `Lane Late`*

La calidad general de la fruta de `Lane Late`, morfológica, organoléptica y funcional, se vio afectada por el patrón.

C. macrophylla indujo de forma significativa los frutos más grandes (86,62 y 87,16 mm de diámetro y altura) y pesados (320 g), mientras que Forner-Alcaide nº 13 (80,06 y 80,19 mm de diámetro y altura y 266 g de peso) y mandarina `Cleopatra` (80,43 y 82,04 mm de diámetro y altura y 270 g de peso) obtuvieron los frutos más pequeños y ligeros. Los frutos de `Lane Late` sobre c. Carrizo, Forner-Alcaide nº 5 y Forner-Alcaide nº 41 mostraron tamaños y pesos intermedios. No obstante, en los meses de marzo y abril los calibres y peso de los frutos de `Lane Late` sobre Forner-Alcaide nº 13 y mandarina `Cleopatra` no se diferenciaron significativamente de aquellos obtenidos sobre Forner-Alcaide nº 5 o Forner-Alcaide nº 41. Por otro lado, *C. macrophylla* indujo significativamente el mayor espesor de corteza (6,76 mm), respaldando la tendencia de los frutos más grandes a presentar las cortezas más gruesas (Kahn et al., 2007).

La fruta de `Lane Late` sobre los diferentes patrones mostró valores similares en cuanto al color de la corteza, la forma del fruto o la incidencia de clareta. Por el contrario, una mayor incidencia de granulación fue obtenida en los frutos de `Lane Late` sobre *C. macrophylla*, significativamente superior a la incidencia registrada sobre Forner-Alcaide nº 13 en las diferentes fechas de muestreo.

La fruta de `Lane Late` sobre *C. macrophylla* o c. Carrizo obtuvo una calidad interna más baja que sobre los otros patrones. Así, los frutos de naranja `Lane Late` sobre *C. macrophylla* registraron los contenidos más bajos en zumo y en sólidos solubles totales (40,42 % y 9,85 °Brix, respectivamente), mientras que c. Carrizo indujo sobre los frutos de `Lane Late` los menores contenidos en polifenoles y flavonoides totales (65,72 mg EG/100 g FW y 47,43 mg EQ/100 g FW, respectivamente). La baja calidad interna de fruta inducida por *C. macrophylla* ha sido anteriormente referida por otros autores (Al-

Jaleel et al., 2005; Hervalejo et al., 2010; Legua et al., 2011a). Al contrario que *C. macrophylla* o c. Carrizo, Forner-Alcaide nº 13, seguido de Forner-Alcaide nº 5 y mandarino `Cleopatra`, indujo sobre `Lane Late` la mayor calidad interna de fruta, con los contenidos más elevados en sólidos solubles totales (12,31 °Brix) y zumo (48,55 %). Por otro lado, mandarino `Cleopatra` y Forner-Alcaide nº 13 mostraron también los valores más altos en el contenido de flavonoides totales (77,18 y 75,71 mg EG/100 g FW, respectivamente). Por último, Forner-Alcaide nº 13 y Forner-Alcaide nº 41 indujeron la mayor firmeza interna de fruta (7,28 y 7,12 Newton, respectivamente).

Teniendo en cuenta todos los parámetros anteriores, y aun considerando la fecha óptima de recolección de `Lane Late` para cada patrón, se obtuvieron diferencias en lo referente a la calidad de fruta inducida. Así, *C. macrophylla* indujo sobre `Lane Late` el mayor tamaño de fruta, pero la menor calidad organoléptica del zumo, mientras que `Lane Late` sobre c. Carrizo mostró los contenidos más bajos en compuestos bioactivos, tanto en polifenoles como en flavonoides totales. Por el contrario, Forner-Alcaide nº 5, Forner-Alcaide nº 13 y mandarino `Cleopatra` indujeron sobre `Lane Late` la mayor calidad interna de fruta, mientras que Forner-Alcaide nº 41 indujo una calidad intermedia.

1.2. Patrones de cítricos enanizantes

En el **Capítulo II**, donde se evaluaron dos **patrones de cítricos enanizantes** (Forner-Alcaide nº 517 y Forner-Alcaide nº 418) en condiciones de cultivo superintensivo sobre la variedad `Salustiana`, se obtuvieron diferencias significativas entre patrones en lo referente al crecimiento vegetativo, la producción del árbol y la calidad de fruta de `Salustiana`.

1.2.1. Tamaño de los árboles de `Salustiana`

La capacidad que presentan los patrones de cítricos enanizantes para reducir el tamaño del árbol ha sido asociado a los menores potenciales hídricos de tallo y hojas registrados sobre la variedad, en comparación con los patrones vigorosos (Martínez-Cuenca et al., 2016), probablemente como consecuencia de la menor conductividad hidráulica (menor grosor de los vasos del xilema) de la raíz y la mayor resistencia hidráulica de la unión del injerto (Iwasaki et al., 2011; Martínez-Alcántara et al., 2013; Forner-Giner et al., 2014; Martínez-Cuenca et al., 2016). La menor capacidad de transporte de agua desde el suelo a los tallos, en periodos de alta demanda evaporativa se traduce en una menor conductancia estomática y translocación de fotoasimilados desde las hojas a las raíces,

provocando a largo plazo un retraso en el crecimiento (Martínez-Alcántara et al., 2013; Martínez-Cuenca et al., 2016). No obstante, no todos los patrones de cítricos enanizantes tienen por qué mostrar el mismo comportamiento, incluso estando estrechamente emparentados.

En este trabajo, y sobre árboles de seis años de edad de naranja 'Salustiana', Forner-Alcaide nº 517 indujo un mayor crecimiento vegetativo que Forner-Alcaide nº 418, registrándose de forma significativa tanto en la altura (2,28 y 2,00 m, respectivamente) como en el volumen de copa (5,37 y 4,05 m³, respectivamente) del árbol. En estas diferencias obtenidas entre patrones debe entenderse que no existe una influencia del marco de plantación empleado, sino que estas diferencias se deben al carácter inherente del patrón. Así, un comportamiento similar en Forner-Alcaide nº 418 (Legua et al., 2011b) y entre Forner-Alcaide nº 418 y Forner-Alcaide nº 517 (Forner-Giner et al., 2014) ha sido observado en sistemas de plantación convencionales con marcos de plantación más amplios (4,5 x 4 m y 6 x 6 m, respectivamente).

Tal y como se mencionaba al principio de este epígrafe, Forner-Giner et al. (2014) obtuvieron que los árboles de naranja Navel sobre Forner-Alcaide nº 517 y Forner-Alcaide nº 418 registraron una menor conductividad hidráulica que los injertados sobre c. Carrizo, incrementando el cierre estomático en periodos de alta demanda evaporativa, con la consiguiente reducción de la asimilación de CO₂. Un efecto que según Forner-Giner et al. (2014) fue más acusado sobre el patrón, menos vigoroso, Forner-Alcaide nº 418.

1.2.2. Productividad de los árboles de 'Salustiana'

Forner-Alcaide nº 517 indujo sobre 'Salustiana' una mayor producción que Forner-Alcaide nº 418 (34,34 y 29,12 kg/árbol, respectivamente). Resultados similares fueron obtenidos por Forner-Giner et al. (2014) en una plantación convencional de naranja Navel. En este trabajo de Forner-Giner et al. (2014), ambos patrones enanizantes (Forner-Alcaide nº 517 y Forner-Alcaide nº 418) indujeron una menor producción que c. Carrizo (kg/árbol), mostrando no obstante una eficiencia productiva (kg/m³) superior. Entre los posibles factores involucrados en la mayor eficiencia productiva de los patrones enanizantes, Martínez-Alcántara et al. (2013) y Forner-Giner et al. (2014) proponen la menor translocación de fotoasimilados desde las hojas a las raíces, incrementando el transporte de carbono hacia los frutos.

1.2.3. Calidad de la fruta de naranja 'Salustiana'

El patrón tuvo un efecto sobre la calidad de la fruta de 'Salustiana'. Aunque sin diferencias significativas, la fruta de 'Salustiana' sobre Forner-Alcaide nº 418 registró un tamaño ligeramente superior (76,65 mm de diámetro y 73,81 mm de altura) al obtenido sobre Forner-Alcaide nº 517 (74,14 y 72,01 mm). No obstante, el patrón Forner-Alcaide nº 517 indujo sobre 'Salustiana' una coloración externa de la corteza significativamente más atractiva (9,09 frente a un índice de color de 7,44 de Forner-Alcaide nº 418) y una mejor calidad organoléptica del zumo: mayor contenido en sólidos solubles totales (12,20 °Brix frente a 11,10 °Brix de Forner-Alcaide nº 418) y mayor acidez (0,84 g/100 cc frente a 0,75 g/100 cc de Forner-Alcaide nº 418). Un comportamiento similar entre patrones ha sido obtenido en condiciones de cultivo convencionales sobre naranja Navel (Forner-Giner et al., 2014), mostrando ambos patrones una calidad interna similar a la de c. Carrizo.

