

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO RADICULAR DE PORTAINJERTOS DE
LA SERIE GENEVA EN MANZANO (MALUS DOMESTICA BORKH.) BAJO
CONDICIONES DEL SUR DE URUGUAY**

por

Sebastián ACOSTA LÓPEZ

Emmanuel MIGUEZ PEÑA

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2025

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
“Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra.) Vivian Severino

Codirector/a:

Ing. Agr. (Dra). Mercedes Arias

Tribunal:

Ing. Agr. (Dr.) Gerardo Echeverría

Ing. Agr. (Dr.) Bruno Carra

Fecha:

9 de setiembre de 2025

Estudiante:

Sebastián Acosta López

Emmanuel Miguez Peña

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por estar siempre presentes, brindándonos su cariño, respaldo y fuerzas para seguir adelante en este camino de perseverancia y crecimiento.

Agradecemos al equipo de Fruticultura de INIA Las Brujas y, en particular, a Bruno Carra, por recibirnos con generosidad y por la permanente disposición y colaboración de todo el personal. Su apoyo fue esencial para la realización de este ensayo.

Nuestro más sincero agradecimiento a Vivian Severino, directora de este trabajo final, quien desde el inicio hasta la culminación acompañó con su experiencia, calidez y actitud siempre positiva, contribuyendo de manera decisiva a la realización de este trabajo.

A la Facultad de Agronomía por habernos acercado a esta hermosa profesión.

A nuestras amigas y amigos.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS.....	7
RESUMEN.....	8
SUMMARY	9
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS.....	11
2.1. OBJETIVO GENERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1. PORTAINJERTOS EN EL CULTIVO DEL MANZANO	12
3.2. IMPACTO DEL USO DE PORTAINJERTOS EN LA FRUTICULTURA.....	13
3.3. CRITERIO DE SELECCIÓN DE PORTAINJERTO	13
3.4. TIPOS DE PORTAINJERTOS.....	15
3.5. HISTORIA EVOLUTIVA DE LOS PORTAINJERTOS A NIVEL MUNDIAL ..	16
3.5.1. Portainjertos francos.....	16
3.5.2. Portainjertos clonales	17
3.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS PORTAINJERTOS MÁS IMPORTANTES DE CADA SERIE	19
3.6.1. Serie Mallin (M).....	19
3.6.2. Serie Mallin-Merton (MM)	20
3.6.3. Serie EMLA	20
3.6.4. Pajam® 1 y Pajam® 2.	21
3.6.5. Serie Budagovsky.....	22
3.6.6. Serie Geneva.....	22
3.7. INTRODUCCIÓN DE LOS PORTAINJERTOS GENEVA EN URUGUAY	24
3.7.1. Características de los portainjertos que están siendo evaluados	24
3.8. SISTEMA RADICULAR.....	27
3.8.1. Morfología	27
3.8.2. Crecimiento de raíces.....	28
3.8.3. Factores que afectan el crecimiento de raíces.....	29
3.8.4. Crecimiento de raíces en la estación de crecimiento	31
3.9. DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICULAR DEL MANZANO	32
3.9.1 Patrones generales de distribución vertical: concentración superficial ...	32
3.9.2 Influencia del portainjerto e interacción con el cultivar y la edad del árbol	33
3.9.3. Impacto de las características del suelo y las prácticas de manejo.....	34
3.10. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RAÍCES	34

4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	37
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y UBICACIÓN TEMPORAL	37
4.2.	CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL VEGETAL.....	37
4.3.	DISEÑO EXPERIMENTAL	37
4.4.	TRATAMIENTOS Y MEDICIONES EN EL CULTIVO.....	38
4.5.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	40
5.	RESULTADOS	42
5.1.	LONGITUD DE RAÍCES (mm)	42
5.1.1	Análisis de varianza (ANOVA)	43
5.1.2	Comparación múltiple: Test de Tukey.....	43
5.2	VOLUMEN RADICULAR (mm ³).....	44
5.2.1	Análisis de varianza (ANOVA)	46
5.2.2	Comparación múltiple: Test de Tukey.....	46
5.3	VARIABLE ÁREA RADICULAR (mm ²)	47
5.3.1	Análisis de varianza (ANOVA)	48
5.3.2	Comparación múltiple: Test de Tukey.....	48
5.4	DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES SEGÚN PROFUNDIDADES	49
6.	DISCUSIÓN	53
6.1.	COMPORTAMIENTO DE LOS PORTAINJERTOS SEGUN EL DESAROLLO DEL SISTEMA RADICULAR	53
6.2.	DISTRIBUCCION VERTICAL DE RAICES EN PROFUNDIDAD.....	55
7.	CONCLUSIÓN.....	57
8.	BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.

Tabla 1 Principales diferencias entre portainjertos francos y clonales en manzano ...	16
Tabla 2 Tabla histórica de series de portainjertos clonales.....	19
Tabla 3 Características de los portainjertos de la serie Geneva® y M.9	25
Tabla 4 Características de portainjertos Geneva® según vigor conferido.....	26
Tabla 5 Disposición de los tratamientos de portainjertos en parcelas del sector experimental 'Muro Alto' en INIA	38
Tabla 6 Estadísticos descriptivos de la longitud de raíces por portainjerto	42
Tabla 7 Estadísticos descriptivos del volumen de raíces por portainjerto	45
Tabla 8 Estadísticos descriptivos del área de raíces por portainjerto.....	47

Figura No.

Figura 1 Detalle de la unión entre portainjerto y variedad.....	12
Figura 2 Escala de vigores de diferentes portainjertos de la serie Geneva® y otros .	27
Figura 3 Arquitectura del sistema radicular según el tipo de propagación del portainjerto.....	28
Figura 4 Dinámica estacional del crecimiento relativo de órganos en frutales de hoja caduca.....	32
Figura 5 Principio de observación de raíces a través de tubos de vidrio	36
Figura 6 Ubicación del ensayo en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria en Las Brujas, Canelones.....	37
Figura 7 Flujo de trabajo para la medición de raíces en portainjertos Geneva® con CI 600 y software	40
Figura 8 Distribución individual de la longitud de raíces (mm) para cada portainjerto evaluado.....	43
Figura 9 Comparación de la Longitud de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey.....	44
Figura 10 Distribución individual del volumen de raíces (mm ³) para cada portainjerto evaluado.....	45
Figura 11 Comparación del volumen de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey.....	46
Figura 12 Distribución individual del área total de raíces (mm ²) para cada portainjerto evaluado.....	48
Figura 13 Comparación del área de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey.....	49
Figura 14 Distribución de la longitud, área y volumen de raíces según la profundidad	51
Figura 15 Adaptación de la escala de vigor de portainjertos con los resultados obtenidos en este ensayo	54

RESUMEN

En la fruticultura actual, los sistemas de producción tienden a ser cada vez más intensivos, con mayores densidades de plantación que requieren el acompañamiento de un paquete tecnológico adecuado. Este incluye riego, fertilización y sistemas de conducción específicos, con el objetivo de aumentar la eficiencia productiva y optimizar el uso de mano de obra. Para que estos sistemas, que implican una alta inversión inicial, sean exitosos, resulta fundamental seleccionar correctamente tanto el portainjerto como la variedad, ya que ambos influyen directamente en el vigor del árbol, su productividad, tolerancia a enfermedades y adaptación a las condiciones ambientales.

La serie de portainjertos Geneva® ha ganado reconocimiento internacional por su desempeño agronómico y sanitario, y en Uruguay su adopción se encuentra en crecimiento. En este contexto, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) ha iniciado ensayos para evaluar su comportamiento local. En el presente trabajo se evaluó el crecimiento radicular de seis portainjertos clonales de la serie Geneva® (G.202, G.210, G.214, G.213, G.814 y G.41) bajo las condiciones edafoclimáticas del sur de Uruguay. En un diseño experimental de bloques completos al azar con 18 repeticiones, se midieron tres variables cuantitativas asociadas al desarrollo de raíces: longitud, volumen y área de raíces, mediante el uso de escáner de raíces (CI-600) y el software Root Snap.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre portainjertos en las tres variables evaluadas. Los portainjertos G.202 y G.210 se destacaron por presentar los mayores valores de crecimiento radicular y una baja variabilidad entre repeticiones, mientras que G.213 mostró el menor crecimiento y la mayor variabilidad. En todos los casos, la mayor proporción de raíces se concentró en los primeros 20 cm del perfil de suelo. Estos resultados aportan información clave para la toma de decisiones en la elección de portainjertos, considerando su impacto sobre el vigor del árbol y el sistema de conducción más adecuado, y contribuyen al desarrollo de una fruticultura más eficiente y sostenible.

Palabras clave: Malus domestica, portainjerto, Geneva, sistema radicular

SUMMARY

In modern fruit growing, production systems tend to be increasingly intensive, with higher planting densities that require the support of an appropriate technological package. This includes irrigation, fertilization, and specific training systems, with the aim of increasing production efficiency and optimizing labor use. For these systems, which involve a high initial investment, to be successful, it is essential to correctly select both the rootstock and the variety, as both directly influence the tree's vigor, productivity, disease tolerance, and adaptation to environmental conditions.

The Geneva® rootstock series has gained international recognition for its agronomic and plant health performance, and its adoption is growing in Uruguay. In this context, the National Institute of Agricultural Research (INIA) has initiated trials to evaluate its local performance. This study evaluated the root growth of six clonal rootstocks from the Geneva® series (G.202, G.210, G.214, G.213, G.814, and G.41) under the soil and climate conditions of southern Uruguay. In a randomized complete block experimental design with 18 replicates, three quantitative variables associated with root development were measured: root length, volume, and area, using a root scanner (CI-600) and RootSnap software.

The results showed significant differences between rootstocks in all three variables evaluated. Rootstocks G.202 and G.210 stood out for presenting the highest root growth values and low variability between replicates, while G.213 showed the lowest growth and the greatest variability. In all cases, the highest proportion of roots was concentrated in the first 20 cm of the soil profile. These results provide key information for decision-making in the selection of rootstocks, considering their impact on tree vigor and the most appropriate training system, and contribute to the development of more efficient and sustainable fruit growing.

Keywords: Malus domestica, rootstock, Geneva, root system

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de manzano (*Malus domestica*, Borkh), es el principal frutal de pepita implantado mundialmente, con una superficie total de 4.618.285 hectáreas y una producción de 97 millones de toneladas, siendo China el país de mayor producción a nivel mundial con el 31,56 %, seguido de Estados Unidos y Turquía (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2023).

En Uruguay, la superficie dedicada a cultivos de frutales de hoja caduca alcanza las 3925 hectáreas, de las cuales 1900 corresponden al manzano, lo que representa un 48 % del total. Este cultivo no solo destaca por su extensión, sino también por su peso en la producción, ya que concentra el 62 % del volumen total generado por los frutales de hoja caduca. Otro indicador que refleja la relevancia del manzano en la fruticultura nacional es la cantidad de productores vinculados, ya que, de las 583 empresas registradas en el rubro, 377 trabajan con esta especie (Dirección General de la Granja [DIGEGRA], 2024).

Dentro de las 1900 hectáreas plantadas con manzano, las principales variedades cultivadas se agrupan en distintos grupos. El grupo Red predomina ampliamente con el 63 % de la superficie, seguido por el grupo Pink (15 %), Gala (12 %), Granny (5 %), Fuji (3 %) y un grupo genérico (2 %) (DIGEGRA, 2024).

En la última década, el rubro ha experimentado transformaciones significativas, reflejadas en una reducción del 35 % en el número de productores, lo que ha generado una mayor concentración del volumen de producción. Según Ackermann y Díaz (2022), el 5 % de los productores concentra el 40 % del volumen total producido. Esta tendencia hacia la concentración se ha acompañado de un aumento en el nivel tecnológico de los sistemas de producción, con una disminución en la superficie cultivada, pero un incremento en la cantidad de plantas en producción.

La caída en el número de productores y el aumento de la concentración en pocos productores viene acompañada por la incorporación de innovaciones tecnológicas en el rubro, donde una de las más importantes ha sido el aumento de la densidad de plantación asociada a la adopción de nuevos sistemas de conducción. Este cambio busca maximizar la entrada de luz y la producción de carbohidratos, promoviendo precocidad y mejores rendimientos. Una mayor y más eficiente interceptación y distribución de luz mejoran el color y calidad de la fruta, así como la uniformidad del desarrollo floral. A su vez el aumento en la densidad tiene como objetivo lograr un equilibrio entre el desarrollo vegetativo y reproductivo, de modo que los carbohidratos generados se destinen preferentemente a los frutos, mejorando el índice de cosecha. Esta combinación entre densidad y sistema de conducción, además de los beneficios ya mencionados, permite mecanizar algunas tareas del cultivo, aspecto que debe ser considerado para analizar su impacto en los costos de producción y en el retorno de la inversión (Equipo editorial INTAGRI, s.f.).