2. Densidad de plantación

En base a los resultados obtenidos en el **capítulo I** y **capítulo II** se identifican los patrones estándar, sub-estándar, semi-enanizante y enanizantes más interesantes para sistemas de plantación de diferente grado o nivel de intensificación con 'Lane Late'.

2.1. Sistemas de plantación convencional

Para sistemas de plantación convencional, de marcos de plantación amplios (6 x 4 m el más habitual en naranjo, con 417 árboles/ha), los patrones que indujeron una mayor dimensión horizontal de la copa (área sombreada; D²) y una mayor producción por árbol fueron c. Carrizo, *C. macrophylla* y Forner-Alcaide nº 5, sin diferencias significativas ($p > 0,05$) entre ellos.

Entre estos tres patrones, Forner-Alcaide nº 5 destacó sobre c. Carrizo y *C. macrophylla* por permitir una fecha de recolección de la fruta de 'Lane Late' más tardía y competitiva (mes de marzo), inducir una calidad morfológica (82,72 mm de diámetro, 13,65 de índice de color y 290 g de peso) similar a la de c. Carrizo y una calidad organoléptica (48,87 % de zumo, 12,16 °Brix y 0,80 g/100 cc de acidez total) y funcional (71,59 mg EG/100 g FW de polifenoles totales y 51,99 mg EQ/100 g FW de flavonoides totales) superior a c. Carrizo y *C. macrophylla*. Además, Forner-Alcaide nº 5 se mostró más eficiente en el uso de los nutrientes que c. Carrizo, mostrando únicamente niveles foliares deficientes en N, Fe y Cu, mientras que c. Carrizo presentó niveles foliares deficientes en N, K, Fe y Mn.

Por otro lado, Forner-Alcaide nº 5 se presenta como un patrón de gran interés para los suelos mediterráneos dada su buena tolerancia a la salinidad y a la clorosis férrica inducida por las condiciones calizas de los suelos (Forner et al., 2003), al contrario de lo descrito para c. Carrizo (Forner et al., 1982; Newcomb, 1978). Por otro lado, al contrario que Forner-Alcaide n.º 5 (Martínez- Cuenca et al., 2016), *C. macrophylla* se presenta sensible al virus de la tristeza (Cambra y Moreno, 2000), además de mostrar este último otras limitaciones bióticas y abióticas, tales como una mayor sensibilidad a los nematodos y a la asfixia radical (Aleza et al., 2020).

2.2. Sistemas de plantación de alta densidad

Existe una tendencia a nivel mundial hacia plantaciones de cítricos de mayor densidad (Donadio et al., 2019; Gonzatto et al., 2022). Las principales razones de este interés son el menor tiempo de amortización de la inversión inicial para la plantación, el manejo más sencillo de las principales prácticas de cultivo y una mejor inspección y erradicación de determinadas plagas y enfermedades de importancia (por ejemplo, Huanglongbing de los cítricos o HLB). Sin embargo, esta tecnología requiere de un control efectivo del crecimiento de la copa de los árboles, en donde el empleo de patrones de reducido porte (sub-estándar, semi-enanizantes o enanizantes) y alta eficiencia productiva (kg/m^3 de copa) adquiere un papel relevante (Gonzatto et al., 2022). En este sentido, Da Silva Rodrigues et al. (2019) indicaron el interés de considerar el crecimiento del árbol inducido por el patrón a fin de reducir al máximo la distancia entre árboles y entre líneas de plantación, siempre y cuando no se afecte la productividad ni la calidad de fruta.

En nuestro trabajo, la menor extensión horizontal de copa (área sombreada; D^2) inducida por algunos patrones sobre 'Lane Late', en especial Forner-Alcaide nº 13 (D^2 : 10,10 m^2) y Forner-Alcaide nº 41 (D^2 : 10,98 m^2), significativamente inferior a la inducida por citrange Carrizo (D^2 : 14,49 m^2), reveló la posibilidad de utilizar una densidad de plantación superior a la de las plantaciones convencionales. Así, ajustando la distancia entre árboles al tamaño de copa inducido por cada patrón (Da Silva Rodrigues et al. 2019), se obtendría en nuestro caso una densidad de plantación de más de 540 árboles/ha de 'Lane Late' sobre Forner-Alcaide nº 13, Forner-Alcaide nº 41 o mandarino 'Cleopatra', sin necesidad de forzar el tamaño del árbol mediante la poda.

En plantaciones de mayor densidad, un menor porte de árbol junto a una mayor eficiencia productiva (kg/m^3) son la clave para alcanzar, o incluso superar, los rendimientos (t/ha) de las plantaciones de cítricos convencionales.

Así, en lo referente a la eficiencia productiva de `Lane Late`, *C. macrophylla* (4,10 kg/m³), mandarino `Cleopatra` (3,94 kg/m³) y Forner-Alcaide nº 13 (3,80 kg/m³) indujeron, aunque sin diferencias significativas, los valores más altos, al contrario que c. Carrizo (2,76 kg/m³).

Teniendo en cuenta ambos aspectos, la extensión horizontal de copa y la eficiencia productiva, Forner-Alcaide nº 13, Forner-Alcaide nº 41 y mandarino `Cleopatra` presentaron un gran potencial para su uso en plantaciones de `Lane Late` de alta densidad (> 540 árboles/ha), con rendimientos (t/ha) similares o incluso superiores al de las plantaciones convencionales de `Lane Late` establecidas sobre c. Carrizo, uno de los patrones más representativos de los países productores del Mediterráneo.

En vista a los resultados obtenidos en `Lane Late` en el epígrafe anterior (Patrón de los cítricos), los patrones Forner-Alcaide nº 13 y mandarino `Cleopatra` adquieren un mayor interés. Así, Forner-Alcaide nº 13 y mandarino `Cleopatra` destacaron, junto a Forner-Alcaide nº 5, por permitir una fecha de recolección más tardía y competitiva en `Lane Late`, así como una mayor calidad interna de la fruta. Por otro lado, Forner-Alcaide nº 13 se mostró más eficiente en el uso de los nutrientes del suelo, mostrando mejores niveles foliares en N, P y K.

Considerando de forma conjunta todos los resultados, Forner-Alcaide nº 13 se presentó como el patrón más idóneo para sistemas de plantación de `Lane Late` más sostenibles y de mayor densidad. No obstante, dada su sensibilidad a la clorosis férrica, similar a la de c. Carrizo (Martínez-Cuenca et al., 2016), el patrón mandarino `Cleopatra` podría presentarse como una alternativa interesante para aquellos suelos alcalinos o de alto contenido en caliza activa, siempre que no presente otros factores bióticos o abióticos, tales como nematodos, HLB o encharcamiento, a los que mandarino `Cleopatra` presenta una mayor sensibilidad (Albrecht and Bowman, 2011; Aleza et al., 2020).

2.3. Sistemas de plantación de súper alta densidad

El empleo de patrones de cítricos enanizantes en plantaciones de súper alta densidad presenta un gran potencial de cara a reducir los costes de producción e incrementar los rendimientos (t/ha) (Webster, 1995). A pesar de su interés, la disponibilidad de patrones de cítricos enanizantes ha estado muy limitada hasta hace poco tiempo, estando casi exclusivamente restringida a `Flying dragon` (*Poncirus trifoliata* L. Raf. Var. Monstrosa) (Martínez-Cuenca et al., 2016; Donadio et al., 2019; Gonzatto et al., 2022), patrón resistente al virus de la tristeza, a la podredumbre de raíz por *Phytophthora* y a los nematodos de los cítricos. Sin embargo, `Flying dragon` se muestra altamente sensible

a la clorosis férrica sobre suelos alcalinos (Cheng y Roose, 1995), lo que probablemente haya limitado su difusión a amplias áreas de producción de cítricos, como es el caso del Mediterráneo.

Afortunadamente, nuevos patrones de cítricos enanizantes han sido obtenidos por diferentes programas de mejora genética (Gonzatto et al., 2022). Este es el caso del programa de mejora genética por hibridación del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), en el que destacaron dos híbridos por inducir rasgos enanizantes sobre la variedad: Forner-Alcaide nº 418 y Forner-Alcaide nº 517 (Forner-Giner et al., 2014). Estos patrones han sido evaluados frente a c. Carrizo en sistemas de plantación convencional (Legua et al., 2011b; Forner-Giner et al., 2014) sobre una variedad de naranja del grupo Navel, existiendo poca experiencia y muy preliminar sobre su comportamiento agronómico bajo condiciones de súper alta densidad (Arenas-Arenas et al., 2013; Arenas-Arenas et al., 2016).