Para que esta tecnología de producción funcione y se alcancen los objetivos deseados, es fundamental el manejo del vigor del árbol, lo cual se logra mediante la elección de portainjertos con genética enanizante o semi enanizante. Estos permiten controlar el tamaño final del árbol, reducir el volumen de madera y mejorar la eficiencia productiva. El manzano ha sido la especie de referencia en cuanto al uso de este tipo de patrones, destacándose a nivel global el impacto del M.9 y sus diferentes selecciones desde la década de 1950 hasta la actualidad. A este patrón se sumaron posteriormente otros, desarrollados por la estación de East Malling (Reino Unido), y más recientemente, nuevas selecciones de la serie Geneva, que han ganado protagonismo por su adaptabilidad, eficiencia y resistencia a enfermedades (Iglesias et al., 2022). Estos avances en portainjertos han sido claves para viabilizar los sistemas de alta densidad, permitiendo mejorar el rendimiento, la calidad de fruta y facilitar la mecanización de labores.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el crecimiento de raíces de seis portainjertos clonales de manzano de la serie Geneva (G.41, G.210, G.202, G.214, G.814 y G.213), a partir de escaneos digitales, con el fin de generar información local que permita observar el comportamiento de estos portainjertos en las condiciones edafoclimáticas del Uruguay.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar mediante escaneo y análisis digital el crecimiento radicular (longitud, área y volumen de raíces) de los seis portainjertos de la serie Geneva seleccionados.
- Analizar la distribución de raíces a distintas profundidades evaluando dicha distribución entre los portainjertos de la serie Geneva.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

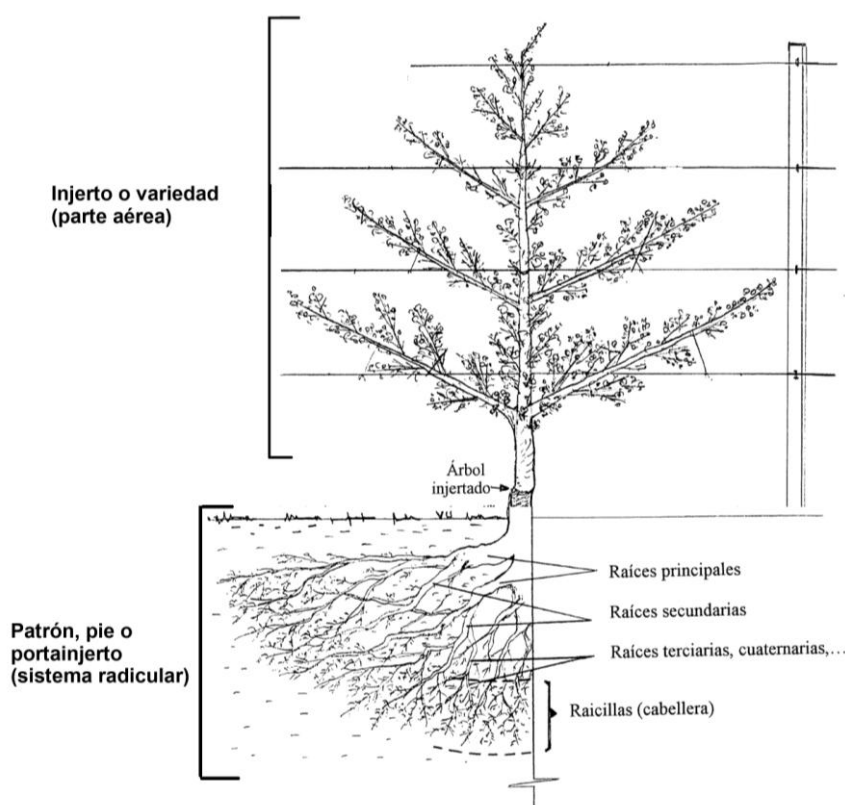
3.1. PORTAINJERTOS EN EL CULTIVO DEL MANZANO

En fruticultura, la utilización de portainjertos en especies como el manzano (*Malus domestica* Borkh.) cumple un rol fundamental en el establecimiento y manejo de los cultivos. A diferencia de la propagación por semilla, que implica un prolongado período de juvenilidad y una alta variabilidad genética en las plantas obtenidas, el uso de portainjertos permite la multiplicación vegetativa de las variedades comerciales, asegurando la uniformidad genética y reduciendo considerablemente el tiempo hasta la entrada en producción. Esta reducción en el período juvenil ha sido uno de los principales motores para el desarrollo de los sistemas de injerto-portainjerto (De Angelis & Calvo, 2018).

Los árboles frutales injertados se componen de dos partes, el portainjerto, que constituye el sistema radicular, y la variedad o cultivar de interés, que conforma la copa del árbol (figura 1). Por lo tanto, se trata de dos individuos genotípicos y fenotípicamente diferentes, cuyas características interactúan entre sí (Agustí, 2022).

Figura 1

Detalle de la unión entre portainjerto y variedad



Nota. Tomado de Urbino Vallejo (2001).

Otra razón por la cual se ha difundido ampliamente el uso de portainjertos es la posibilidad de adaptar los cultivos a distintos tipos de suelos y condiciones ambientales. Un mismo cultivo puede ser implantado en ambientes contrastantes mediante la elección de portainjertos con características específicas, como tolerancia a pH

extremos, tipos de suelo, resistencia a enfermedades, y adaptación a estreses tanto bióticos como abióticos. Esta versatilidad queda reflejada en la investigación presentada por Fazio et al. (2012), donde se estudia el efecto de la enfermedad de replantación en dos tipos de suelo (franco arenoso y franco arcilloso) y el efecto de cinco niveles diferentes de pH del suelo en el crecimiento y la absorción de nutrientes de portainjertos de manzano.

3.2. IMPACTO DEL USO DE PORTAINJERTOS EN LA FRUTICULTURA

El uso de portainjertos ha transformado significativamente la fruticultura, especialmente en el cultivo de manzanas. Uno de los cambios más importantes ha sido el aumento de la densidad de plantas por hectárea, tanto que cincuenta años atrás, las plantaciones tradicionales presentaban densidades de 70 a 100 plantas por hectárea. En la actualidad, los sistemas modernos alcanzan entre 1000 y 6000 plantas por hectárea, incluso hasta 10.000 plantas por hectárea en configuraciones más intensivas. Este cambio ha sido posible gracias al desarrollo de portainjertos de bajo vigor, los cuales no solo permiten un mayor número de plantas por unidad de superficie, sino que también adelantan la entrada en producción del cuadro frutal. Así, en sistemas de alta densidad es común obtener rendimientos moderados ya en el segundo año, producciones importantes en el tercer año y cosechas grandes a partir del quinto o sexto año. En contraste, los sistemas tradicionales iniciaban la producción hacia el sexto o séptimo año, alcanzando la madurez recién alrededor del año quince (Robinson, 2003).

La versatilidad de los portainjertos, que ofrecen diversos niveles de vigor, ha sido fundamental para la adopción de distintas densidades de plantación y sistemas de conducción. Esta combinación estratégica permite no solo aumentar la precocidad y los rendimientos por hectárea, sino también optimizar significativamente el manejo operativo del cuadro frutal. Un estudio a largo plazo, realizado por Reig et al. (2020) durante 12 años, evaluó el rendimiento de manzanos 'Delicious' en diferentes sistemas de alta densidad con portainjertos Geneva® en condiciones climáticas de Nueva York. Los resultados de esta investigación concluyeron que, mediante un manejo adecuado de la densidad de plantación, la elección del portainjerto y el sistema de conducción es posible reducir los costos operativos a largo plazo y lograr un mayor beneficio económico. Si bien la inversión inicial para establecer estos sistemas de alta densidad es considerablemente más alta, la evidencia sugiere que su mayor precocidad y productividad compensan estos costos iniciales, mejorando la rentabilidad y el flujo de caja del productor.

3.3. CRITERIO DE SELECCIÓN DE PORTAINJERTO

Los portainjertos difieren en varias de sus características debido a razones fisiológicas, como su distinta capacidad de absorción de agua y elementos minerales, o su tolerancia frente a condiciones adversas como la salinidad. Además, su comportamiento puede variar significativamente según el ambiente edáfico y climático en que se desarrollan, así como por la presencia de patógenos y otros factores de estrés. Estas diferencias generan un amplio abanico de opciones disponibles, haciendo que la elección del portainjerto adecuado sea una decisión clave en la planificación del monte frutal. Esta elección no solo afecta el comportamiento agronómico del árbol, sino también la producción y calidad del fruto de la variedad de interés (Agustí, 2022).

La elección del portainjerto incide directamente en la productividad, longevidad, sanidad y manejo del árbol frutal. Dado que no existe un portainjerto ideal para todas

las condiciones, su selección debe basarse en múltiples factores agronómicos, fisiológicos y ambientales. Diversos autores coinciden en que los principales criterios a considerar para la selección del portainjerto incluyen el comportamiento en vivero, la compatibilidad con la variedad injertada, la productividad y longevidad, la adaptabilidad a condiciones edáficas y climáticas, la tolerancia a patógenos, la capacidad de trasplante y el control del vigor (Agustí, 2022; Cummins & Aldwinckle, 1995; Goldschmidt, 2014; Marini & Fazio, 2018).

- Compatibilidad injerto–portainjerto

La compatibilidad entre el portainjerto y la variedad injertada es fundamental para garantizar un desarrollo óptimo del árbol, ya que implica la formación de una unión vascular funcional y estable a lo largo del tiempo. Goldschmidt (2014) define la compatibilidad como la capacidad de formar una unión exitosa y funcional entre portainjerto y copa, consolidándose a largo plazo. No obstante, advierte que este proceso puede ser complejo y difícil de predecir, ya que incluso entre especies cercanas pueden producirse casos de incompatibilidad.

- Productividad y longevidad

El portainjerto debe inducir una entrada temprana en producción, generar frutos de buen tamaño y mantener una producción constante a lo largo de los años. Asimismo, es esencial que permita una vida media prolongada del árbol bajo las condiciones del sistema de cultivo, reduciendo la necesidad de intervenciones químicas o culturales excesivas (Cummins & Aldwinckle, 1995).

- Adaptabilidad y tolerancia a estreses y patógenos

La adaptabilidad del portainjerto a distintos tipos de suelo y condiciones climáticas, así como su tolerancia a factores de estrés abiótico —como sequía, encharcamiento, salinidad o suelos con limitaciones físicas— es un criterio fundamental. Además, debe presentar resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades clave, como virus, hongos, bacterias o nematodos, lo cual ha sido un objetivo prioritario en los programas modernos de mejoramiento (Marini & Fazio, 2018).

- Capacidad de trasplante

Un buen portainjerto debe presentar una alta supervivencia tanto en el vivero como durante el establecimiento en el cuadro frutal definitivo. Una baja tasa de mortalidad en la primera hoja permite un establecimiento uniforme y vigoroso del monte frutal. Esto es importante tanto para el viverista como para el productor, ya que garantiza uniformidad y reduce costos de reposición (Agustí, 2022; Cummins & Aldwinckle, 1995).

- Control del vigor

El control del vigor es una de las principales funciones del portainjerto moderno. Al modular el tamaño del árbol, permite ajustar la densidad de plantación, facilitar las labores culturales, reducir los costos de poda y cosecha, y mejorar la eficiencia en el uso de recursos. En combinación con un sistema de conducción adecuado, el uso de portainjertos menos vigorosos puede mantener o incluso aumentar los niveles de producción por hectárea (Agustí, 2022).

- Comportamiento en el vivero

El portainjerto debe ser fácil de propagar y manejar durante la etapa de vivero, aspecto de gran relevancia para el viverista. En el caso de los patrones francos, se busca una alta tasa de germinación, mientras que en los patrones clonales es fundamental una buena capacidad de enraizamiento y desarrollo radicular (Agustí, 2022). Para el productor, sin embargo, esto no suele ser un problema, ya que, si el material representa un buen desempeño en el campo, puede resultar conveniente incluso cuando su costo sea más elevado.

3.4. TIPOS DE PORTAINJERTOS

Los portainjertos se pueden clasificar según su origen, y dependiendo del mismo sus características pueden variar. En primer lugar, se encuentran aquellos que se obtienen a partir de la germinación de semillas que se clasifican como patrones francos, donde la principal característica es que son heterogéneos morfológica y fisiológicamente cuando se utilizan como pie, debido a que se originan de una reproducción sexual, lo que en general da lugar a individuos genéticamente distintos. No obstante, existen algunas excepciones, como especies autóгамas o con embriones nucleares, en las que la variabilidad puede ser baja. En segundo lugar, están aquellos que se reproducen de manera vegetativa, los cuales surgen de la selección de plantas y de programas de mejoramiento (los cuales son más comunes en patrones clonales con respecto a patrones provenientes de semillas), y se denominan patrones clonales (Agustí, 2022). A diferencia de los patrones francos, los patrones clonales son homogéneos a nivel de campo, ya que debido a su reproducción vegetativa son genéticamente iguales.

La forma más habitual de obtención de portainjertos es mediante reproducción vegetativa, como se muestra en la tabla 1, donde se detallan las diferencias mencionadas (De Angelis & Calvo, 2018). Este tipo de portainjerto se utiliza principalmente por criterios como su uniformidad genética, por su control de vigor y por su precocidad. Aunque estos materiales pueden ser portadores de virus y/o hongos, presentando un riesgo para la dispersión de enfermedades. Por ello, es fundamental el uso de material certificado que garantice la sanidad de material vegetal y reduzca la dispersión de enfermedades, asegurando la productividad y la longevidad de los cuadros frutales.

La certificación fitosanitaria de portainjertos de manzana en Uruguay es un proceso exigente que implica el cumplimiento de normativas establecidas por organismos como el Instituto Nacional de Semilla y la Dirección general de Servicios Agrícolas. Con respecto a INASE, regula la producción y comercialización de semillas y plantas de vivero en el país. Establece normas fitosanitarias para la producción de material vegetal certificado y realiza inspecciones periódicas a viveros para garantizar el cumplimiento de estas normas (Instituto Nacional de Semilla [INASE], 2006). En el caso de la DGSA, supervisa y controla la sanidad vegetal en el país. Emite certificados fitosanitarios para la exportación de productos vegetales y realiza inspecciones en viveros para verificar el cumplimiento de las normativas vigentes (Dirección General de Servicios Agrícolas [DGSA], 2023).

Tabla 1*Principales diferencias entre portainjertos francos y clonales en manzano*

Criterio	Francos (semilla)	Clonales (vegetativos)
Variabilidad genética	Alta	Nula
Vigor / Tamaño	Muy vigorosos, grandes y duraderos	Variable: enanizante, semi-enanizante o vigorosos
Precocidad	Entrada tardía (5-8 años)	Muy precoz (2-3 años)
Manejo del cuadro frutal	Árboles altos, menos intensivos	Ideal para densidad alta
Enfermedades (virus/hongos)	No transmiten virus	Riesgo si no son certificados
Fertilidad/ Rendimiento	Buena longevidad	Uniformidad, más productivos

3.5. HISTORIA EVOLUTIVA DE LOS PORTAINJERTOS A NIVEL MUNDIAL

En los inicios de la fruticultura, los portainjertos utilizados en el cultivo del manzano eran predominantemente francos, es decir, obtenidos a partir de semillas. Este tipo de portainjertos presentaban tanto ventajas como también algunas desventajas, que llevaron a que con el avance en el mejoramiento genético a través del tiempo se comenzaron a desarrollar nuevas tecnologías más eficientes y con menor limitantes, como los que son obtenidos a través de la reproducción vegetativa, los portainjertos clonales (Mandl Motta, 1990).

3.5.1. Portainjertos francos

Entre los aspectos negativos de estos portainjertos, se destaca su elevada variabilidad genética, el excesivo vigor que inducen especialmente en variedades del tipo estándar, la entrada tardía en producción, y las dificultades que esto genera en la poda, el manejo sanitario y la cosecha. Este tipo de portainjerto requiere una menor densidad de plantación, y se encuentra asociado a sistemas productivos menos intensivos, lo cual limita la eficiencia del cultivo. Sin embargo, los portainjertos francos también ofrecen ciertos beneficios, como ser libres de virus, presentan un sistema radicular profundo y bien desarrollado que les otorga buen anclaje al suelo y adaptación tanto a condiciones de exceso como de déficit hídrico. Además, desde el punto de vista del viverista, son fáciles y económicos de propagar, lo cual resulta clave en etapas tempranas del desarrollo del sector. Con el avance de la fruticultura y la necesidad de sistemas más eficientes e intensivos, comenzó a ganar terreno el uso de portainjertos clonales. Esto marcó el inicio de una nueva etapa en el cultivo del manzano, en la que el mejoramiento genético tuvo un rol fundamental (Mandl Motta, 1990)

3.5.2. Portainjertos clonales

Con los problemas que traen consigo los portainjertos francos, en distintas regiones del mundo comenzaron a desarrollarse series de portainjertos clonales, con objetivos específicos según las condiciones agroclimáticas y las demandas productivas. El primer paso significativo en este proceso tuvo lugar en Inglaterra, con el desarrollo de la reconocida serie Malling. En 1912, el East Malling Research Station, ubicado en Kent, inició un programa de investigación destinado a recolectar, clasificar y evaluar los distintos portainjertos utilizados en Europa. A diferencia de programas de mejoramiento genético posteriores, la serie Malling no se basó en cruzamientos, sino en la selección clonal de genotipos preexistentes que ya se utilizaban de forma empírica en cuadros de plantación de frutales comerciales. Estos portainjertos se propagan vegetativamente y se les asignó una nomenclatura estandarizada con números romanos (M.1, M.2, M.3, etc.). El portainjerto más destacado de esta serie fue M.9, una selección del tipo Jaune de Metz originario de Francia, que se popularizó a nivel mundial por su capacidad para inducir bajo vigor, alta precocidad y eficiencia productiva. En efecto, gracias a estas características mencionadas la serie Malling permitió desarrollar sistemas de conducción más intensivos y facilitar las labores de manejo y cosecha (Bulatovic-Danilovich, 2023).