En esta línea de trabajo, en el **Capítulos II** se evaluó el comportamiento agronómico de Forner-Alcaide nº 418 y Forner-Alcaide nº 517 bajo condiciones de súper alta densidad, identificándose la idoneidad de estos dos patrones para estos sistemas de plantación.

En este trabajo, realizado en una plantación de naranja `Salustiana´ en súper alta densidad con marcos de plantación de 4,0 x 1,5 m, Forner-Alcaide nº 517 y Forner-Alcaide nº 418 indujeron árboles adultos (de 7 años de edad) de tamaño de copa reducido (5,37 y 4,05 m³, respectivamente), similares a los registrados por Forner-Giner et al. (2014) sobre árboles adultos de naranja del grupo Navel en sistema de plantación convencional. Por otro lado, la alta eficiencia productiva registrada en `Salustiana´ sobre estos patrones junto a la mayor densidad de plantación (1.666 árboles/ha) permitió alcanzar rendimientos (57.233 kg/ha con Forner-Alcaide nº 517 y 48.533 kg/ha con Forner-Alcaide nº 418) superiores a los rendimientos medios registrados en plantaciones convencionales de variedades de naranjas del grupo Blancas en Huelva (35.000 kg/ha) (MAPA, 2022).

En cuanto a la calidad de fruta, `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 517 obtuvo frutos de una mayor coloración externa de la corteza (frutos más atractivos) junto a un zumo de mayor calidad organoléptica, con un mayor contenido en azúcares (TSS; °Brix) y ácidos totales (TA; g/100 cc).

El hecho de que Forner-Giner et al (2014) obtuviesen resultados similares entre estos dos patrones en sistema de plantación convencional de naranja Navel, permitiría considerar que las diferencias aquí obtenidas sobre `Salustiana´ fueron impuestas

principalmente por las características inherentes del patrón y no por una diferente adaptación de éstos a las condiciones impuestas de súper alta densidad.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos sobre `Salustiana`, Forner-Alcaide nº 517 se mostró más apropiado para su uso como patrón en plantaciones de súper alta densidad. Este hecho adquiere una mayor fuerza si se tiene en cuenta que Forner-Alcaide nº 517 presenta muy buena respuesta frente a los principales factores bióticos y abióticos limitantes de la Cuenca Mediterránea (Aleza et al., 2020), al contrario que Forner-Alcaide nº 418, patrón que se presenta como muy sensible o sensible a *Phytophthora* y a la clorosis férrica (Martínez-Cuenca et al., 2016).

3. Recolección mecanizada

Actualmente existe un interés por la industria de zumo como una alternativa para la diversificación de la oferta, favorecida por los problemas estructurales de los principales países productores de zumo (azotados por el HLB) y la demanda del mercado europeo por zumos refrigerados de mayor calidad que los zumos concentrados procedentes de latitudes más lejanas. Por otro lado, la recolección manual de los cítricos supone un alto coste de producción, así como un problema en la gestión de la recolección en campañas de mucha cosecha ante la escasez de mano de obra. Ante esta situación, el sector requiere del desarrollo de soluciones dirigidas a la mecanización de la recolección de los cítricos (Arenas-Arenas et al., 2011; Arenas-Arenas et al., 2018), tanto como técnica habitual en plantaciones de cítricos para industria o técnica ocasional para la recolección de la fruta para fresco (recolección de la fruta de destrío o recolección global en campañas con exceso de producción y bajo precio).

Dadas las características estructurales más frecuentes de las explotaciones citrícolas andaluzas (tamaño, orografía y textura de los suelos), las plantaciones de súper alta densidad con recolección mecanizada mediante equipos de recolección `tipo vendimiadora` se presentan como la estrategia más apropiada (Arenas y Hervalejo, 2012; Arenas-Arenas et al., 2020a; 2020b).

En este sentido, en el **Capítulo II** se evaluó la recolección mecanizada con un equipo cabalgante sacudidor de copa (New Holland VX7090), `tipo vendimiadora`, a 1,4 km/h y 400 rpm de sacudida de varas, en la plantación de súper alta densidad de `Salustiana` sobre Forner-Alcaide nº 517 y Forner-Alcaide nº 418. En este trabajo, se evaluó la respuesta e idoneidad de los dos patrones de cítricos a este sistema de recolección, así como el potencial del equipo cabalgante sacudidor de copa en la recolección de plantaciones de cítricos de súper alta densidad.

A pesar de que la eficiencia de derribo de los sistemas de recolección mecanizada en cítricos suele ser inferior al 85 %, incluso tras la aplicación de algún agente favorecedor de la abscisión del fruto (Moreno et al., 2015; Torregrosa et al., 2010), en nuestro trabajo se alcanzó un derribo de los frutos de `Salustiana´ del 92,10 % sobre el patrón Forner-Alcaide nº 517.

La eficiencia de derribo de los frutos de `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 517 fue superior a la registrada sobre Forner-Alcaide nº 418, patrón sobre el que se derribó el 77,7 % de los frutos. Las diferencias registradas entre patrones en las eficiencias de derribo no se correspondieron con las fuerzas de retención del fruto al pedúnculo (FRF) ni con los calibres o pesos de los frutos. Así, Forner-Alcaide nº 517 registró la mayor eficiencia de derribo incluso a pesar de que los frutos de `Salustiana´ sobre este patrón registraron valores de FRF más altos (94,25 Newtons) y calibres ligeramente más bajos (74,14 mm) que los frutos de `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 418 (83,03 Newtons y 76,65 mm). Por el contrario, una posible influencia del patrón sobre la estructura del árbol y la transmisión de la vibración al fruto podría estar implicada en las diferencias observadas en la eficiencia de derribo. No obstante, el hecho de que los frutos de `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 418 mostrasen una mayor presencia en las ramas bajas del árbol, se presenta como una de las causas más probables de la menor eficiencia de derribo registrada sobre este patrón. Así, los resultados de nuestro ensayo mostraron que los frutos localizados en la copa del árbol a menos de 40 cm del suelo no lograron ser derribados por el equipo sacudidor de copa. Estos resultados apoyan lo descrito por Arenas y Hervalejo (2012) y Arenas-Arenas et al. (2011) quienes afirman que el éxito de la recolección mecanizada con diferentes equipos sacudidores de copa requiere, además de una adecuada regulación de los parámetros de trabajo del equipo, de una adecuada formación de los árboles dirigida a la obtención de setos con faldas o ramas bajas elevadas. La eliminación de las ramas bajas de los árboles mejoraría la eficiencia de derribo de los equipos sacudidores de copa sin que ello tuviera que perjudicar la producción ni la calidad de la fruta (Chhetri y Kandel, 2019; Whitney et al., 2003), esperándose una mayor producción en la parte alta de la copa del árbol.

Las diferencias obtenidas en la eficiencia de recolección de fruta, fruta derribada e interceptada por el equipo de recolección, se debieron principalmente a las diferencias existentes en el derribo de los frutos y no en la capacidad del equipo en interceptarlos.

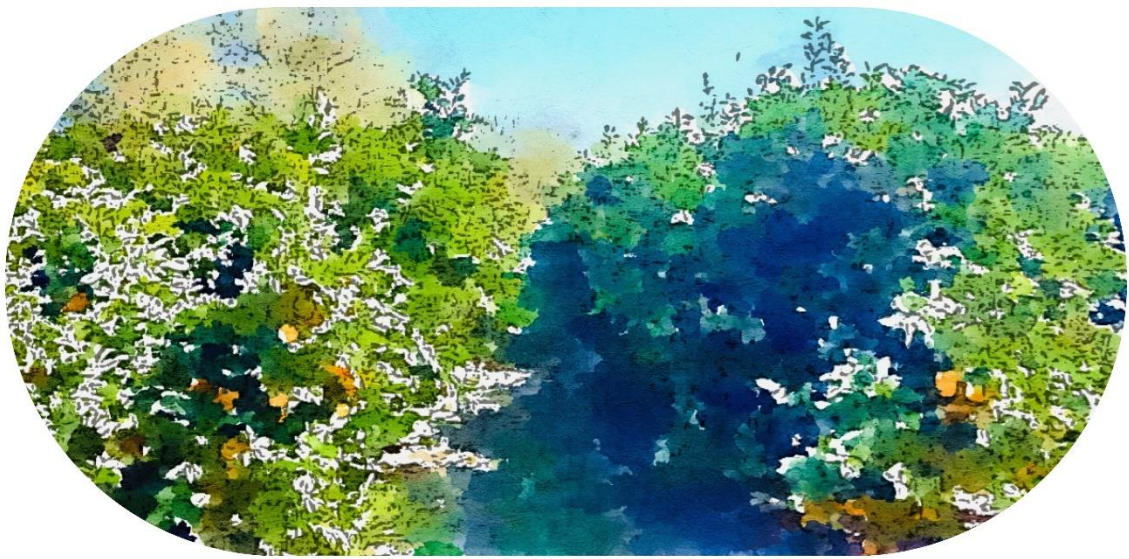
Según se ha obtenido en experiencias anteriores, los sistemas de recolección mecanizada pueden causar daños sobre la estructura de los árboles y la producción, daños tales como defoliación, rotura de ramas, desprendimiento de flores y frutos inmaduros, extracción de raíces y, ocasionalmente, abrasión o desprendimiento parcial de la corteza (Li y Syvertsen,

2004). Así, en nuestro estudio, la acción del equipo sacudidor de copa causó un daño leve (ligera abrasión de la corteza) en los árboles de `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 418 y moderado (rotura de pequeñas ramas) en los árboles de `Salustiana´ sobre Forner-Alcaide nº 517. Otros modelos de equipos sacudidores de copa, incluso trabajando a menor frecuencia, han causado daños más considerables (Peterson, 1998; Savary et al., 2010). En nuestro trabajo, el menor tamaño de árbol de `Salustiana´ inducido por Forner-Acaide nº 418 podría ser motivo del menor daño sufrido por el pase del equipo sacudidor de copa. No obstante, independientemente del patrón empleado, los daños registrados no se consideraron lo suficientemente graves como para condicionar la capacidad productiva de la plantación. Por otro lado, según las recomendaciones realizadas por Arenas-Arenas et al (2018; 2020a; 2020b), los daños habrían sido menores de haberse adaptado previamente los árboles mediante poda mecanizada: formación de setos con faldas altas.

En cuanto a la integridad de los frutos de `Salustina´, casi el 50% de los frutos recolectados por el equipo sacudidor de copa sufrieron podredumbre tras una semana de almacén en condiciones no controladas de temperatura y humedad. Estos resultados desaconsejaron el uso del equipo sacudidor de copa en la recolección de fruta con destino al mercado en fresco, mostrándose adecuado para la recolección de fruta con destino a la industria del zumo, donde los frutos son procesados en un corto plazo de tiempo tras su recolección.

Por otro lado, atendiendo a las características propias del cultivo de los cítricos, rendimientos (t/ha) y características morfológicas de la fruta, se identificaron ciertos aspectos técnicos de los equipos susceptibles de mejoras, tales como los sistemas de captura y descarga de la fruta. Así, tolvas de mayor capacidad y un brazo de descarga lateral hubiesen permitido reducir los tiempos de recolección, mejorando los rendimientos de trabajo. Algunos de los nuevos equipos desarrollados para la recolección de la vid o el olivar ya presentan algunas mejoras al respecto, como es el caso del brazo de descarga lateral continuo sobre camión o remolque. La adaptación de estos equipos a la recolección de los cítricos se presenta también interesante para las empresas que ofrecen estos servicios de recolección, permitiéndoles cerrar o completar la campaña de trabajo de los equipos con la recolección de los cítricos para industria, ya que el periodo de recolección de éstos (diciembre-junio) se complementa muy bien con el del viñedo (julio-octubre) y otros cultivos establecidos en súper alta densidad como el olivar (octubre-noviembre) y el almendro (agosto-septiembre).

En vista de los resultados obtenidos, el equipo sacudidor de copa `tipo vendimiadora´, aunque susceptible de algunas mejoras técnicas, mostró un gran potencial para la recolección en plantaciones de cítricos de súper alta densidad con destino a industria.



CONCLUSIONES

Conclusiones

De los dos capítulos de esta Tesis Doctoral se obtienen las siguientes conclusiones:

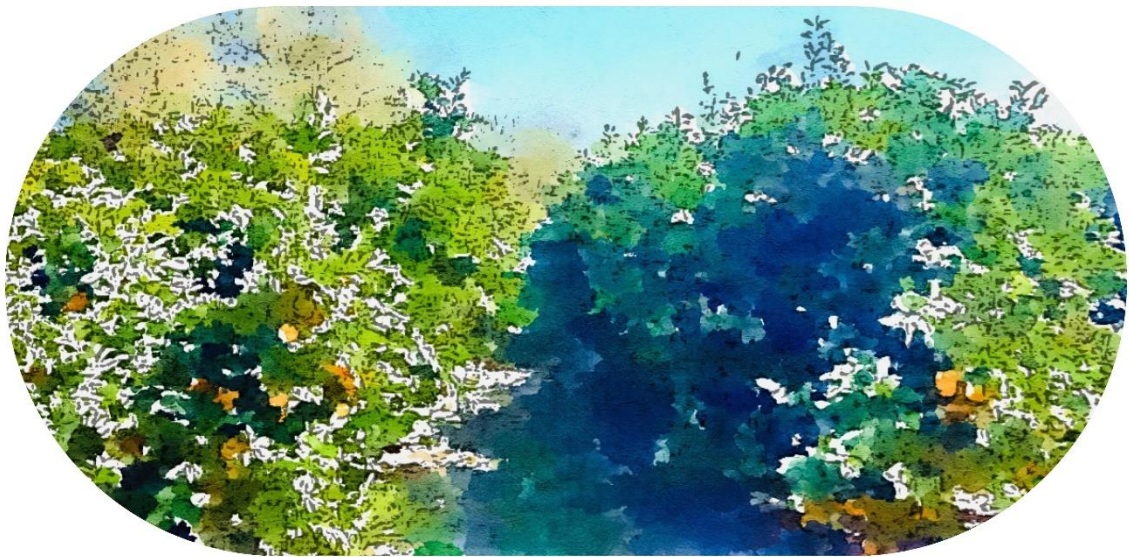
Se han identificado **patrones de cítricos de crecimiento controlado**, sub-estándar, semi-enanizantes y enanizantes, descritos previamente por su mejor aptitud frente a características típicas de los suelos mediterráneos que citrange Carrizo y/o *Citrus macrophylla*, **interesantes para el desarrollo de modelos de sistemas de plantación de diferente grado de intensificación**, más **rentables y sostenibles**, estratégicos para afrontar los retos futuros del sector:

- Para **sistemas de plantación convencional (416 árboles/ha)** de `Lane Late`, **Fornier-Alcaide nº 5** fue el patrón más interesante. Se obtuvieron árboles con una extensión de copa y una producción (kg/árbol) similar a citrange Carrizo y *Citrus macrophylla*, pero con ventajas en la fecha de recolección y calidad general de la fruta.
- El menor porte de árbol junto a la alta eficiencia productiva inducida sobre `Lane Late` revelaron el potencial de Fornier-Alcaide nº 13, Fornier-Alcaide nº 41 y mandarino `Cleopatra` como patrones para **sistemas de plantación de alta densidad (con algo más de 540 árboles/ha)**. Patrones sobre los que se alcanzaron rendimientos (kg/ha) similares o superiores a los de plantaciones convencionales sobre citrange Carrizo. **Fornier-Alcaide nº 13** fue el patrón más interesante, presentando además ventajas en fecha de recolección, calidad general de fruta y eficiencia en el uso de los nutrientes del suelo.
- Los dos **patrones de cítricos enanizantes** estudiados en la **plantación de naranja `Salustiana` en súper alta densidad (1.666 árboles/ha)**, Fornier-Alcaide nº 517 y Fornier-Alcaide nº 418, evidenciaron una buena aptitud para ser usados en este sistema de plantación, registrando volúmenes de copa reducidos y alcanzando rendimientos (kg/ha) superiores a los de las plantaciones convencionales. De los dos patrones, **Fornier-Alcaide nº 517** fue superior por su mayor productividad y coloración externa de la fruta. Además, en otros estudios se ha descrito su excelente adaptación a los principales factores limitantes de los suelos mediterráneos, al contrario que Fornier-Alcaide nº 418, patrón muy sensible a *Phytophthora* y sensible a la clorosis férrica.