Posteriormente, en 1917, el John Innes Institute de Merton se unió al East Malling Research Station con el objetivo de desarrollar portainjertos que, además del control de vigor, presentaran resistencia al pulgón lanígero (*Eriosoma lanigerum*), una plaga que afecta gravemente la producción en varios países. Para ello, realizaron cruzamientos entre selecciones Malling y el manzano silvestre 'Northern Spy', conocido por su resistencia a esta plaga. Así surgió la serie Malling-Merton (MM), que combinaba características agronómicas deseables con resistencia genética. Ejemplos relevantes de esta serie son MM.106 y MM.111, ampliamente utilizados en plantaciones de mediano y alto vigor (Crassweller & Schupp, 2023).

Luego en la década de 1960 se desarrolló la Serie EMLA (East Malling–Long Ashton) en el Reino Unido, específicamente en la East Malling Research Station en colaboración con la Long Ashton Research Station. El objetivo principal fue obtener versiones libres de virus de los portainjertos ya existentes de la serie Malling y Malling-Merton, mejorando así la sanidad vegetal y la uniformidad en vivero y en campo (*Apple rootstocks*, 2022).

Durante las décadas de 1970 y 1980 se desarrolló la serie Budagovsky por investigadores de la Universidad Agraria de Michurinsk, en la Unión Soviética, con el objetivo de generar portainjertos con una mayor resistencia al frío. Estos materiales, caracterizados por presentar hojas rojizas, fueron resultado de cruzamientos que priorizaron la rusticidad y la adaptabilidad a climas adversos. Dentro de esta serie, los portainjertos más conocidos son B.9, B.10 y B.118, ordenados de menor a mayor vigor (Claffey & Farcuh, 2022).

Para la década de 1980 en Francia se desarrollan los clones Pajam® 1 y Pajam® 2 como selecciones del portainjerto M.9, con el objetivo de mejorar su productividad y sistema radicular. A partir de 1990, comenzaron a ser evaluados en Europa Central y del Este, mostrando un vigor ligeramente superior al M.9 estándar, así como un buen desempeño en términos de rendimiento y eficiencia productiva (Kosina, 2002).

A partir de 1994 comenzaron a liberarse los primeros portainjertos bajo la denominación Geneva®, destacando clones como G.30, G.11, G.16 y posteriormente G.202. Estos materiales han sido adoptados progresivamente por viveristas y productores, no solo por su sanidad y vigor controlado, sino también por su potencial para reemplazar a los tradicionales M.9 y M.26 en zonas donde la presión de enfermedades o las condiciones edáficas limitan su desempeño (Robinson et al., 2003). Este ambicioso programa de mejoramiento genético de portainjertos de manzana se inició en la década de los 60s en Estados Unidos, más precisamente en el año 1968 en la Universidad de Cornell, en colaboración con el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA-ARS). El objetivo principal fue desarrollar nuevos portainjertos que combinen características agronómicas deseables con una alta resistencia a enfermedades que afectan severamente la producción en la región noreste de América del Norte, particularmente el fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) y la pudrición de la corona (*Phytophthora spp.*). A lo largo de más de tres décadas de trabajo, el programa logró generar una amplia colección de híbridos a partir de cruzamientos dirigidos entre genotipos resistentes y portainjertos comerciales como M.9, Robusta 5 y Ottawa 3. Durante los años 90 se intensificaron los ensayos a campo en cuadros de frutales comerciales y estaciones experimentales, permitiendo identificar combinaciones con alto rendimiento, precocidad, eficiencia productiva y buena adaptación a distintos tipos de suelo (Fazio et al., 2015).

A continuación, en la Tabla 2 se presenta un resumen cronológico de las principales series de portainjertos clonales.

Tabla 2*Tabla histórica de series de portainjertos clonales*

Año	País	Series	Clones	Caract. principales	Fuente
1912	Inglaterra	Malling	M.1 – M.9	Selección clonal. M.9: bajo vigor, alta eficiencia	Bulatovic-Danilovich (2023)
1917	Inglaterra	Malling-Merton (MM)	MM.106, MM.111.	Resistencia al pulgón lanígero	Crassweller y Schupp (2023)
1960s	Inglaterra	EMLA	M.9 EMLA, M.26 EMLA, etc.	Material libre de virus. Mejora en sanidad vegetal y uniformidad	<i>Apple rootstocks</i> (2022)
1970–80s	URSS	Budagovsky (B.)	B.9, B.10, B.118.	Resistencia al frío	Claffey y Farcuh (2022)
1980s	Francia	Pajam®	Pajam 1 y 2	Selecciones de M.9. Mejoran sistema radicular y rendimiento	Kosina (2002)
1968–1994	EE. UU. (NY)	Geneva®	G.11, G.16, etc.	Resistencia a enfermedades, vigor controlado, sanidad	Robinson et al. (2003) Fazio et al. (2015)

3.6. CARACTERÍSTICAS DE LOS PORTAINJERTOS MÁS IMPORTANTES DE CADA SERIE

3.6.1. Serie Malling (M)

M.9 Es un portainjerto enanizante (30–50 % del pie franco), precoz y muy utilizado en alta densidad. Frutos de buena calidad. Presenta un sistema radicular débil. Requiere suelos fértiles y entutorado permanente.

- Sensible al estrés hídrico.
- Resistente a la podredumbre del cuello.
- Moderadamente sensible al pulgón lanígero.
- Origen: ‘Jaune de Metz’, Francia, 1828 (Mandl Motta, 1990).

M.7 Se clasifica como de vigor intermedio a alto (60–75 % del pie franco), con raíces profundas y buena adaptación a suelos. Emite rebrotes y requiere entutorado.

- Tolerante a asfixia radicular.
- Sensible al pulgón lanígero.
- Origen: 'Doucín Vert', East Malling, 1913 (Mandl Motta, 1990).

M.26 Es de vigor intermedio (50 % del pie franco), siendo más vigoroso que M.9. Precocidad y buena calidad de fruta.

- Requiere suelos bien drenados.
- Susceptible a podredumbre del cuello y fuego bacteriano.
- Origen: M.9 × M.16, 1929 (Mandl Motta, 1990).

3.6.2. Serie Malling-Merton (MM)

MM.106 Presenta vigor intermedio a alto (60–75 % del pie franco), precoz y productivo, con buen anclaje y sin necesidad de entutorado. No emite chupones y se adapta a suelos bien drenados.

- Muy susceptible a *Phytophthora* spp.
- Tolerante a *Armillaria* spp. y al pulgón lanígero.
- Moderada tolerancia al fuego bacteriano.
- Entrada tardía en dormancia (riesgo en zonas frías).
- Origen: M.1 × Northern Spy, 1952 (Bulatovic-Danilovich, 2023).

MM.111 Es de vigor alto (80–90 % del pie franco), autoportante y de excelente anclaje. Buena adaptación a suelos, incluso livianos, pero no tolera suelos mal drenados.

- Alta tolerancia a *Armillaria* spp.
- Moderada tolerancia al fuego bacteriano.
- Baja precocidad (6–7 años para plena producción).
- Origen: M.2 × Northern Spy, 1952 (Bulatovic-Danilovich, 2023).

3.6.3. Serie EMLA

M.7 EMLA. Es un portainjerto que se clasifica como de vigor semi enanizante (60 % del tamaño estándar). Es la versión libre de virus del M.7, siendo un 20 a 30 % más vigorosa. Raíces superficiales, requiere entutorado.

- Buen desarrollo radicular.
- Origen: East Malling (UK) + EMLA.

M.26 EMLA. Presenta vigor semi enanizante (40–50 %), compacto, precoz y muy productivo. Compatible con muchas variedades, aunque puede tener incompatibilidades parciales.

- Muy susceptible al fuego bacteriano y *Phytophthora* spp.
- Origen: MM.106 × M.9, libre de virus (Bulatovic-Danilovich, 2023).

M.9 EMLA. Es de vigor enanizante (35–45 %), precoz, muy productivo y con frutos de buen tamaño. Adelanta la maduración del fruto.

- Susceptible al fuego bacteriano.
- Buena tolerancia a *Phytophthora spp.* y *Armillaria spp.*
- Sistema radicular débil, necesita entutorado.
- Ideal para alta densidad.
- Origen: selección libre de virus del M.9 (Bulatovic-Danilovich, 2023).

MM.111 EMLA. Presenta vigor alto (80–90 %), autoportante, sin necesidad de entutorado. Alta compatibilidad varietal.

- No es precoz (6–7 años a plena producción).
- Buena opción para suelos livianos.
- Origen: versión libre de virus de MM.111 (Bulatovic-Danilovich, 2023).

EMLA 106. Tiene un comportamiento similar al portainjerto MM.106 pero con mayor vigor.

- Alta susceptibilidad a *Phytophthora spp.*
- Origen: Inglaterra, libre de virus (Mandl Motta, 1990).

3.6.4. Pajam® 1 y Pajam® 2.

Los portainjertos Pajam® 1 y Pajam® 2 son selecciones clonales del conocido portainjerto M.9, desarrolladas en Francia con el objetivo de mejorar ciertas características agronómicas. Ambos han sido objeto de diversos estudios que evalúan su desempeño en comparación con otros portainjertos.

Pajam® 1 (Lancep).

- Este portainjerto induce un vigor similar al M.9 estándar, resultando en árboles de vigor enanizante, además presenta buena productividad en ensayos comparativos.
- Como aspecto negativo puede producir una cantidad considerable de brotes basales, lo que puede requerir manejo adicional (L. Cordas, comunicación personal, 2024).

Pajam® 2 (Cepiland).

- Este induce un vigor ligeramente superior al M.9 estándar, aproximadamente un 10% más vigoroso, lo que resulta en árboles de vigor enanizante a semi enanizante.
- Presenta buena productividad y eficiencia en la producción de frutas y presenta al igual que Pajam 1, brotes basales como aspecto negativo (L. Cordas, comunicación personal, 2024).

3.6.5. Serie Budagovsky

B.9. Presenta vigor enanizante (25 a 35 % menor que M.9), es una alternativa al M.9 en climas fríos. Requiere sistemas de sostén.

- Entrada en producción temprana.
- Alta productividad.
- Buena resistencia al fuego bacteriano con la edad (Farcuh, 2022).

B.10. Es de vigor enanizante, similar a M.9. Es una buena opción en condiciones climáticas adversas.

- Buen anclaje por sistema radicular robusto.
- Buena tolerancia al frío y al estrés ambiental.
- Alta productividad (Farcuh, 2022).

B.118. Se clasifica como de vigor alto. Es apto para suelos secos y arenosos, con buena adaptabilidad.

- Tiene una excelente resistencia al frío invernal.
- No tolera la replantación.
- Puede reducir producción y tamaño de fruta algunos años (Dininny, 2018).

3.6.6. Serie Geneva

Los genotipos mencionados con mayor frecuencia en la literatura científica de la serie de portainjertos Geneva® son: G.41, G.935, G.11, G.202 y G.210 (Fazio et al., 2013; Lawrence et al., 2025; Reig et al., 2020; Rufato et al., 2022). Estos portainjertos han sido ampliamente estudiados por sus atributos agronómicos, tales como el vigor, la eficiencia productiva y su resistencia a enfermedades clave como el fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) y la pudrición de la corona (*Phytophthora spp.*).

En términos sanitarios, los portainjertos seleccionados de la serie Geneva® presentan una notable resistencia frente a enfermedades críticas del manzano. Todos los genotipos analizados (G.41, G.935, G.11, G.202 y G.210) han mostrado resistencia o alta resistencia al fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) y en su mayoría, buena tolerancia a la pudrición de la corona causada por *Phytophthora spp.* (Crassweller & Schupp, 2023; Bulatovic-Danilovich, 2023; Fazio et al., 2013). La resistencia al pulgón lanígero varía entre genotipos: G.41, G.202 y 210 la presentan claramente, mientras que G.935 y G.11 no son resistentes (Fazio et al., 2013). Por otro lado, la enfermedad de replantación sólo ha sido reportada como tolerada por G.41. Estas características convierten a los portainjertos Geneva® en opciones estratégicas para zonas con alta presión sanitaria.

Geneva® 41 (Fazio et al., 2013)

- **Origen y vigor:** Es un portainjerto de vigor bajo, similar a M.9, Nic29 o Pajam 2.
- **Productividad y precocidad:** Tiene alta precocidad y eficiencia productiva. Reduce la vecería en cultivares como 'Honeycrisp'.

- **Arquitectura:** Induce ángulos amplios de ramificación facilitando el manejo.
- **Potencial o uso recomendado:** Es recomendado para plantaciones intensivas con cultivares propensos a vecería.
- **Geneva® 935** (Crassweller & Schupp, 2023; Fazio et al., 2013).
- **Origen y vigor:** Cruce entre Ottawa 3 y Robusta 5. Vigor intermedio, mayor que M.26; en algunos ensayos similar a M.9 (Fazio et al., 2013).
- **Productividad y precocidad:** Alta precocidad y eficiencia comparable o levemente superior a M.9 (Fazio et al., 2013).
- **Arquitectura:** Forma árboles con ángulos de ramificación amplios y equilibrados (Crassweller & Schupp, 2023).
- **Potencial o uso recomendado:** Alternativa productiva a M.9 en sistemas de alta densidad (Crassweller & Schupp, 2023).

Geneva® 11 (Bulatovic-Danilovich, 2023; Fazio et al., 2013).

- **Origen y vigor:** Se clasifica de vigor intermedio, superior a G.16 y G.41; similar a M.26 (45–50 % del tamaño estándar) (Bulatovic-Danilovich, 2023).
- **Productividad y precocidad:** Muy precoz y altamente eficiente; reduce la bienalidad en ‘Honeycrisp’ (Fazio et al., 2013).
- **Arquitectura:** Crecimiento equilibrado, adaptable a sistemas conducidos con soporte.
- **Potencial o uso recomendado:** Buen reemplazo de M.9 o M.26 en regiones con alta presión de enfermedades.

Geneva® 202 (Robinson et al., 2003).

- **Origen y vigor:** Cruce entre Malling 27 × Robusta 5 (1975). Tamaño similar a M.26 (Fazio et al., 2013).
- **Productividad y precocidad:** En Nueva York, similar comportamiento a M.26; en Nueva Zelanda, mucho más productivo.
- **Arquitectura:** Produce plantas bien conformadas en vivero y se adapta a diversos marcos de plantación.
- **Potencial o uso recomendado:** Es una alternativa a M.9 y M.26 en regiones con presencia de pulgón lanígero.

Geneva® 210 (Crassweller & Schupp, 2023).

- **Origen y vigor:** Cruce entre Ottawa 3 y Robusta 5. Tamaño intermedio, similar a M.7.
- **Productividad y precocidad:** Es más precoz y productivo que el portainjerto M.7.
- **Arquitectura:** Árboles de mayor tamaño, adecuados para sistemas menos intensivos.
- **Potencial o uso recomendado:** Se considera una buena opción entre portainjertos semi vigorosos para sistemas con menor densidad de plantación.

3.7. INTRODUCCIÓN DE LOS PORTAINJERTOS GENEVA EN URUGUAY

A principios de la década de 1990, el programa de mejoramiento de portainjertos del Cornell-Geneva (CG) comenzó a distribuir algunas de sus selecciones más prometedoras a investigadores internacionales, incluyendo instituciones de países como Francia, Italia, Sudáfrica, Brasil, Nueva Zelanda y Australia. En estos países, se establecieron ensayos en campo con distintos portainjertos de la serie Geneva, evaluando su desempeño bajo diversas condiciones agroclimáticas. Esta proyección internacional marcó el inicio de la validación global de varios materiales de la serie Geneva, consolidando a algunos de ellos como referentes por su equilibrio entre productividad, resistencia a enfermedades como el fuego bacteriano y el complejo de pudriciones de raíz, y adaptabilidad a distintos sistemas de manejo (Robinson et al., 2003).

Varios portainjertos de la serie Geneva® se están utilizando en diferentes regiones productoras de manzana a nivel mundial. Entre los más destacados se encuentran el Geneva® 41 en Estados Unidos, el Geneva® 202 en Nueva Zelanda y el Geneva® 213 en Brasil.

En 2001, el INIA firmó un acuerdo de colaboración con la Universidad de Cornell (EE. UU.) para la evaluación de estos portainjertos en Uruguay, introduciendo los materiales Geneva® 16, 41 y 935. De estos, fueron evaluados principalmente el Geneva® 41 y el Geneva® 16. Posteriormente, en 2017, se incorporaron los portainjertos Geneva® 202, 210, 213, 214 y 814 al país. A partir de 2019, comenzó una nueva fase de evaluación de estos portainjertos en campo, bajo distintos cultivares y sistemas de conducción, con el objetivo de analizar la interacción genotipo-ambiente en diversas zonas del país y seguir seleccionando combinaciones de cultivar y portainjerto que mejoren la sustentabilidad y la rentabilidad del cultivo de manzanas. Actualmente, los portainjertos Geneva® más disponibles a nivel comercial en Uruguay son el G.41, G.202 y G.21 (Cabrera & Rodríguez, 2020).

3.7.1. Características de los portainjertos que están siendo evaluados

Los portainjertos que actualmente están siendo evaluados en Uruguay pertenecen a la serie Geneva®, y presentan una serie de características agronómicas que los diferencian del tradicional M.9. Entre los aspectos más relevantes se destacan su resistencia al fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*) y al pulgón lanígero (*Eriosoma lanigerum*), la ausencia en la formación de burrknot, lo cual contribuye a un desarrollo

radicular más limpio y sano (Dini et al., 2023). Estas características se resumen en la tabla 3.

Tabla 3

Características de los portainjertos de la serie Geneva® y M.9

Característica	Serie Geneva®	M.9
Alta productividad	SI	SI
Resistencia a pulgón lanígero (<i>Eriosoma lanigerum</i>)	SI	No
Resistencia a la podredumbre del cuello (<i>Phytophthora spp.</i>)	SI	SI
Resistencia a fuego bacteriano (<i>Erwinia amylovora</i>)	SI	No
Emisión de rebrotes	No	SI
Emisión de burrknot	No	SI
Apto para replante	SI	No
Capacidad de anclaje	Baja	Baja
Facilidad de propagación	Media	Alta

Nota. Tomado de Cabrera y Rodríguez (2020).

La influencia en el vigor que confieren los portainjertos de la serie Geneva a la variedad injertada varía significativamente, lo que permite su adaptación a distintos sistemas de conducción y condiciones de sitio. Dentro del grupo evaluado, el portainjerto G.210 es el más vigoroso, presentando un comportamiento similar al M.7. En el otro extremo, el G.41 se comporta como uno de los portainjertos menos vigorosos, comparable al M.9 T337, lo que resulta adecuado para sistemas de alta densidad y manejo intensivo, como se muestra en la tabla 4. Estas diferencias en vigor, sumadas a sus características agronómicas, son determinantes al momento de seleccionar el portainjerto más adecuado según el sistema productivo (Iglesias et al., 2022). La figura 2 presenta de forma visual la escala de vigor y tamaño relativa entre los portainjertos evaluados.

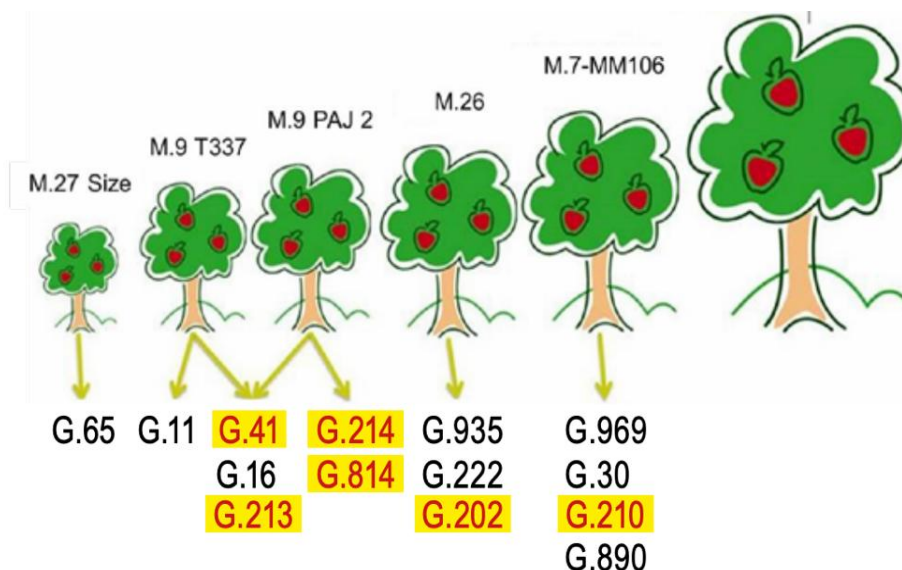
Tabla 4*Características de portainjertos Geneva® según vigor conferido*

Ordenados de menor a mayor vigor	G.41	G.213	G.214	G.814	G.202	G.210
PI con características similares	M.9 T337	M.9 T337	M.9/M.26	M.9/M.26	M.26	M.7
Resistencia a pulgón lanígero	Resistente	Resistente	Resistente	Susceptible	Resistente	Resistente
Resistencia a fuego bacteriano	Muy resistente	Muy resistente	Muy resistente	Muy resistente	Muy resistente	Muy resistente
Aptitud para replante	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto	Apto
Tolerancia a <i>Phytophthora</i> spp.	Tolerante	Tolerante	Tolerante	Tolerante	Tolerante	Tolerante
Emisión de rebrotes	No	No	No	Pocos	No	No/pocos
Formación de Burrknot	No	No	No	No	No	No
Susceptibilidad a virus latentes	No	No	No	Sí /?	No	No

Nota. Adaptado de Iglesias et al. (2022).

Figura 2

Escala de vigores de diferentes portainjertos de la serie Geneva® y otros



Nota. Tomado de Cabrera y Rodríguez (2020, adaptación de Robinson et al., 2003).

3.8. SISTEMA RADICULAR

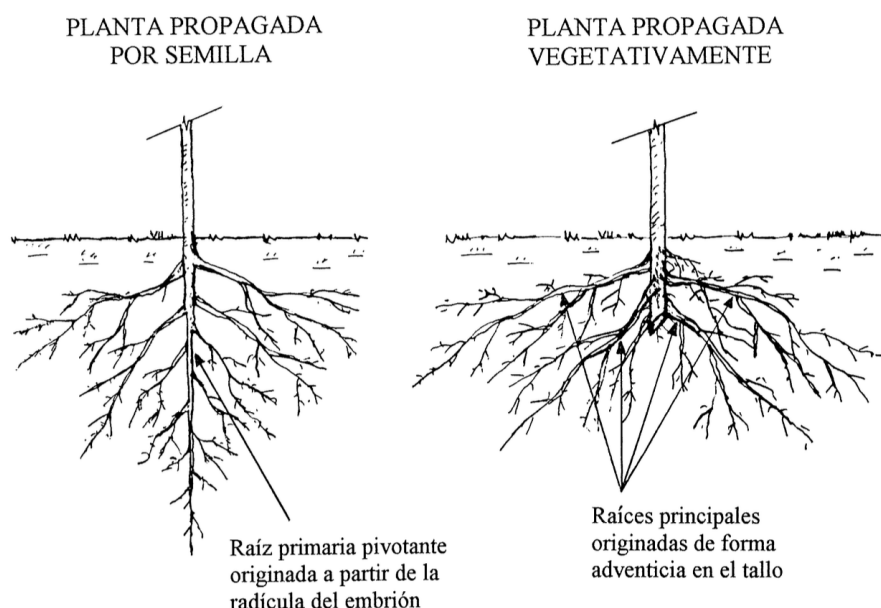
El sistema radicular constituye la porción subterránea del árbol frutal y desempeña múltiples funciones esenciales para la supervivencia y el desarrollo de la planta. Entre ellas se destacan la absorción de agua y nutrientes minerales desde el suelo, la síntesis de compuestos orgánicos como aminoácidos, proteínas y hormonas vegetales, el almacenamiento de reservas, la respiración y el anclaje físico de la planta al sustrato (Viale et al., 2016).

3.8.1. Morfología

La morfología del sistema radicular puede variar sustancialmente según el método de propagación del portainjerto. En plantas originadas a partir de semilla, el sistema radicular presenta una raíz principal pivotante que se desarrolla verticalmente desde la radícula embrionaria, de la cual surgen raíces laterales (secundarias, terciarias, etc.) que conforman una estructura profunda y jerarquizada. En contraste, los portainjertos propagados vegetativamente por estacas, acodos u otros métodos agámicos desarrollan un sistema radicular fasciculado, compuesto por múltiples raíces adventicias que emergen desde los tejidos del tallo (Viale et al., 2016). Estas raíces principales tienden a distribuirse de forma más homogénea en grosor y profundidad, sin una raíz dominante, generando una arquitectura distinta desde su origen, como se observa en la figura 3.

Figura 3

Arquitectura del sistema radicular según el tipo de propagación del portainjerto



Nota. Tomado de Urbino Vallejo (2001).

Dentro del sistema radicular se identifican algunos tipos de raíces con funciones diferenciadas. En primer lugar, se encuentran las raíces de anclaje al suelo, que contribuyen a la estabilidad mecánica del árbol. Por otro lado, están las raíces absorbentes, que se ubican en las regiones más jóvenes de las raíces y representan entre el 80-85% del sistema radicular, estas tienen una vida media corta de apenas pocos meses, pero una actividad fisiológica muy elevada. Este tipo de raíces son las principales responsables de la absorción y transporte de agua y nutrientes por la presencia de pelos absorbentes, lo que aumenta de manera considerada la superficie de absorción. Luego se encuentran las raíces conductoras o de sostén, de mayor longevidad, que cumplen funciones de transporte y soporte estructural. Estas últimas constituyen aproximadamente el 15% del sistema radicular y permiten la conexión entre la parte aérea y las zonas activas de absorción (Agustí, 2022).

3.8.2. Crecimiento de raíces

El crecimiento de las raíces y de la parte aérea en los frutales está regulado por la disponibilidad y distribución de recursos vitales como el agua, nutrientes y carbohidratos, además también por mecanismos hormonales. Las raíces absorben agua y nutrientes del suelo, elementos esenciales para sostener la fotosíntesis y el desarrollo de hojas y frutos (Agustí, 2022).

A su vez, la parte aérea, especialmente las hojas, cumple un rol clave en la nutrición de las raíces. En los tejidos foliares se sintetizan carbohidratos durante la fotosíntesis, los cuales se transportan hacia el sistema radicular, donde son utilizados en procesos metabólicos esenciales como el mantenimiento celular, el crecimiento y las interacciones con microorganismos del suelo (Gayosso-Rosales et al., 2023).

Si la planta tiene acceso suficiente a agua y nutrientes, las raíces pueden crecer más rápidamente y de forma más extensa, permitiendo a la planta crecer con mayor vigor. La distribución de recursos no es estática y cambia a lo largo del ciclo de crecimiento de la planta (Albornoz Gutiérrez, 2014). La asignación de recursos, conocida como partición de biomasa, es un proceso dinámico y altamente regulado. La planta prioriza la distribución de carbohidratos y nutrientes a diferentes órganos (raíces, tallos, hojas, flores y frutos) en función de su etapa fenológica y las condiciones ambientales. Por ejemplo, en fases de crecimiento vegetativo, la partición se inclina hacia el desarrollo de hojas y raíces. Sin embargo, durante la floración y fructificación, una proporción significativa de los recursos se desvía hacia los órganos reproductivos (Agustí, 2022). La dirección y magnitud de esta partición están fuertemente influenciadas por la fuerza de fosa de cada órgano. La fuerza de fosa representa la capacidad que tiene un órgano para atraer y acumular los asimilados producidos por las hojas.

En el caso de los frutales, órganos como los frutos en desarrollo actúan como fosas muy potentes, compitiendo eficazmente por los carbohidratos. Esta alta demanda de foto asimilados por los frutos puede limitar la disponibilidad de recursos para otras fosas, como las raíces, afectando su crecimiento o el desarrollo de nuevos brotes. Durante la etapa de fructificación de los frutales se utilizan algunos manejos para influir sobre la partición de biomasa, como las podas, reguladores de crecimiento o el raleo de frutos para favorecer el llenado de estos (Fischer, 2005). La interacción entre la disponibilidad de recursos, la partición de biomasa y la fuerza de los distintos sumideros es fundamental para entender el balance entre el crecimiento vegetativo y reproductivo en los frutales (García Luis & Guardiola, 2008).

En el crecimiento de las raíces también participa el control hormonal, que se explica por el balance entre diferentes hormonas. Según Agustí (2022), este control se encuentra regulado por el equilibrio de las hormonas auxinas/citoquininas. Cuando la proporción de auxinas es favorable se induce la formación de raíces. Las auxinas, a diferencia de las citoquininas, se sintetizan principalmente en el tallo del árbol y no en las raíces, donde las citoquininas se producen de forma mayoritaria.