En cuanto a la **recolección mecanizada** con el equipo sacudidor de copa cabalgante `tipo vendimiadora` (NEW HOLLAND VX7090 a 1,4 km/h de avance y 400 rpm de sacudida

de varas) se han identificado las siguientes cuestiones interesantes para una plantación de 'Salustiana' en súper alta densidad:

- La importancia de la **adaptación previa de la forma de los árboles**, mediante el empleo de poda mecanizada, **hacia** estructuras en **seto continuo con faldas elevadas**, a fin de reducir el daño del árbol y mejorar la eficiencia de derribo de fruta.
- **Forner-Alcaide nº 517** se comportó mejor que Forner-Alcaide nº 418, ya que la eficiencia de derribo de frutos fue superior al 90% incluso sin la previa adaptación de la forma de los árboles.
- Los daños de podredumbre en fruta registrados tras 7 días de almacén, en condiciones ambiente, **desaconsejan su empleo en plantaciones con destino al mercado para fresco**.
- Aunque susceptible de algunas mejoras técnicas, el equipo de recolección presentó un **gran potencial para la recolección de plantaciones de cítricos de súper alta densidad para industria**.



BIBLIOGRAFÍA DE INTRODUCCIÓN Y DISCUSIÓN GENERAL

Bibliografía

- Albrecht, U., Bowman, K.D., 2011. Tolerance of the trifoliolate citrus hybrid US-897 (*Citrus reticulata* Blanco × *Poncirus trifoliata* L. Raf.) to Huanglongbing. *HortScience* 46, 16-22.
- Aleza, P., del Pino, A., Forner-Giner, M., 2020. Panorama varietal y los nuevos patrones, in: García-Álvarez-Coque, J., Moltó, E. (Eds.), Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española. Cajamar, pp. 151-166.
- Al-Jaleel, A., Zekri, M., Hammam, Y., 2005. Yield, fruit quality, and tree health of 'Allen Eureka' lemon on seven rootstocks in Saudi Arabia. *Sci. Hortic.* 105, 457-465.
- Aparicio-Durán, L., Arjona-López, J.M., Hervalejo, A., Calero-Velázquez, R., Arenas-Arenas, F.J., 2021a. Preliminary findings of new citrus rootstocks potentially tolerant to foot rot caused by *Phytophthora*. *Horticulturae* 7, 389.
- Aparicio-Durán, L., Gmitter, F.G., Arjona-López, J.M., Grosser, J.W., Calero-Velázquez, R., Hervalejo, Á., Arenas-Arenas, F.J., 2021b. Evaluation of three new citrus rootstocks under boron toxicity conditions. *Agronomy* 11, 2490.
- Aparicio-Durán, L., Gmitter Jr., F.G., Arjona-López, J.M., Calero-Velázquez, R., Hervalejo, Á., Arenas-Arenas, F.J., 2021c. Water-stress influences on three new promising HLB-tolerant citrus rootstocks. *Horticulturae* 7, 336.
- Aparicio-Durán, L., Hervalejo, A., Calero-Velázquez, R., Arjona-López, J.M., Arenas-Arenas, F.J., 2021d. Salinity effect on plant physiological and nutritional parameters of new Huanglongbing disease-tolerant citrus rootstocks. *Agronomy* 11, 653.
- Arenas-Arenas, F.J., González-Chimeno, A.B., Romero-Rodríguez, E., Casado, G., Bordas, M., Torrents, J., Hervalejo, A., 2016. Adaptation of two citrus cultivars grafted on Forner Alcaide no. 517 to super high-density system and evaluation of mechanized harvesting. *Citrus Res. Technol.* 37, 122-131.
- Arenas, F.J., Hervalejo, A., 2012. Primeras experiencias del sistema de cultivo superintensivo en cítricos. *Vida Rural* 352, 36-40.
- Arenas-Arenas, F.J., Hervalejo, A., 2021. Los avances tecnológicos de la citricultura española en los últimos veinte años. *Vida Rural* 500, 72-81.
- Arenas-Arenas, F.J., Hervalejo, A., Bordas, M., Torrents, J., 2013. Comportamiento agronómico de dos patrones de cítricos enanizantes en sistema de cultivo superintensivo. *Levante Agrícola* 416, 124-128.

- Arenas-Arenas, F.J., Hervalejo, A., González-Chimeno, A.B., Romero-Rodríguez, E., 2017. Guía sobre el Sistema de Cultivo Superintensivo en Cítricos. SERVIFAPA. <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/8c7891d0-ab2b-4bff-ab77-aaa9b29c78a4>.
- Arenas-Arenas, F.J., Hervalejo, A., Salguero, A., Gómez, A., Blanco-Roldán, G., Castro, S., Gil, J., 2011. Ensayo de recolección mecanizada en cítricos con el equipo sacudidor de copa OXBO 3210 en las variedades `Valencia Late Frost` y `Navelina`. Levante Agrícola 405, 123-133.
- Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Corredera, J., Hervalejo, A., 2018. Recolección mecanizada del cultivo de cítricos, una alternativa de futuro. Vida Rural 446, 26-35.
- Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Hervalejo, A., 2020a. Retos y oportunidades en la producción intensiva de los cítricos, in: Cajamar (Ed.), García-Álvarez-Coque, JM Moltó, E, pp. 201-212.
- Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Hervalejo, A., 2020b. Intensificación del cultivo de los cítricos. Vida Rural 480, 38-42.
- Baier, W.E., 1954. The Pritchett Tongue. Calif. Citrogr. 37, 442.
- Barbé, S., Ruiz-García, A.B., Morán, F., Olmos, A., Vicent, A., Vives, M.C., Marco-Noales, E., 2020. Las enfermedades que nos amenazan. El nuevo desafío de la globalización, in: García-Álvarez-Coque, J., Moltó, E. (Eds.), Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española. Cajamar, pp. 227-243.
- Bassal, M.A., 2009. Growth, yield and fruit quality of `Marisol` clementine grown on four rootstocks in Egypt. Sci. Hortic. 119, 132-137.
- Bitters, W.P., Cole, D.A., McMARTY, C.D., 1979. Facts about dwarf citrus trees. Citrograph 64(3), 54-56.
- Bitters, W.P., 1986. Citrus rootstocks: their characteristics and reactions. Unpubl. manuscript. Univ. California, Riverside.
- Blanco-Roldán, G., Castro, S., Gil, J., Arenas-Arenas, F.J., Hervalejo, A., Salguero, A., Gómez-Cadenas, A., 2011. Sistemas sacudidores de copa para la recolección de cítricos. Vida Rural 330, 28-32.
- Bordas, M., Torrents, J., Arenas, F.J., Hervalejo, A., 2012. High density plantation system of the Spanish citrus industry. Acta Horticulturae, 965: 123-130.

- Borrás, P., 2020. Situación y perspectivas de la comercialización de los cítricos españoles, in: García-Álvarez, J., Moltó-García, E. (Eds.), Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española. Cajamar, pp. 33-52.
- Boughalleb-M'Hamdi, N., Fathallah, A., Benfradj, N., Ben Mahmoud, S., Bel Hadj Ali, A., Medhioub, L., Jaouadi, I., Huber, J., Jeandel, C., loos, R., 2020. First report of citrus black spot disease caused by *Phyllosticta citricarpa* on *Citrus limon* and *C. sinensis* in Tunisia. New Disease Reports 41(8), 2044-0588.
- Bové, J.M., 2006. Huanglongbing: a destructive, newly-emerging, century-old disease of citrus. J. Plant Pathol. 88: 7-37.
- Bowman, K.D., Joubert, J., 2020. Citrus rootstocks, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F. (Eds). The Genus Citrus. Elsevier Inc., pp. 105-127.
- Brown, G.K., 2005. New Mechanical Harvesters for the Florida Citrus Juice Industry. HortTechnology 15(1), 69-72.
- CAGPDS, 2021. Caracterización del sector agrario y pesquero de Andalucía.
- CAGPDS, 2022. Costes. Observatorio de Precios y Mercados. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía. <https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/observatorio/servlet/FrontController?action=List&table=11200&subsector=21&page=1> (fecha de acceso 4.11.22).
- Cambra, M. Moreno, P., 2000. Tristeza, in: Durán-Vila, N., Moreno, P., (Eds.), Enfermedades de los cítricos. Sociedad Española de Fisiopatología, Mundiprensa-Madrid, pp. 77-81.
- Cheng, F.S., Roose, M., 1995. Origin and inheritance of dwarfing by the citrus rootstock *Poncirus trifoliata* 'Flying Dragon'. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 120, 286-291.
- Chhetri, L.B., Kandel, B.P., 2019. Intensive fruit cultivation technology of citrus fruits: high density planting: a brief review. J. Agric. Stud. 7(2), 63-74.
- Chueca, P., Mateu, G., González-González, M., Garcerá, C., Castro, S., Martín-Gorri, B., Torregrosa, A., 2020. La mecanización de los tratamientos fitosanitarios, la poda y la recolección. Presente y futuro., in: Cajamar (Ed.), Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española. García-Álvarez-Coque, JM Moltó-García, E, pp. 177-190.
- Comisión Europea, 2020. Estrategia "De la Granja a la Mesa" Por un sistema alimentario justo, saludable y ecológico.