Las auxinas son utilizadas frecuentemente en la propagación vegetativa de plantas con el objetivo de favorecer el enraizamiento de estaquillas (Urbino Vallejo, 2001). Como es el caso de las auxinas sintéticas, el ácido indolbutírico (AIB) y el ácido naftalenacético (ANA) que mediante la aplicación exógena estimulan la formación de raíces adventicias en la base de los esquejes (Agustí, 2022).

3.8.3. Factores que afectan el crecimiento de raíces

Los factores que afectan en el crecimiento de las raíces se pueden clasificar en factores endógenos, que son aquellos que están determinados por las características del portainjerto y de la variedad seleccionadas. Por otra parte, se encuentran los efectos exógenos, que se explican por las características del medio donde se desarrollan y los manejos que se realizan en la plantación.

Según Gil-Albert (1995), las características del suelo que más condicionan el crecimiento y el desarrollo radicular son:

- La temperatura del suelo y sus variaciones

Es un factor decisivo en el crecimiento de las raíces, en los árboles frutales va a depender de que la temperatura del suelo sea favorable, ya que estas requieren de una temperatura mínima en el mismo para un adecuado desarrollo. El rango óptimo para el crecimiento radicular se encuentra entre 10 °C y 30 °C, y fuera de este rango térmico, la formación de raíces puede verse afectada negativamente (Agustí, 2022).

La actividad radicular en manzano se inicia cuando la temperatura del suelo alcanza aproximadamente 8 °C, umbral a partir del cual las raíces comienzan a absorber nutrientes; por debajo de este valor, la captación, como la de nitrógeno, es prácticamente nula (Dong et al., 2001). Los investigadores DuPont et al. (2020) remarcan que la temperatura óptima del suelo para el crecimiento radicular se registra entre los 18 y 25 °C. Mientras que temperaturas del suelo superiores a 30 °C pueden afectar negativamente el desarrollo y la funcionalidad de las raíces.

- Humedad y sus variaciones:

La disponibilidad de humedad en el suelo influye directamente en el crecimiento y la profundización del sistema radicular. La presencia de agua en el perfil del suelo no solo resulta de importancia para el desarrollo de las raíces, sino también para que cumplan sus funciones básicas como la respiración y transporte.

Según Urbino Vallejo (2001) las raíces de los árboles frutales presentan cierto hidrotropismo positivo. En el caso de plantaciones con riego o zonas de altas precipitaciones, las raíces tienden a desarrollarse cerca de la superficie o en zonas de alta humedad; en cambio, en plantaciones sin riego, el sistema radicular tiende a desarrollarse en profundidad en el suelo.

- Aireación y contenido en oxígeno:

A su vez, el sistema radicular necesita de un suelo bien aireado para que se desarrolle normalmente, ya que las raíces pueden morir o sufrir daños cuando se encuentran sometidas a condiciones anaeróbicas, que se ven reflejados en un limitado crecimiento estructural y funcional del árbol en general (Urbino Vallejo, 2001). En suelos húmedos y pobremente drenados se predisponen condiciones óptimas para la proliferación de enfermedades fúngicas propias del suelo como *Phytophthora*, *Armillaria*, *Pythium*.

Una densidad aparente del suelo muy elevada representa problemas para los cultivos, ya que es necesario un correcto abastecimiento de agua y aire a las raíces para asegurar un máximo de productividad (Rienzi & Maggi, 2007). Estos mismos autores aseguran que una adecuada provisión de oxígeno a las raíces resulta esencial para que cumplan sus funciones convenientemente. Es importante destacar que la necesidad de oxígeno en las especies frutales varía con la temperatura del suelo, ya que un aumento de esta también incrementa la exigencia de oxígeno.

- Estructura y textura del suelo:

Las características de mayor importancia que influyen en la composición de suelo son la textura y la estructura, que a su vez definen sus propiedades físicas y químicas.

Según Agustí (2022), en general, los suelos que mejor se adaptan en la plantación de especies frutales son aquellos que se clasifican como suelos francos, fértiles y profundos, que permiten una mayor exploración de las raíces en profundidad (hasta de 2 a 4 m), buen drenaje y una adecuada capacidad de retener agua. Un factor de importancia en la formación del sistema radicular es la resistencia mecánica que ofrece la arcilla a la penetración de las raíces en el suelo.

Para el caso de la especie de manzano, este tiene preferencia por suelos francos o franco arenosos con buen drenaje, condiciones que favorecen el desarrollo radicular y previenen problemas causados por el exceso de humedad. El pH óptimo se encuentra entre 5.5 y 7.0, rango en el cual la disponibilidad de nutrientes es adecuada para el crecimiento de la planta. Además, la presencia de materia orgánica en el suelo contribuye a mejorar su estructura, retención de agua y actividad microbiológica, factores fundamentales para un sistema radicular saludable y productivo (*Manzana*, s.f.).

En un trabajo de investigación realizado por Aruani y Behmer (2004) sobre el efecto de la compactación del suelo en la distribución de raíces en manzano, se pudo concluir que la resistencia a la penetración tiene mayor incidencia en la distribución radicular en suelos con granulometrías medias- limo/arcillosos- que en suelos de granulometrías gruesas- arenosos. Los suelos compactados tienen menor capacidad de movimiento del aire y del agua, y aumenta la resistencia mecánica a la penetración radicular.

3.8.4. Crecimiento de raíces en la estación de crecimiento

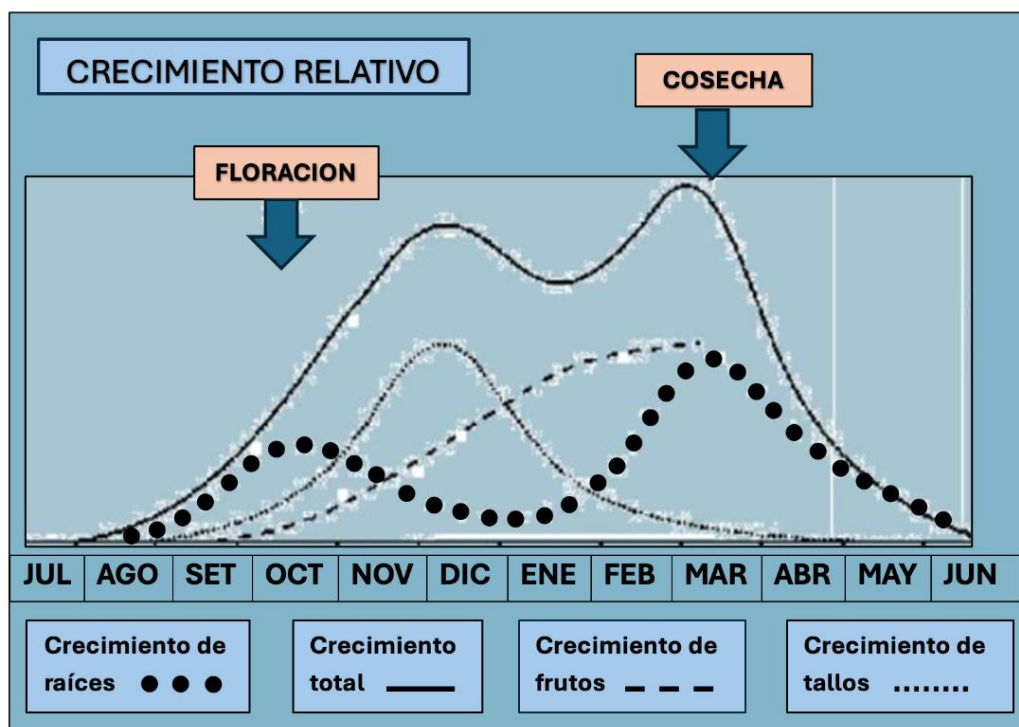
El crecimiento del sistema radicular en manzanos presenta patrones específicos influenciados tanto por factores ambientales como fisiológicos, donde según Agustí (2022), “el crecimiento de las raíces depende de las disponibilidades hídricas y nutricionales y está regulado hormonalmente” (p. 28).

Las raíces de los árboles frutales presentan un comportamiento bimodal en la actividad radicular, con dos picos de crecimiento principales, uno que ocurre al final del invierno y comienzo de la primavera, y otro periodo al final del verano y comienzo del otoño. Al inicio de la primavera, las raíces se desarrollan activamente tras el receso invernal hasta que aumenta la tasa de crecimiento de los brotes donde se detiene el crecimiento de raíces momentáneamente. Mientras que al acercarse el otoño y una vez finalizada la cosecha, se observa un nuevo incremento en el crecimiento radicular que ocurre cuando disminuye la competencia por recursos con brotes y frutos (Allendes Lagos, s.f.).

Cabe destacar que al inicio de la primavera se produce un desfase temporal, en el que el crecimiento de las raíces se activa antes de que los brotes retomen plenamente su desarrollo (figura 4). En esta etapa, el desarrollo inicial del árbol depende en gran medida de los compuestos de reserva acumulados previamente, como los polisacáridos, cuya degradación provee los azúcares necesarios para la generación de nueva biomasa, especialmente a nivel de la parte aérea. En este sentido, el crecimiento de raíces en otoño no solo es fisiológicamente relevante, sino que también representa una etapa clave para la acumulación de reservas, por lo que resulta estratégico aplicar fertilización en ese período (Hirzel & Rodríguez, 2018). En línea con esto, Urbino Vallejo (2001) reafirma que la cantidad de reservas acumuladas al final del ciclo vegetativo influye directamente en el crecimiento inicial del ciclo siguiente, afectando la tasa de desarrollo, ya sea incrementándose o reduciéndose.

Figura 4

Dinámica estacional del crecimiento relativo de órganos en frutales de hoja caduca



Nota. Adaptado de Hirzel y Rodríguez (2018).

Comprender la dinámica estacional del crecimiento radicular– la cual es asincrónica con la brotación aérea (Ma et al., 2013)– permite optimizar prácticas agronómicas como la fertilización y el riego. Según estos autores, el crecimiento de raíces en manzano presenta uno o dos picos por temporada (coincidiendo con los autores ya mencionados), generalmente con un primer pico en marzo, y un segundo entre los meses de septiembre/octubre, dependiendo del tipo de portainjerto. Esta asincronía con el crecimiento de brotes subraya la necesidad de ajustar el manejo agronómico a los momentos específicos de actividad radicular.

3.9. DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA RADICULAR DEL MANZANO

El sistema radicular del manzano es un componente fundamental para la salud, el crecimiento y la productividad del árbol. Su distribución en el perfil del suelo determina la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, el anclaje y la estabilidad del árbol. La arquitectura radicular es el resultado de la interacción compleja entre factores genéticos (principalmente del portainjerto), las propiedades fisicoquímicas del suelo, la edad del árbol y las prácticas de manejo del cuadro frutal (Atkinson, 1980).

3.9.1 Patrones generales de distribución vertical: concentración superficial

Diversos estudios (De Silva et al., 1999; Ma et al., 2013; Thomaj et al., 2019), coinciden en que la mayor proporción del sistema radicular funcional de los manzanos, especialmente las raíces finas y absorbentes, que son fundamentales para la absorción de agua y nutrientes, se concentra en las capas más superficiales del suelo.

Estudios como el de Ma et al. (2013), que utilizaron mini rizotrones para observar la dinámica radicular, encontraron que la densidad de raíces es significativamente mayor en las capas superiores, concentrándose principalmente en los primeros 40 cm de profundidad y disminuyendo drásticamente por debajo de los 60-80 cm. Similarmente, De Silva et al. (1999), mediante muestreo de núcleos de suelo, confirmaron que la densidad de longitud radicular (RLD) disminuye de forma exponencial a medida que aumenta la profundidad del suelo, con la mayor concentración cerca de la superficie.

El estudio de Gjamovski et al. (2018), que evaluó diversos portainjertos de 'Granny Smith', reportó que, en promedio, el 89% de la longitud total del sistema radicular estaba compuesta por raíces finas. En la mayoría de los portainjertos, la mayor concentración de estas raíces se encontró entre los 20 y 40 cm de profundidad, aunque también con una presencia significativa en los 0-20 cm.

Thomaj et al. (2019), en su investigación sobre el portainjerto M.9, confirmaron la característica de enraizamiento superficial en este portainjerto. Observaron que, dependiendo del cultivar injertado, entre el 73% ('Golden Delicious') y el 84% ('Starking') de las raíces finas se concentraban en los primeros 60 cm de profundidad, con una presencia notablemente menor por debajo de este estrato. La mayor concentración de raíces se encontró en los estratos más superficiales (por ejemplo, 'Starking' presentó el 60% de sus raíces finas hasta los 40 cm, mientras que 'Golden Delicious' tuvo el 47% en el mismo rango).

La revisión de Atkinson (1980), que sintetiza décadas de investigación, concluye que la mayor densidad de raíces se encuentra generalmente en los primeros 60 cm de profundidad, a menudo con la concentración más alta en los primeros 30-40 cm, y que la densidad disminuye exponencialmente con la profundidad.

3.9.2 Influencia del portainjerto e interacción con el cultivar y la edad del árbol

La elección del portainjerto es el factor genético más influyente en la arquitectura del sistema radicular del manzano, determinando tanto la profundidad de enraizamiento como la extensión lateral y la densidad de las raíces. Además, la interacción con el cultivar y la edad del árbol modula este patrón.

Fernández et al. (1995) observaron diferencias en la distribución vertical entre nueve portainjertos, con los más enanizantes (ej. M.27 EMLA, M.9 EMLA) concentrando la mayor parte de sus raíces en las capas más superficiales (primeros 30 cm), mientras que los más vigorosos (ej. MAC.24, M.7 EMLA) mostraban una mayor capacidad para explorar profundidades mayores.

Ma et al. (2013) destacaron que los portainjertos enanizantes (M.9 y SH.40) desarrollan sistemas radiculares más superficiales en comparación con el portainjerto vigoroso ('Baleng Crab' - BC), el cual tiene la capacidad de explorar mayor profundidad. Además, su estudio mostró que la inclusión de interinjertos enanizantes (M.9 sobre 'Baleng Crab' - BC y SH.40 sobre 'Baleng Crab' - BC) resulta en un patrón de enraizamiento intermedio.

Gjamovski et al. (2018) reportaron que, aunque la mayoría de los portainjertos enanizantes concentran raíces entre 20-40 cm, el portainjerto 'Mark 9' fue una excepción notable, mostrando una mayor longitud y peso de raíces finas en la capa de 0-20 cm.

Thomaj et al. (2019) mostraron que la edad de la planta (nueve y catorce años) también influyó significativamente. Si bien la biomasa radicular total fue mayor en árboles más jóvenes, el patrón general de enraizamiento superficial del M.9 persistió. Sin embargo, se observó un desplazamiento gradual de las raíces hacia capas más profundas del suelo y más lejos del tronco a medida que los árboles envejecen. Por ejemplo, las plantas de nueve años concentraban más raíces en la superficie (casi el 60% hasta 40 cm de profundidad) y cerca del tronco (casi el 55% hasta 40 cm de distancia), que las de 14 años (casi el 45% y 35% respectivamente). A su vez, las plantas de 14 años mostraron una mayor proporción de raíces en el estrato de 60 a 90 cm de profundidad (casi el 27%), a distancias de 80 a 120 cm del tronco (casi el 30%) en comparación con las plantas más jóvenes.

3.9.3. Impacto de las características del suelo y las prácticas de manejo

Además de la genética del portainjerto, las propiedades físicas del suelo y las decisiones de manejo cultural juegan un papel crucial en la determinación de la distribución final del sistema radicular.

El estudio de Fernández et al. (1995) demostró claramente el impacto del tipo de suelo en la distribución radicular. Estos autores observaron que, en el suelo franco arenoso fino (tipo de suelo Marlette), las raíces se distribuyeron de manera uniforme en el perfil. En contraste, en el suelo franco limoso (tipo de suelo Canfield) con capas restrictivas, como los fragipanes (capas de subsuelo densas y quebradizas), la penetración de las raíces se vio severamente limitada. Esto provocó una concentración significativa de la biomasa radicular por encima de dicha capa. Por su parte, Thomaj et al. (2019) también resaltan que las características del suelo, como la textura y la compactación, son factores clave que afectan la profundidad de enraizamiento.

Atkinson (1980) destaca que el manejo del cuadro frutal influye directamente en la distribución de las raíces. Las prácticas de riego superficial y frecuente, así como la aplicación de fertilizantes en las capas superiores, tienden a promover una concentración de raíces finas en estas zonas. La labranza, por otro lado, puede dañar y reducir la biomasa radicular en la superficie, mientras que las bandas de herbicida pueden fomentar una mayor densidad radicular superficial en la hilera del árbol.

3.10. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE RAÍCES

El estudio del sistema radicular de los árboles frutales en condiciones de campo enfrenta dificultades técnicas y conceptuales debido a que la raíz es una estructura subterránea de la planta, además de que implica mucha mano de obra y el costo involucrado en el muestreo, la observación y la evaluación de las raíces (McMichael & Taylor, 1987).

Históricamente, desde mediados del siglo XVIII, los primeros métodos disponibles para caracterizar el sistema radicular fueron destructivos, consistiendo en la excavación del suelo mediante calicatas. Hales (1727, como se cita en Böhm, 1979), fue uno de los pioneros en aplicar esta técnica, extrayendo raíces de cultivos para evaluar su morfología, peso y longitud. Sin embargo, debido a su carácter destructivo, esta metodología no es aplicable en estudios de largo plazo que requieren observaciones repetidas en el mismo sitio (Taylor, 1986).

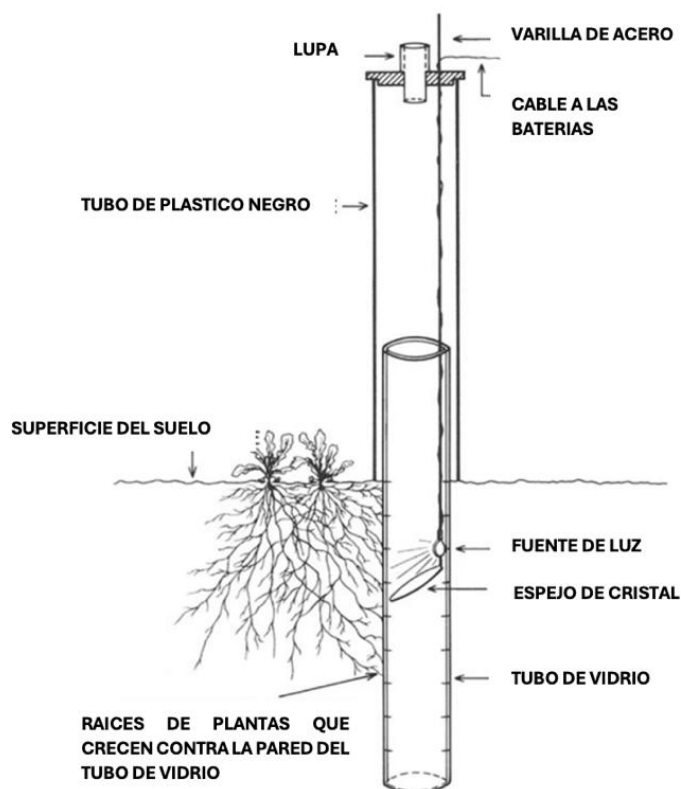
Luego de más de cien años, a mediados del siglo XIX con el incremento en el uso de fertilizantes minerales en los campos agrícolas se comenzó a volcar el interés

nuevamente en los estudios radiculares. Weaver (1926, como se cita en Böhm, 1979), fue quien desarrolló una nueva técnica sencilla de excavación con herramientas de jardinería, que luego sería el método predominante en todo el mundo en el estudio de los sistemas radiculares hasta mediados del siglo XX. Posteriormente los investigadores Rogers y Vyvyan (1928, 1934, como se citan en Böhm, 1979), comenzaron a aplicar este método con árboles frutales, ya que Weaver utilizó este método principalmente en plantas de pradera. El método de excavación fue ampliamente utilizado en la estación East Malling, Inglaterra para el estudio de los sistemas radiculares de árboles frutales, principalmente en manzanos.

Otro de los métodos utilizados es el de rizotron descrito por Sachs (1873, como se cita en McMichael & Taylor, 1987), que consistía en pequeñas cajas con paredes de vidrio para medir el crecimiento radicular de plantas cultivadas en condiciones de campo. Este “laboratorio de raíces”, también denominado cámaras o sótanos radiculares fueron modernizados a mediados del siglo XX para tener un mayor control de las condiciones para la observación de raíces e instalaciones más duraderas para una evaluación a largo plazo. Los autores McMichael y Taylor (1987), indican que uno de estos laboratorios modernos fue instalado entre los años 1961 y 1966 en la estación East Malling en Inglaterra, y desde ese momento se comenzó a utilizar el término rizotron para la descripción de estos laboratorios. Este consistía en una zanja excavada con fondo de hormigón (similar a un túnel) entre dos perfiles de suelo, luego se colocaron ventanas de vidrio en las paredes laterales lo que permite observar el crecimiento de raíces.

Luego, el investigador Böhm (1979) probó una nueva técnica para observar las raíces de las plantas, que consistía en la perforación de agujeros verticales en el suelo para que continuamente se insertan tubos de vidrio de unos 130 cm de largo y unos 65 mm de diámetro, que se cierran en el extremo inferior con un tapón de goma para evitar la entrada de luz y agua. Este mismo investigador denominó como mini rizotrones a estos tubos para la observación de raíces en el perfil del suelo.

Si se compara esta técnica con el método de rizotron, se puede afirmar que el método de tubos resulta más económico, causa menor perturbación en el suelo y permite la instalación de un número suficiente de tubos en el campo para la obtención de datos estadísticos. En la época de los 70s fue un método satisfactorio para resolver muchos problemas de investigación, por lo que fue ampliamente utilizado por los investigadores de la época (Böhm, 1979). Este método de observación de raíces puede apreciarse en la figura 5.

Figura 5*Principio de observación de raíces a través de tubos de vidrio*

Nota. Tomado de Böhm (1979).

El sistema de mini rizotrones se utiliza en la actualidad mediante una cámara que permite tomar imágenes de buena resolución de las raíces, y permite conocer detalladamente el crecimiento del sistema radicular durante su periodo de crecimiento. Además, permite detectar la fenología, distribución, ataque de patógenos, entre otras. En la época actual, los métodos para el análisis del sistema radicular implican la generación de imágenes en 2D y 3D, que no son destructivas y, por lo tanto, permiten tomar imágenes repetidas en el mismo punto. Estas imágenes radiculares pueden realizarse en tiempo real y con la frecuencia que sea necesaria, y algunas de las técnicas que se utilizan son: imágenes por resonancia magnética (IRM), tomografía computarizada con rayos X, radiografía de neutrones y los mini rizotrones (Trimble, 2020).

De las técnicas mencionadas, se pondrá énfasis en un ejemplo del sistema de minirizotrones, donde el laboratorio CID Bio-Science comercializa dos generadores de imágenes radiculares in situ, el CI-600 y el CI-602. Según Trimble (2020), ambos equipos capturan imágenes digitales de alta resolución, permitiendo monitorear el desarrollo y la actividad funcional de las raíces hasta una profundidad de dos metros. El escáner proporciona información sobre la longitud, área, volumen, diámetro y el ángulo de ramificación de las raíces, además de analizar la distribución de raíces y su interacción con las plantas del cultivo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESCRIPCIÓN DEL SITIO Y UBICACIÓN TEMPORAL

El ensayo comparativo de portainjertos de la serie Geneva se llevó a cabo desde el mes de octubre del año 2023 hasta septiembre del 2024, en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) ubicado en la localidad de Las Brujas, próximo a la Ruta 48, Km 10, Rincón del Colorado, departamento de Canelones, Uruguay.

En la figura 6 se muestra la ubicación del monte de manzano y las filas donde está instalado el ensayo (Lat. -34.6720157; Long. -56.3392238).

Figura 6

Ubicación del ensayo en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria en Las Brujas, Canelones



Nota. En el recuadro marcado en rojo con el icono de ubicación de ensayo es donde se encuentran los tubos para el experimento. Adaptado de Google Earth (2023).

4.2. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL VEGETAL

Las mediciones en este ensayo se realizaron en plantas del cultivar 'Lady in Red', establecidas el 30 de octubre de 2019. Al momento de la evaluación, el cultivar se encontraba en la etapa de quinta hoja desarrollada. Se utilizó un marco de plantación de 3 metros entre filas y 1,2 metros entre plantas, lo que resulta en una densidad de 2778 plantas/ha. El sistema de conducción empleado en este ensayo fue de doble eje, en muro alto.

4.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

El experimento se estableció siguiendo un diseño en bloques completos al azar (DBCA). El diseño original contemplaba cuatro bloques (A, B, C y D), sin embargo, por razones logísticas relacionadas con la disponibilidad de tubos para la medición del crecimiento radicular Root Snap, el bloque B no fue utilizado en este experimento.

Durante este ensayo se evaluaron seis tratamientos, correspondientes a los portainjertos de la serie Geneva® G.41, G.210, G.202, G.213, G.214 y G.814, todos injertados con el cultivar 'Lady in Red'. Cada tratamiento se estableció en parcelas de cuatro plantas, y en la segunda planta de cada parcela se instaló un tubo de observación Root Snap para evaluar el crecimiento radicular.

Cada tratamiento estuvo presente en los tres bloques utilizados, generando un total de tres repeticiones por tratamiento. El criterio de bloqueo se propuso para minimizar la variabilidad ambiental, que pudiera estar vinculado al manejo de las filas de plantación, variaciones en el sistema de riego y características del suelo.

La tabla 5 muestra la disposición de los tratamientos en las hileras 25, 26, 27 y 28 del sector experimental “Muro Alto” en INIA Las Brujas.

Tabla 5

Disposición de los tratamientos de portainjertos en parcelas del sector experimental 'Muro Alto' en INIA

Fila 25											814	214
Fila 26											214	814
Fila 27	41	213	202	814	210	214	M.9	213	202	210	M.9	41
Fila 28	202	210	M.9	814	214	41	213	210	213	M.9	202	41
Borde	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Nota. Los tratamientos pintados en celeste corresponden al bloque A, los grises al bloque B (no utilizado), los amarillos al bloque C y los verdes al bloque D.

4.4. TRATAMIENTOS Y MEDICIONES EN EL CULTIVO

En el ensayo presentado, los tubos son colocados en la segunda planta de cada parcela evitando así los bordes. Los tubos se colocaron en un ángulo de 45 grados respecto al tronco principal del árbol, de forma perpendicular a la fila, manteniendo en todo el bloque la misma orientación. Se instalaron un total de 18 tubos de observación, de 1 m de largo, correspondiendo a los 6 tratamientos (distintos portainjertos Geneva®) y sus 3 repeticiones.

Las imágenes de las raíces se obtuvieron utilizando el escáner CI-600 In-situ Root Imager (Figura 5). Antes de cada sesión de escaneo, el dispositivo fue calibrado. Para asegurar la máxima precisión en las mediciones, se utilizó la resolución más alta disponible, de 1200 DPI.

Cada medición consistió en cuatro imágenes (0–20 cm; 20–40, 40–60 y 60–80 cm) ya que el escáner digitaliza la imagen con un ángulo de 360° a una profundidad específica, y se procede a bajar progresivamente el escáner para así obtener imágenes a diferentes profundidades. De esta manera, al final de cada sesión de escaneo, contábamos con 72 imágenes correspondientes a los 18 tubos.

Luego de obtener las imágenes, se procesaron utilizando el software Root Snap, versión 1.4.0.110 (CID Bio-Science, 2014), el cual permite realizar el trazado de las raíces para la obtención de los datos de las variables a analizar. Para realizar el trazado correcto de las raíces, en primer lugar, se alinearon las imágenes escaneadas para así

observar el flujo de crecimiento de las raíces a lo largo del tubo de medición. En segundo lugar, se seleccionó un diámetro o rango adecuado para trazar las raíces que permite el trazo en el centro de la raíz.