https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/noticias/2020/Presentacion_Estrategia_de_la_Granja_a_la_mesa.pdf

- Cooper, W.C., 1990. Odyssey of the orange in China: national history of the citrus fruits in China. W.C. Cooper, Winter Prk-Floride.
- Da Silva Rodrigues, M.J., De Araújo Neto, S.E., De Carvalho Andrade Neto, R., Dos Santos Soares Filho, W., Girardi, E.A., Lessa, L.S., De Almeida, U.O., De Araújo, J.M.I., 2019. Agronomic performance of the `Pera` orange grafted onto nine rootstocks under the conditions of Rio Branco, Acre, Brazil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 14(4), 1-8.
- Deng, X., Yang, X., Yamamoto, M., Biswas, M.K., 2020. Domestication and history, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F. (Eds). *The Genus Citrus*. Elsevier Inc., pp. 33-55.
- DGAV, 2022. Atualizacao da zona demarcada para *Trioza erythrae*. Despacho n.º 35/G/2022. Direção-Geral da Alimentação e Veterinária.
- Donadio, L.C., Lederman, I.E., Roberto, S.R., Stucchi, E.S., 2019. Dwarfing-canopy and rootstock cultivars for fruit trees. *Rev. Bras. Frutic.* 41, e-997.
- Dubey, A., Sharma, R.M., 2016. Effect of rootstocks on tree growth, yield, quality and leaf mineral composition of lemon (*Citrus limon* (L.) Burm.). *Sci. Hortic.* 200, 131-136.
- Duran-Vila, N., Bové, J.M., 2013. Huanglongbing es la enfermedad más devastadora de los cítricos. *Levante Agrícola* 419, 340-344.
- EPPO. 2022. Global Database, 2022. <https://gd.eppo.int/> (fecha de acceso 6.9.2022)].
- EUR-Lex Regulation (EU) 2018/785 of 29 May 2018. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018R0785>.
- European Union. 2011. Commission Implementing Regulation (EU) No. 543/2011 of 7 June 2011. Laying down detailed rules for the application of Council Regulation (EC) No 1234/2007 in Rrspect of the fruit and vegetables and processed fruit and vegetables sectors. *Official Journal of the European Union* L157, 1-163.
- FAO, 2011. El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Cómo gestionar los sistemas en peligro. Resumen. Rome.
- FAO, 2017. The future of food and agriculture. Trends and challenges. Rome.
- FAO, ITPS, 2015. Regional assessment of soil changes in Europe and Eurasia, in: Status of the World's Soil Resources-Main Report. Food and Agriculture

- Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, pp. 330-356.
- FAOSTAT, 2023. Datos de cultivos y productos de ganadería. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL> (fecha de acceso 4.2.23).
- Fattahi, J., Hamidoghli, Y., Fotouhi, R., Ghasemnejad, M., Bakhshi, D., 2011. Assessment of fruit quality and antioxidant activity of three citrus species during ripening. *J. Hortic. Biol. Environ.* 2, 113-128.
- Fibla Queralt, J., Forner Giner, M., Pastor Audí, J., Forner Valero, J., 2014. Comportamiento agronómico de la variedad Clemenules en tres portainjertos reductores del volumen de copa (Forner Alcaide 5, Forner Alcaide 13, Forner Alcaide 418) y el citrange Carrizo. *Levante Agrícola* 421, 84-88.
- Filho, F.A.A.M., Espinoza-Núñez, E., Stuchi, E.S., Ortega, E.M.M., 2007. Plant growth, yield, and fruit quality of 'Fallglo' and 'Sunburst' mandarins on four rootstocks. *Sci. Hortic.*, 114(1), 45-49.
- Font de Mora, R., 1954. El naranjo. Su cultivo, explotación y comercio. Ed. Espasa-Calpe S.A. Madrid. España.
- Folimonova, S.Y., Robertson, C.J., Garnsey, S.M., Gowda, S., Dawson, W.O., 2009. Examination of the responses of different genotypes of citrus to huanglongbing (Citrus Greening) under different conditions. *Phytopathology*, 99(12), 1346-1354.
- Forner, J., Alcaide, A., 1993. La mejora genética de patrones de agrios tolerantes a tristeza en España: 20 años de historia (I). *Levante Agrícola* 325, 261-267.
- Forner, J., Alcaide, A., 1994. La mejora genética de patrones de agrios tolerantes a tristeza en España: 20 años de historia (II). *Levante Agrícola* 329, 273-279.
- Forner, J.B., Aparicio, M., Alcaide, A., Giner, J., Pina, J.A., Sala, J., 1982. Present status of citrus rootstocks in Spain, in: *International Society of Citriculture*, Tokyo, Japan, 9-12 November 1981.
- Forner, J., Pina, J., 1992. Plantones tolerantes a tristeza. Veinte años de historia (I) Patrones. *Levante agrícola* 319, 88-92.
- Forner, J.B., Forner-Giner, M.A., Alcaide, A., 2003. Forner-Alcaide 5 and Forner-Alcaide 13: two new citrus rootstocks released in Spain. *HortScience* 38, 629-630.

- Forner-Giner, M.A., Alcaide, A., Primo-Millo, E., Forner, J.B., 2003. Performance of 'Navelina' orange on 14 rootstocks in Northern Valencia (Spain). *Sci. Hortic.* 98, 223-232.
- Forner-Giner, M.A., Forner, J.B., 2009. Nuevos patrones de cítricos resistentes a la salinidad. *Vida Rural* 298, 35-37.
- Forner-Giner, M.A., Legaz, F., Primo-Millo, E., Forner, J.B., 2011. Responses of citrus rootstocks to salinity: performance of the new hybrids Forner-Alcaide 5 and Forner-Alcaide 13. *J. Plant Nutr.* 34 (10), 1437-1452.
- Forner-Giner, M.A., Rodríguez-Gamir, J., Martínez-Alcantara, B., Quiñones, A., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E., Forner, J., 2014. Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418). *Sci. Hortic.* 179, 376-387.
- García-Azcárate, T., Martínez-Gómez, V., 2020. Los acuerdos de la UE con actores emergentes en el sector cítrico internacional, in: García-Álvarez-Coque, J., Moltó-García, E. (Eds.), *Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española*. Cajamar, pp. 297-306.
- Gonzatto, M.P., Griebeler, S.R., Schwarz, S.F. 2022. Dwarfing rootstocks for high-density citrus orchards. *Fruit Industry*. Intechopen.
- Gottwald, T.R., 2010. Current epidemiological understanding of citrus Huanglongbing. *Annu. Re. Phytopathol.* 48, 119-139.
- Hernández-Suárez, E., Suárez-Méndez, L., Parrilla, M., Arjona-López, J.M., Hervalejo, A., Arenas-Arenas, F.J. 2021. Feeding and oviposition behaviour of *Trioza erytreae* (Hemiptera: Triozidae) on different citrus rootstock material available in Europe. *Insects* 12 (7), 623.
- Hervalejo, A., Martínez-Ferri, E., Salguero, A., Arenas-Arenas, F.J., 2010. Growth, yield and fruit quality of 'Clemenules' grown on six rootstocks in the southern region of Spain during 2008/2009 season. 28th Int. Hortic. Congr. (IHC), Lisboa, Port.
- Ibáñez, V., García-Usach, G.A., Carbonell-Caballero, G.J., Alonso, G.R., Terol, G.J., Dopazo, G.J., Talón, G.M., 2015. El origen de las especies cultivadas de cítricos. *Levante agrícola* 426, 74-79.
- Iwasaki, M., Fukamachi, H., Satoh, K., Nesumi, H., Yoshioka, T., 2011. Development of tree vigor prediction method at an early stage based on stem hydraulic conductance of seedlings in citrus rootstocks. *J. Japanese Soc. Hortic. Sci.* 80(4), 390-395.

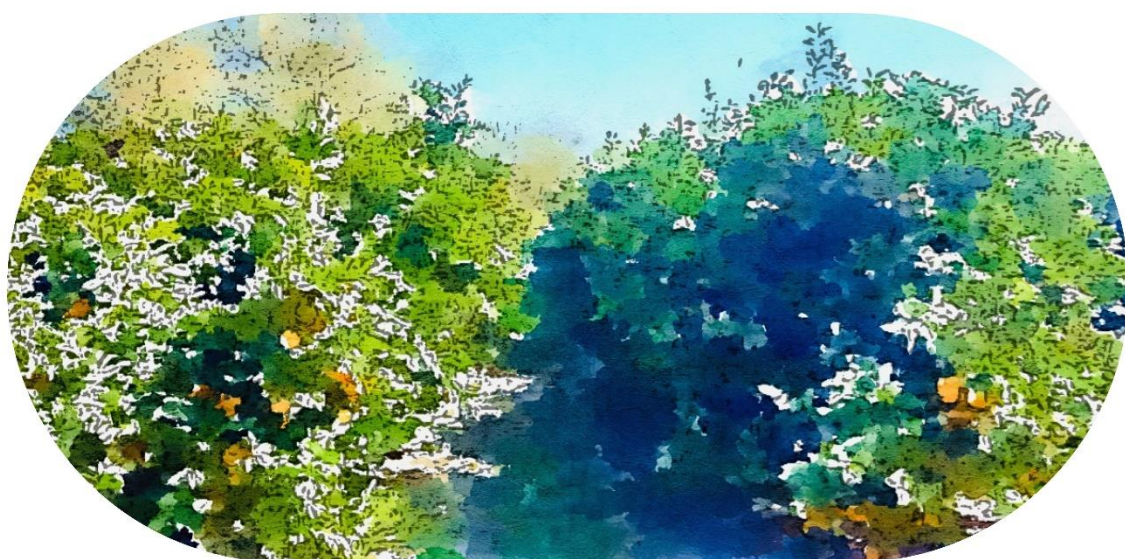
- Jover, S., Martínez-Alcántara, B., Rodríguez-Gamir, J., Legaz, F., Primo-Millo, E., Forner, J., Forner-Giner, M. A., 2012. Influence of rootstocks on photosynthesis in Navel orange leaves: effects on growth, yield, and carbohydrate distribution. *Crop Sci.* 52(2), 836-848.
- Kahn, T., Bier, O., Beaver, R.J., 2007. New late-season navel orange varieties evaluated for quality characteristics. *Calif. Agric.* 61(7), 138-143.
- Ladaniya, M.S., Marathe, R., Das, A., Rao, C.A., Huchche, A., Shirgure, P.S., Murkute, A.A., 2020. High density planting studies in acid lime (*Citrus aurantifolia* Swingle). *Sci. Hortic.* 261, 108935.
- Legua, P., Bellver, R., Forner, J., Forner-Giner, M., 2011a. Plant growth, yield and fruit quality of 'Lane Late' navel orange on four citrus rootstocks. *Span. J. Agric. Res.* 9, 271-279.
- Legua, P., Bellver, R., Forner, J.B., Forner-Giner, M.A., 2011b. Trifoliata hybrids rootstocks for 'Lane Late' navel orange in Spain. *Sci. Hortic.* 68(5), 548-553.
- Legaz, F., Serna, M.D., Ferrer, P., Cebolla, V., Primo-Millo, E., 1995. Análisis de hojas, suelos y aguas de riego para el diagnóstico nutricional de plantaciones de cítricos. Procedimiento de toma de muestras. Generalitat Valenciana - Conselleria de Agricultura, Pesca y Alimentació, Spain.
- Legua, P., Forner, J.B., Hernández, F., Forner-Giner, M.A., 2014. Total phenolics, organics acids, sugars and antioxidant activity of mandarin (*Citrus clementina* Hort. ex Tan.): Variation from rootstock. *Sci. Hortic.* 174, 60-64.
- Li, K.T., Syvertsen, J.P., 2004. Does mechanical harvesting hurt your trees? *Citrus Ind.* 85, 30-33.
- Li, Z., Zhang, R., Xia, S., Wang, L., Liu, C., Zhang, R., Fan, Z., Chen, F., Liu, Y., 2019. Interactions between N, P and K fertilizers affect the environment and the yield and quality of satsumas. *Glob. Ecol. Conserv.* 19, e00663.
- Lim, T.K., 2012. Edible medicinal and non medicinal plants. Springer Netherlands.
- Llanos, M., 1998. Patrones tolerantes a la tristeza de los cítricos (CTV). *Vida Rural* 65, 40-42.
- Lliso, I., Forner, J.B., Talón, M., 2004. The dwarfing mechanism of citrus rootstocks F&A 418 and #23 is related to competition between vegetative and reproductive growth. *Tree Physiol.* 24(2), 225-32.

- MAPA, 2022. Superficies y producciones anuales de cultivos. <https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/superficies-producciones-anuales-cultivos/> (fecha de acceso 4.9.22).
- Martínez-Alcántara, B., Rodríguez-Gamir, J., Martínez-Cuenca, M.R., Iglesias, D.J., Primo-Millo, E., Forner-Giner, M.A., 2013. Relationship between hydraulic conductance and citrus dwarfing by the Flying Dragon rootstock (*Poncirus trifoliata* L. Raft var. monstruosa). *Trees* 27(3), 629-638.
- Martínez-Cuenca, M.R., Primo-Capella, A., Forner-Giner, M.A., 2016. Influence of rootstock on citrus tree growth: effects on photosynthesis and carbohydrate distribution, plant size, yield, fruit quality, and dwarfing genotypes. in: Rigobelo, E.C. (Ed.), *Plant growth* 16, IntechOpen, pp. 107-129.
- Martins, C.R., de Carvalho, H.W.L., Teodoro, A.V., de Barros, I., de Carvalho, L.M., Soares Filho, W.d.S., Passos, O.S., 2020. Performance of the pineapple sweet orange on different rootstocks. *Biosci. J.* 36 (2), 458-472.
- Merino, C., Hervalejo, A., Salguero, A., González, D., Arenas-Arenas, F.J., 2015. Yield and fruit quality of two early maturing orange cultivars, 'Navelina' and 'Fukumoto', in Andalusia, Spain. *Acta Hortic.* 1065, 255-260.
- Morales, J., Bermejo, A., Navarro, P., Forner-Giner, M. Á., Salvador, A., 2021. Rootstock effect on fruit quality, anthocyanins, sugars, hydroxycinnamic acids and flavanones content during the harvest of blood oranges 'Moro' and 'Tarocco Rosso' grown in Spain. *Food Chem.* 342, 128305.
- Moreno, R., Torregrosa, A., Moltó, E., Chueca, P., 2015. Effect of harvesting with a trunk shaker and an abscission chemical on fruit detachment and defoliation of citrus grown under Mediterranean conditions. *Spanish J. Agric. Res.* 13(1), 1-12.
- Newcomb, D.A., 1978. Selection of rootstocks for salinity and disease resistance, in: Grierson, N. (Ed.), *Proceedings of the International Society of Citriculture II*. Orlando, FL, pp. 117-120.
- Ollitrault, P., Curkb, F., Krueger, R., 2020. Citrus taxonomy, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F. (Eds). *The Genus Citrus*. Elsevier Inc., pp. 57-81.
- Ordóñez-Díaz, J.L., Hervalejo, A., Pereira-Caro, G., Muñoz-Redondo, J.M., Romero-Rodríguez, E., Arenas-Arenas, F.J., Moreno-Rojas, J.M., 2020. Effect of rootstock and harvesting period on the bioactive compounds and antioxidant activity of two orange

- cultivars (‘Salustiana’ and ‘Sanguinelli’) widely used in juice industry. *Processes* 8, 1212.
- Pérez-Otero, R., Mansilla, J., del Estal, P., 2015. Detección de la psila africana de los cítricos, *Trioza erytreae* (Del Guercio, 1918) (Hemiptera: Psylloidea: Triozidae), en la Península Ibérica. *Arcq. Entomol.* 13, 119-122.
- Pérez-Pérez, J.G., Quiñones, A., 2020. Nuevos retos para el riego y la fertilización en cítricos, in: García-Álvarez-Coque, J., Moltó, E. (Eds.), *Una Hoja de Ruta Para La Citricultura Española*. Cajamar, pp. 215-225.
- Perez-Zamora, O., 2004. Leaf nutrient concentration, yield, production efficiency, juice quality and nutrimental indexes on Valencia orange grafted on citrus rootstocks. *Agrociencia* 38, 141-154.
- Peterson, D.L., 1998. Mechanical harvester for process oranges. *Appl. Eng. Agric.* 14(5), 455-458.
- Quiñones, A., Martínez-Alcántara, B., Primo-Millo, E., Legaz, F., 2012. Fertigation: Concept and application in citrus, in: *Advances in Citrus Nutrition*. Springer Netherlands, pp. 281-301.
- Ranjha, A.M., Akram, M., Mehdi, S.M., Sadiq, M., Sarfraz, M., Hassan, G., 2002. Nutritional status of citrus orchards in Sahiwal district. *J. Biol. Sci.* 2, 453-458.
- Romero-Rodríguez, E., Hervalejo, A., Arenas-Arenas, F.J., 2013. Efectos del acolchado del suelo con malla negra en cítricos. *Vida Rural* 369, 48-51.
- Roose, M.L., Cole, P.A., Atkin, D., Kupper, R.S., 1989. Yield and tree size of four citrus cultivars on 21 rootstocks in California. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.*, 114(4), 678–684.
- Sanders, K., 2005. Orange harvesting system review. *Biosyst. Eng.* 90, 115-125.
- Savary, S., Ehsani, R., Schueller, J.K., Rajaraman, B.P., 2010. Simulation study of citrus tree canopy motion during harvesting using a canopy shaker. *Trans. ASABE* 53(5), 1373-1381.
- Sharma, R.R., Saxena, S.K., 2004. Rootstocks influence granulation in ‘Kinnow’ mandarin (*Citrus nobilis* x *C. deliciosa*). *Sci. Hortic.* 101, 235-242.
- Siverio, F., Marco-Noales, E., Bertolini, E., Teresani, G.R., Peñalver, J., Mansilla, P., Agúin, O., Pérez-Otero, R., Abelleira, A., Guerra-García, J.A., Hernández-Suárez, E., Cambra, M., López, M.M., 2017. Survey of huanglongbing associated with “*Candidatus*