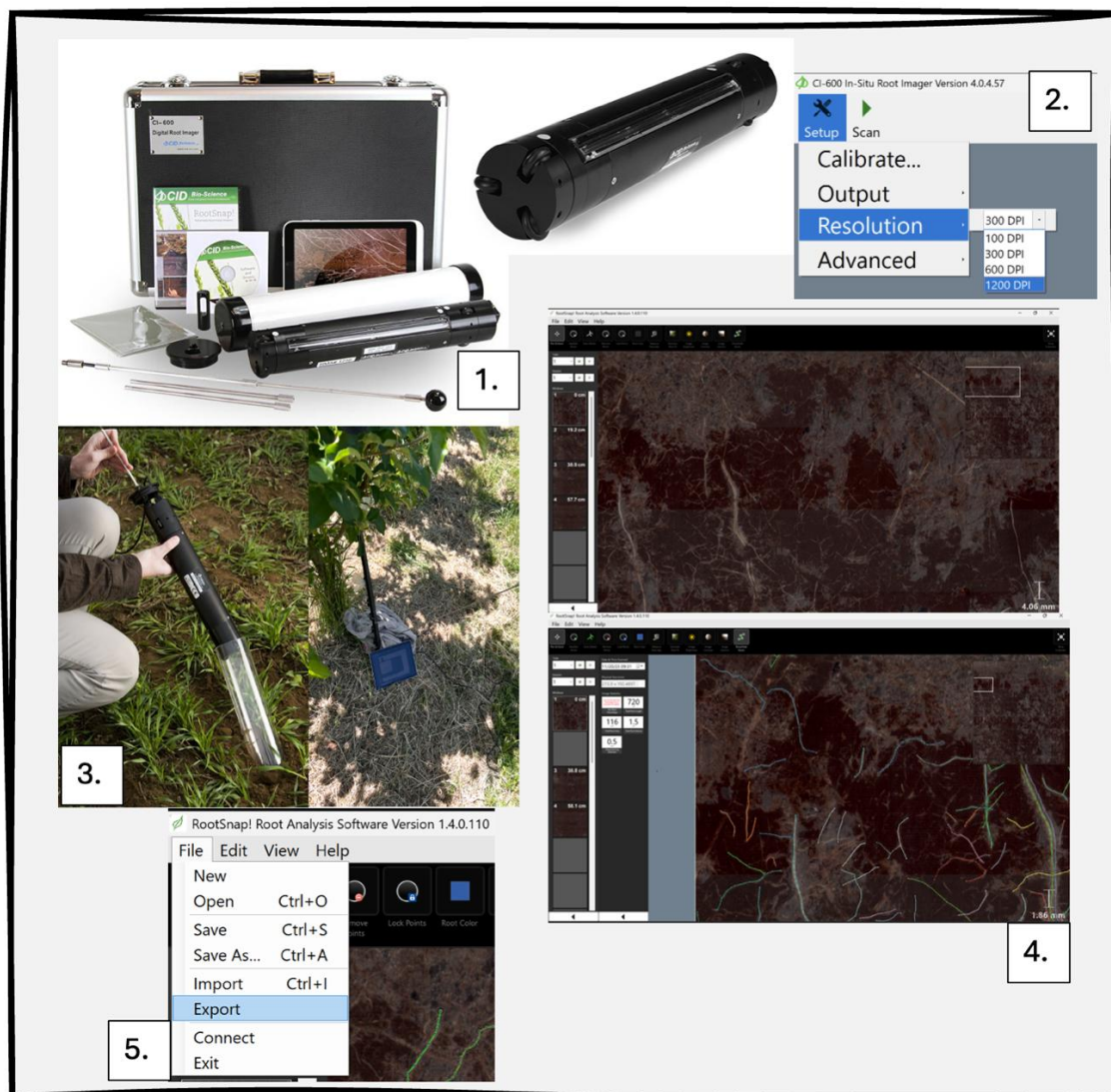
Para este ensayo, se realizaron un total de doce mediciones de raíces, que se realizaron mensualmente desde el mes de octubre de 2023 a septiembre de 2024. A los efectos de esta tesis, se optó por analizar únicamente la medición del mes de noviembre de 2023, ya que al observar detalladamente cada una de ellas, parecieron ser las de mejor calidad para su posterior análisis. Además, otro motivo de relevancia para la selección de esta medición es la importancia que tiene este momento con el cuajado de los frutos para cultivar Lady in Red.

Finalizado el trazado de las raíces, se obtiene un archivo con la información de las variables: longitud de raíces (mm), volumen de raíces (mm³), área de raíces (mm²) y el diámetro promedio de raíces (mm). De esta manera, para cada portainjerto analizado y sus tres repeticiones, se obtienen los datos de estas variables desglosados por profundidad.

Debido a que el proceso de análisis y trazado de raíces en el software requiere de una cantidad considerable de tiempo, para agilizar este trabajo, utilizamos una herramienta del software que permite medir el diámetro de las raíces de forma automática. Donde seleccionamos una muestra de raíces de varias imágenes y calculamos un promedio del diámetro para fijar un rango constante, evitando así modificarlo con cada trazado. Por lo tanto, para el mes de noviembre, obtuvimos las variables de longitud de raíz, volumen total de raíz y área total de raíz, tanto de manera global como a diferentes profundidades. En la figura 7 se muestra el procedimiento.

Figura 7

Flujo de trabajo para la medición de raíces en portainjertos Geneva® con CI 600 y software



Nota. 1. Material utilizado para el ensayo y escáner CI-600 In-Situ Root Imager 2. Calibración del escáner y selección de calidad de digitalización 3. Introducción del escáner al tubo de ensayo y posterior medición 4. Importación de imágenes al software y trazado de raíces 5. Se exporta el archivo en formato Excel para luego analizar los datos.

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se ajustó el siguiente modelo general para las variables estudiadas en el ensayo

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} es la variable de respuesta

- μ es la media poblacional
- τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento
- β_j es el efecto del j -ésimo bloque
- ϵ_{ij} es el error experimental asociado al i -ésimo tratamiento en la j -ésima repetición.

Cada variable evaluada fue analizada de forma individual, considerando los efectos del portainjerto (tratamiento) y del bloque.

Además, al contar en cada tubo con cuatro profundidades distintas, se incorporó también la variable profundidad al análisis. Como se describió en la sección 3.4, para cada portainjerto se obtuvieron datos de longitud, volumen y área de raíces en cuatro niveles de profundidad del suelo: 0–20 cm; 20–40, 40–60 y 60–80 cm.

Para cada variable evaluada en este ensayo (longitud, volumen y área de raíces), se planteó como hipótesis nula (H_0) que no existían diferencias significativas entre los portainjertos. La hipótesis alternativa (H_1) estableció que al menos uno de los portainjertos presentaba una media significativamente diferente, lo que indicaría un efecto del tipo de portainjerto sobre la variable analizada.

Para evaluar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos, se realizó un Análisis de la Varianza (ANOVA). Previamente, se verificaron los supuestos del modelo lineal: la normalidad de los residuos mediante el test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas mediante el test de Levene. En los casos en que se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$), se aplicó una prueba de comparación de medias mediante el test de Tukey.

El análisis estadístico fue realizado utilizando el software Rstudio (versión 4.5.1).

5. RESULTADOS

5.1. LONGITUD DE RAÍCES (mm)

Previo al análisis estadístico, se evaluó la distribución de la longitud total de raíces por portainjerto mediante un análisis descriptivo. En la tabla 6 se presentan los datos estadísticos para cada tratamiento, incluyendo la media, desviación estándar, error estándar y coeficiente de variación (CV%).

En este análisis descriptivo se pudo observar que los portainjertos G.202 y G.210 presentaron los mayores valores promedio de longitud radicular, con 20994,9 mm y 19407,9 mm respectivamente, mientras que el portainjerto G.213 mostró la menor longitud media, con 12695,5 mm. Los valores del coeficiente de variación fueron relativamente bajos en general, destacándose el valor más alto en G.213 (10,1%) y el más bajo en G.214 (3,1%), lo que indica una mayor homogeneidad en las mediciones de este último.

Tabla 6

Estadísticos descriptivos de la longitud de raíces por portainjerto

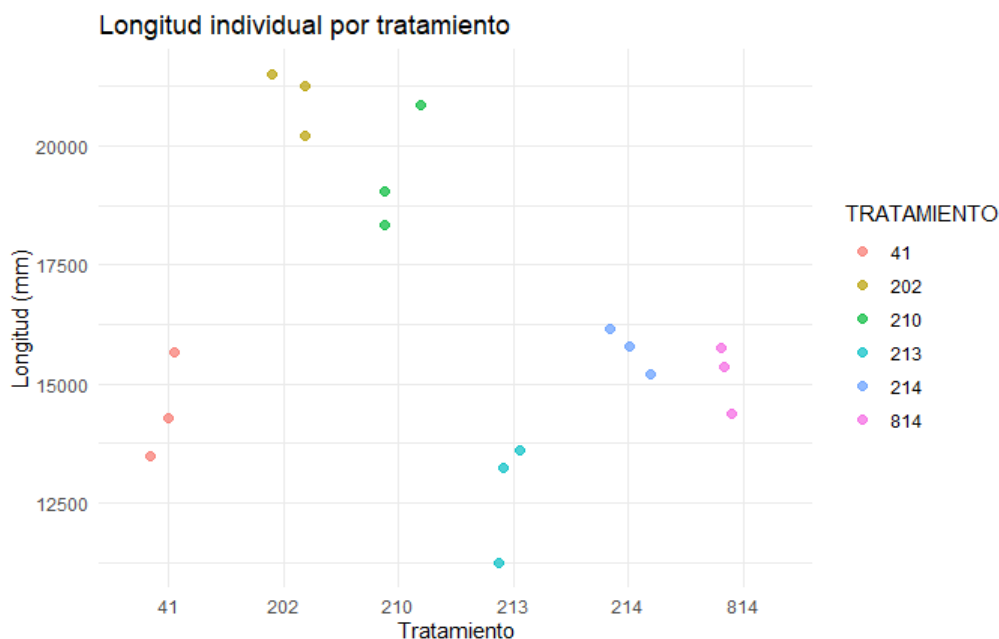
Tratamiento (Geneva)	Media (mm)	DE	n	EE	CV (%)
G.41	14473.2	1103.4	3	637.1	7.6
G.202	20994.9	687.9	3	397.1	3.3
G.210	19407.9	1298.7	3	749.8	6.7
G.213	12695.5	1281.7	3	740.0	10.1
G.214	15706.5	484.5	3	279.7	3.1
G.814	15163.4	716.3	3	413.5	4.7

Nota. DE: Desviación estándar. EE: Error estándar. CV: Coeficiente de variación.

Para visualizar la variabilidad entre repeticiones dentro de cada tratamiento, se elaboró un gráfico de puntos individuales (stripchart) Figura 8. Este tipo de representación es particularmente útil en ensayos con bajo número de repeticiones, ya que permite observar cada observación de forma individual y clara.

Figura 8

Distribución individual de la longitud de raíces (mm) para cada portainjerto evaluado



5.1.1 Análisis de varianza (ANOVA)

Antes de aplicar el análisis de varianza, se verificaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad de los residuos. La homogeneidad de varianzas se evaluó mediante el test de Levene, el cual no mostró diferencias significativas entre tratamientos ($F = 0.2768$; $p = 0.9171$), indicando que las varianzas pueden considerarse homogéneas. La normalidad de los residuos del modelo se comprobó mediante la prueba de Shapiro-Wilk, obteniéndose un valor de p-valor de 0.0678. Al no ser significativo, se concluye que los residuos se distribuyen normalmente.

Cumplidos ambos supuestos, se procedió a realizar el análisis de varianza (ANOVA). El resultado mostró diferencias estadísticamente significativas en la longitud de raíces entre los tratamientos ($p = 0.0000056$), lo cual indica que se rechaza la hipótesis nula y se acepta que el tipo de portainjerto tiene un efecto significativo sobre el desarrollo del sistema radicular. Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas entre bloques ($p = 0.2466$), lo que sugiere que la variabilidad espacial dentro del ensayo no tuvo un impacto relevante sobre la variable analizada.

5.1.2 Comparación múltiple: Test de Tukey

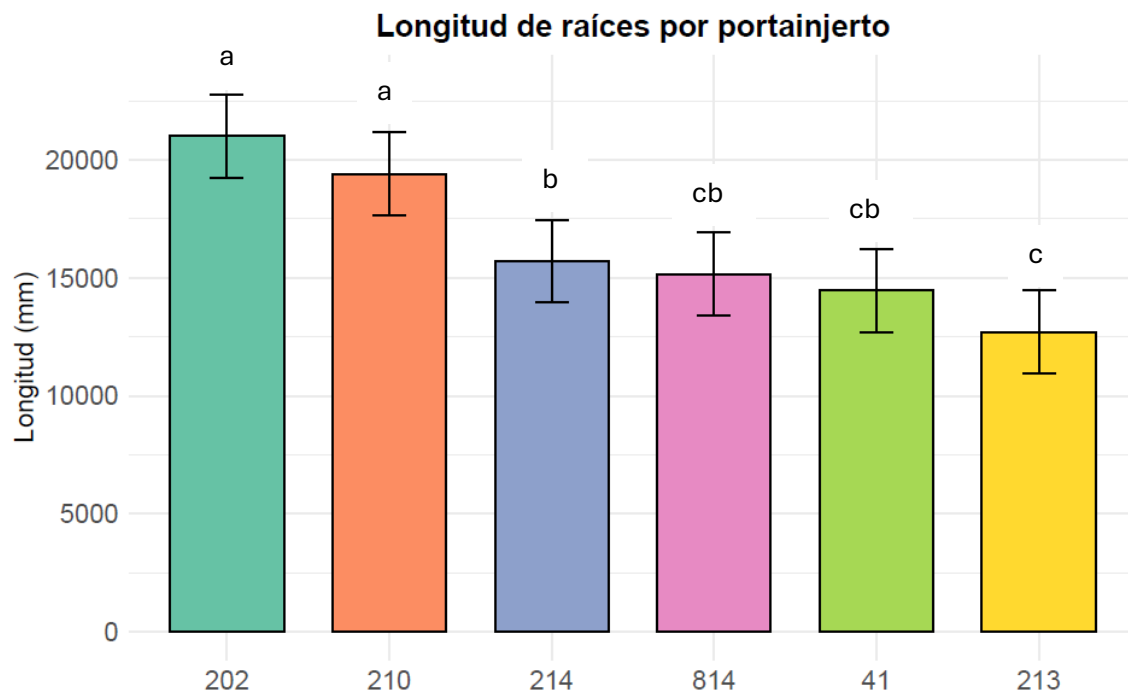
Al rechazar la hipótesis nula en el análisis de varianza, que planteaba que no existen diferencias en la longitud total de raíces entre los portainjertos, se procedió a realizar una comparación múltiple mediante el test de Tukey HSD. Este test permitió identificar específicamente qué portainjertos difieren significativamente entre sí en cuanto a la longitud de raíces.

Los resultados del test de Tukey se presentan en la Figura 9. Las letras iguales indican que los portainjertos pertenecen a un mismo grupo estadísticamente

homogéneo, sin diferencias significativas entre ellos, mientras que letras diferentes señalan diferencias significativas en la longitud de raíces.

Figura 9

Comparación de la Longitud de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey



Nota. Las barras de error muestran el intervalo de confianza del 95% para la media, con los palitos en los extremos representando el error estándar.

De acuerdo con los resultados de Tukey:

Este grafico de barras refleja que los portainjertos G.202 y G.210 tienen mayor longitud de raíces en comparación con el resto, mientras que G.213 registra el menor crecimiento radicular, sin diferencias respecto de G.814 y G.41. El portainjerto G.214 presenta un valor de crecimiento intermedio.

5.2 VOLUMEN RADICULAR (mm³)

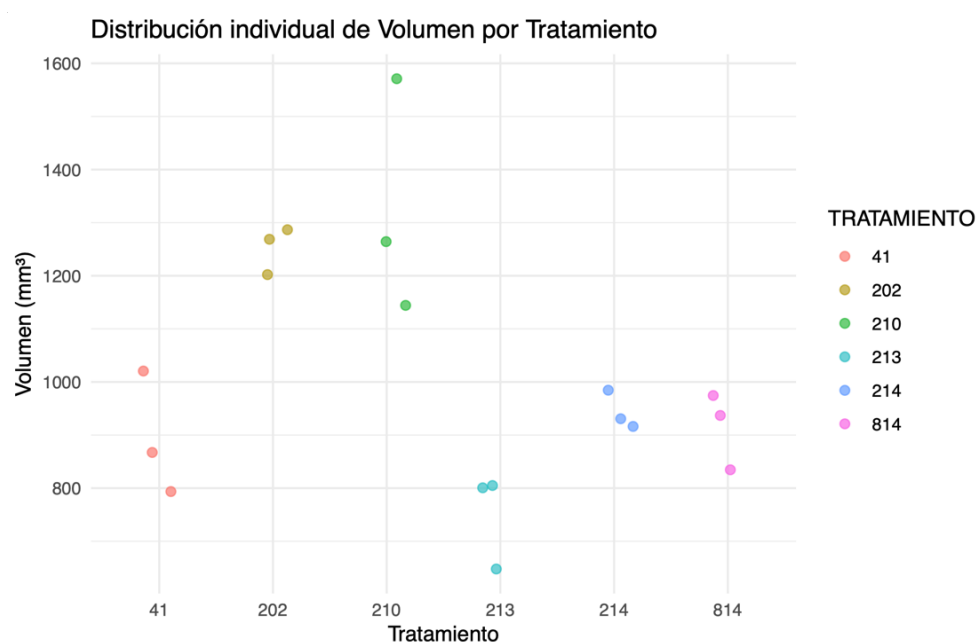
Para el análisis de la variable volumen radicular, se seguirá el mismo procedimiento que en la sección anterior para la variable longitud. A continuación, se presentan los estadísticos descriptivos correspondientes, que incluyen la media, desviación estándar, error estándar y coeficiente de variación (Tabla 7), así como un gráfico de puntos individuales (Figura 10).