- Liberibacter” species in Spain: Analyses of citrus plants and Trioza erytraea. *Phytopathol. Mediterr.* 56(1), 98-110.
- Steyn, W.J., 2008. Prevalence and functions of anthocyanins in fruits. In: *Anthocyanins*. Springer, New York, NY., pp. 86-105.
- Swingle, W., Reece, P., 1967. The botany of Citrus and its wild relatives, in: Reuther, W., Webber, H., Batchelor, L. (Eds.), *The Citrus Industry*. University of California Vol. 1, pp. 190-430.
- Sykes, S.R., 1997. Citrus germplasm in Australia with special reference to indigenous members of the sub-family Aurantioideae. *Proc. Citrus Germoplasm Conserv. Work.* Brisbane, Aust. 76-84.
- Talon, M., Wu, G.A., Gmitter, F.G., Rokhsar, D.S., 2020. The origin of citrus, in: Talon, M., Caruso, M., Gmitter, F. (Eds). *The Genus Citrus*. Elsevier Inc., pp. 9-31.
- Torregrosa, A., Porrás, I., Martín, B., 2010. Mechanical harvesting of lemons (cv. Fino) in Spain using abscission agents. *Trans. ASABE* 53(3), 703-708.
- Urbaneja-Bernat, P., Carrillo, D., Jaques, J.A. 2020. Behavior of *Diaphorina citri*: An investigation of the potential risk to the most commonly used citrus rootstock in Europe. *Entomol. Gen.* 40, 79-86.
- USDA-NRCS, 1998. Global desertification vulnerability map | NRCS Soils. https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/use/worldsoils/?cid=nrcs142p2_054003 (fecha de acceso 4.10.22).
- Vlaic, R.A., Socaci, S.A., Mureşan, A.E., Mureşan, C.O., Moldovan, P., Muste, S., Mureşan, V., 2017. Bioactive compounds and volatile profile dynamics during fruit growth of several plums cultivars, *J. Agr. Sci. Tech.* 19, 1565-1576.
- Webber, H., 1967. History and development of the citrus industry, in: Reuther, W., Webber, H., Batchelor, L. (Eds.), *The Citrus Industry*. University of California, Press, Berkeley, pp. 1-37.
- Webster, A.D., 1995. Rootstock and interstock effects on deciduous fruit tree vigour, precocity, and yield productivity. *Crop Hortic. Sci.* 23, 373-382.
- Whitney, J.D., Wheaton, T.A., Castle, W.S., Tucker, D.P.H., 2003. Tree skirting effects on yield and quality of Valencia oranges., in: *Proceedings of the 116th Annual Meeting of the Florida State Horticultural Society*, Orlando, Florida. Lake Alfred (FL); Crane, J.H.,

- Castle, W.S., Locasio, S.J., Hall, W.G., Sargent, S.A. (Eds.). Florida State Horticultural Society. 236-239.
- Wu, G.A., Terol, J., Ibanez, V., López-García, A., Pérez-Román, E., Borredá, C., Domingo, C., Tadeo, F.R., Carbonell-Caballero, J., Alonso, R., Curk, F., Du, D., Ollitrault, P., Roose, M.L., Dopazo, J., Gmitter, F.G., Rokhsar, D.S., Talon, M., 2018. Genomics of the origin and evolution of Citrus. *Nature* 554, 311-316.
- Yilmaz, B., Cimen, B., Incesu, M., Uysal, K.M., Yesiloglu, T., 2018. Rootstock influences on seasonal changes in leaf physiology and fruit quality of Rio Red grapefruit variety. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 16, 4065-4080.
- Zaragoza, S., 1993. Past and present situation of the Spanish citrus industry. Valencia: Conselleria d'Àgricultura i Pesca, D.L.
- Zaragoza, S., 2007. Aproximación a la historia de los cítricos. Origen, dispersión y evolución de su uso y cultivo. Universidad politécnica de Valencia.
- Zaragoza, S., 2016a. El origen geográfico de los cítricos. *Levante agrícola* 434, 257-261.
- Zaragoza, S., 2016b. Los cítricos en Al-Ándalus. Especies y variedades conocidas. *Levante Agrícola* 430, 8-14.
- Zaragoza, S., 2017. Los cítricos en los jardines históricos. *Levante Agrícola* 439, 294-298.
- Zekri, M., Obreza, T.A., 1969. Micronutrient deficiencies in Citrus: iron, zinc, and manganese. EDIS 2003.
- Zhou, J.H., 1990. Exploration on the original region of the citrus plants. *Proc. Int. Citrus Symp.* Guangzhou, China 70-74.



OTRAS APORTACIONES RELACIONADAS CON LA TESIS

Publicaciones en revistas científicas

Hervalejo, A., Cardeñosa, V., Forner-Giner, M-A., Salguero, A., Pradas, I., Moreno, J.M., Arenas-Arenas, F.J., 2015. Preliminary data on influence of six citrus rootstocks on fruit quality of `Lane Late´. *Acta Hort.* 1065 (1), 363-366.

Arenas-Arenas, F.J., González-Chimeno, A.B., Romero-Rodríguez, E., Casado, G., Bordas, M., Torrents, J., Hervalejo, A., 2016. Adaptation of two citrus cultivars grafted on Forner Alcaide nº 517 to super highdensity system and evaluation of mechanized harvesting. *Citrus Res. Technol.* 37(2), 122-131.

Contribuciones a congresos

Arenas, F.J., Casado, G., Romero-Rodríguez, E., González-Chimeno, A.B., Hervalejo, A., 2016. Evaluation of different varieties of citrus in high-density system in the south of Spain. (Poster). International Citrus Congress. Foz do Iguaçu (Brasil).

Bordas, M., Torrents, J., Hervalejo, A., Arenas-Arenas, F.J., 2016. Over-Row mechanization in high-density citrus groves. (Comunicación oral). International Citrus Congress – ICC. Foz Do Iguaçu, (Brazil).

Hervalejo, A., Aparicio, L., Romero-Rodríguez, E., Calero-Velázquez, R., Arenas-Arenas, F.J., 2019. Caracterización de nuevos patrones de cítricos bajo diferentes condiciones edafoclimáticas. (Comunicación Oral). I Jornada de Citricultura, XI Jornada de Fruticultura de la SECH. Sevilla (España).

Hervalejo, A., Romero-Rodríguez, E., Calero-Velázquez, R., Arenas-Arenas, F.J., 2019. Comportamiento agronómico de `Valencia Late´ sobre tres patrones de cítricos de reducido porte en condiciones de súper alta densidad. (Póster). I Jornada de Citricultura, XI Jornada de Fruticultura de la SECH. Sevilla (España).

Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Quinto, J., Aparicio, L., Calero, R., Hervalejo, A., 2019. Respuesta de una plantación joven de cítricos de súper alta densidad a la recolección mecanizada con sistema tipo vendimiadora. (Póster). I Jornada de Citricultura, XI Jornada de Fruticultura de la SECH. Sevilla (España).

Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Hervalejo, A., 2019. Sistema de cultivo súper-intensivo en cítricos. (Comunicación oral). I Jornada de Citricultura, XI Jornada de Fruticultura de la SECH. Sevilla (España).

Capítulos de libros

Arenas-Arenas, F.J., Romero-Rodríguez, E., Hervalejo, A., 2020. Retos y oportunidades en la producción intensiva de los cítricos, in: J.M. García Álvarez-Coque y E. Moltó García (Eds.), Una hoja de ruta para la citricultura española, Cajamar, pp. 201-211