Tabla 7
Estadísticos descriptivos del volumen de raíces por portainjerto

Tratamiento	Media (mm ³)	DE	n	EE	CV (%)
41	893.8	115.8	3	66.9	13.0
202	1252.5	44.5	3	25.7	3.6
210	1326.5	220.1	3	127.1	16.6
213	751.1	89.5	3	51.7	11.9
214	943.8	36.0	3	20.8	3.8
814	915.3	72.4	3	41.8	7.9

Nota. DE: Desviación estándar. EE: Error estándar. CV: Coeficiente de variación.

Figura 10
Distribución individual del volumen de raíces (mm³) para cada portainjerto evaluado



Según los datos de la Tabla 7 y la Figura 10, el portainjerto G.210 presentó el mayor volumen radicular, seguido por G.202, mientras que G.213 mostró el menor desarrollo volumétrico del sistema radicular. Se observaron diferencias en la variabilidad entre tratamientos, con un mayor coeficiente de variación en 210 y 41, y una menor variabilidad en 202 y 214.

5.2.1 Análisis de varianza (ANOVA)

Previo al análisis de varianza, se verificaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad de los residuos. En este caso se siguieron los mismos pasos metodológicos descritos para longitud. Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas fueron cumplidos correctamente.

Se realizó el análisis de varianza, que evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0006$), confirmando que el tipo de portainjerto tiene un efecto significativo sobre el desarrollo volumétrico del sistema radicular. Por otra parte, el factor bloque no presentó diferencias significativas ($p = 0.36$), lo que sugiere que la variabilidad espacial dentro del ensayo no influyó en la variable analizada.

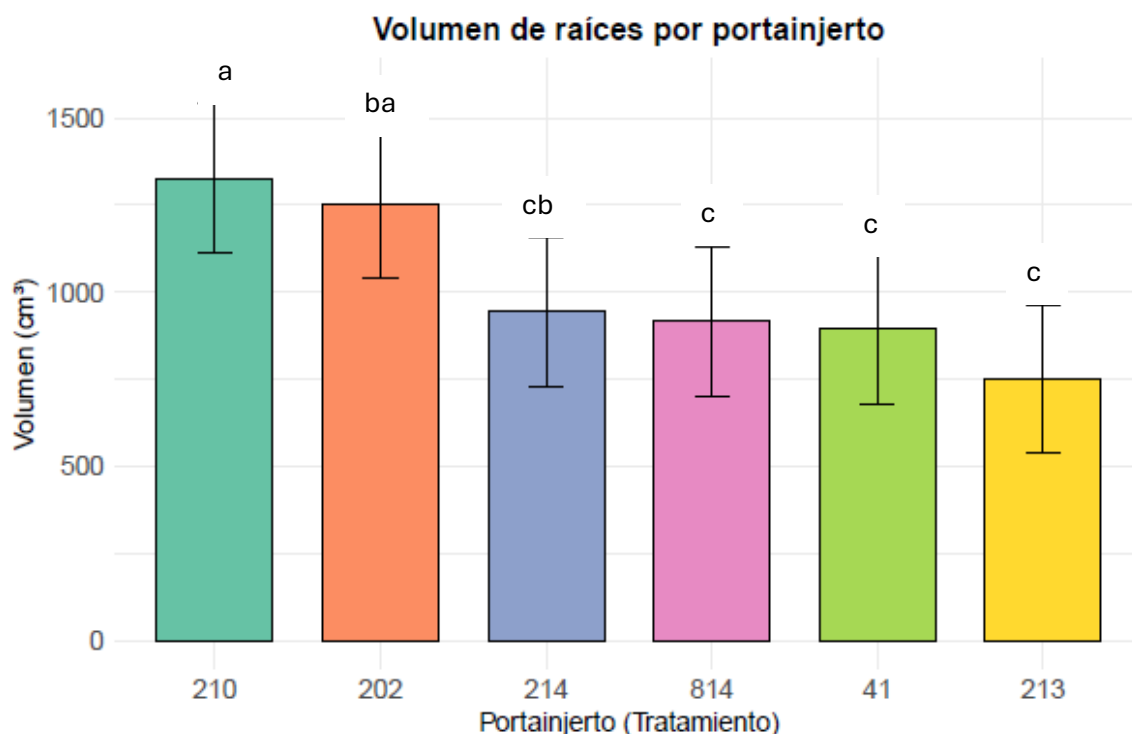
5.2.2 Comparación múltiple: Test de Tukey

Al detectarse diferencias significativas en el volumen total de raíces entre los portainjertos, se procedió a realizar una comparación múltiple mediante el test de Tukey HSD, para identificar cuáles portainjertos presentan diferencias significativas entre sí.

Los resultados del test de Tukey se muestran en la Figura 11. Las letras iguales indican que los portainjertos forman un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre ellos, mientras que letras diferentes señalan diferencias significativas en el volumen de raíces.

Figura 11

Comparación del volumen de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey



Según el test de Tukey:

Este análisis refuerza las observaciones previas donde los portainjertos G.210 y G.202 se posicionan con un mayor volumen de raíces. No obstante, G.202 no se

diferencia significativamente de G.214, y este último, a su vez, no registra diferencias con G.814, G.41 y G.213, que presentan los menores valores de volumen radicular.

5.3 VARIABLE ÁREA RADICULAR (mm²)

Al igual que con las variables de longitud y volumen, se realizó un análisis descriptivo previo para evaluar la distribución del área total de raíces por tratamiento. En la Tabla 8 se presentan los estadísticos básicos obtenidos para cada portainjerto, incluyendo la media, desviación estándar, error estándar y coeficiente de variación (CV%).

Este análisis permite observar las diferencias iniciales en el desarrollo superficial del sistema radicular entre los distintos portainjertos evaluados. Posteriormente, se representaron los datos mediante un gráfico de puntos individuales (Figura 11), el cual resulta útil para visualizar la dispersión de los valores dentro de cada tratamiento.

Tabla 8

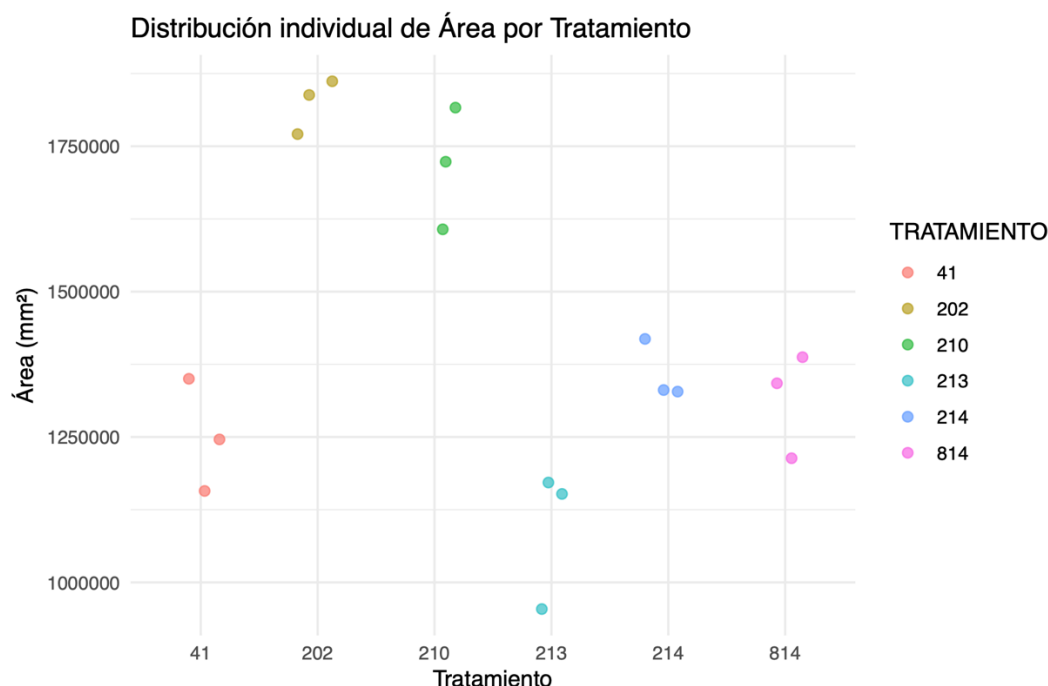
Estadísticos descriptivos del área de raíces por portainjerto

Tratamiento	Media (mm ²)	DE	N	EE	CV (%)
41	12510,7	965,3	3	557,3	7,7
202	18235,7	471,3	3	272,1	2,6
210	17156,3	1048,4	3	605,3	6,1
213	10926,9	1203,4	3	694,8	11,0
214	13591,8	515,3	3	297,5	3,8
814	13144,0	902,0	3	520,8	6,9

Nota. DE: Desviación estándar. EE: Error estándar. CV: Coeficiente de variación.

Figura 12

Distribución individual del área total de raíces (mm²) para cada portainjerto evaluado



Según los datos de la tabla 8 y la figura 12, el portainjerto G.202 presentó el mayor valor promedio de área radicular (18235,7 cm²), seguido por G.210 (17156,3 cm²), mientras que G.213 mostró el menor valor promedio (10926,9 cm²). Los coeficientes de variación fueron relativamente bajos, destacándose G.202 y G.214 por su alta homogeneidad (CV de 2,6% y 3,8%, respectivamente), en contraste con G.213, que presentó la mayor variabilidad entre repeticiones (CV de 11,0%).

5.3.1 Análisis de varianza (ANOVA)

Previo al análisis de varianza, como en las otras variables se verificaron los supuestos de homogeneidad de varianzas y normalidad de los residuos, donde los mismos fueron cumplidos correctamente.

Se realizó el análisis de varianza, que evidenció diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.0000035$), confirmando que el tipo de portainjerto tiene un efecto significativo sobre el desarrollo superficial del sistema radicular. Por otra parte, el factor bloque no presentó diferencias significativas ($p = 0.1302$), lo que sugiere que la variabilidad espacial dentro del ensayo no influyó en la variable analizada.

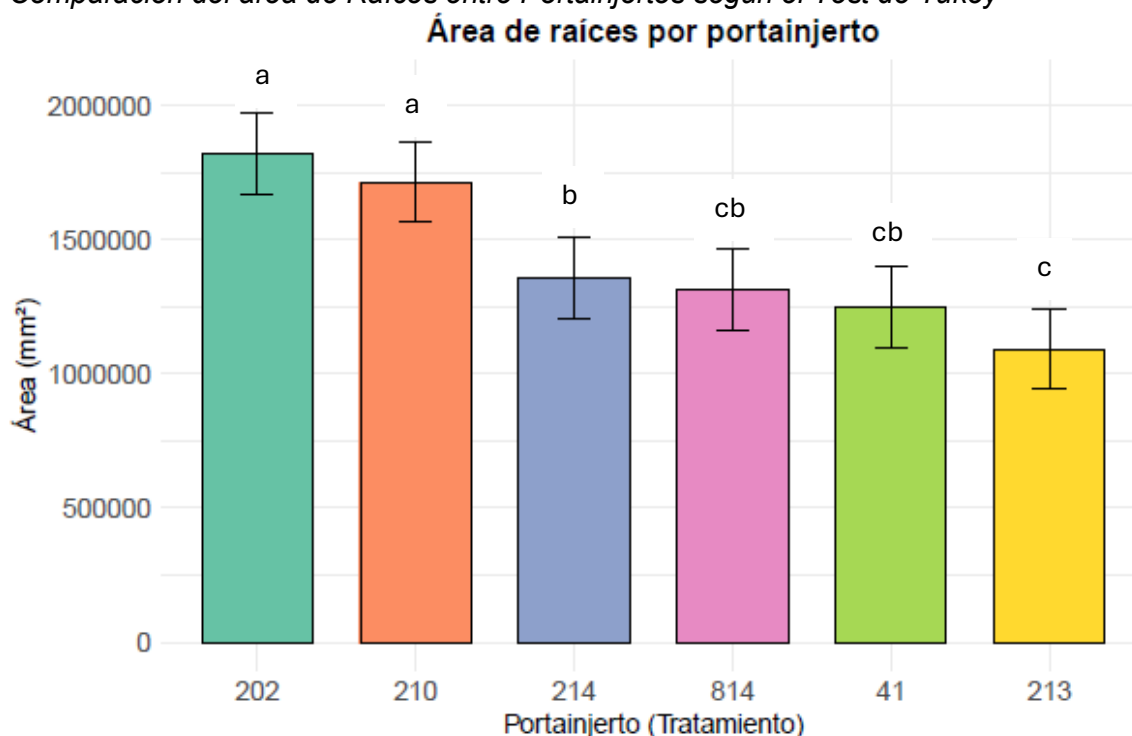
5.3.2 Comparación múltiple: Test de Tukey

Al detectarse diferencias significativas en el área total de raíces entre los portainjertos, se procedió a realizar una comparación múltiple mediante el test de Tukey HSD (Honest Significant Difference) para identificar cuáles portainjertos presentan diferencias significativas entre sí.

Los resultados del test de Tukey se muestran en la Figura 13. Las letras iguales indican que los portainjertos forman un grupo homogéneo sin diferencias significativas entre ellos, mientras que letras diferentes señalan diferencias significativas en el área de raíces.

Figura 13

Comparación del área de Raíces entre Portainjertos según el Test de Tukey



De acuerdo con los resultados de Tukey:

Este grafico de barras refleja que los portainjertos G.202 y G.210 tienen mayor área de raíces en comparación con el resto, mientras que G.213 registra el menor valor de área radicular, sin diferencias respecto de G.814 y G.41. El portainjerto G.214 presenta un valor intermedio.

5.4 DISTRIBUCIÓN DE RAÍCES SEGÚN PROFUNDIDADES

Como se describió en la sección 4.5, para cada portainjerto se obtuvieron datos de longitud total de raíces, volumen de raíces y área de raíces en diferentes profundidades del suelo: 0–20 cm, 20–40 cm, 40–60 cm y 60–80 cm. El objetivo de este análisis es describir cómo se distribuye el sistema radicular a lo largo del perfil del suelo, observando la tendencia de concentración o disminución de las raíces con el aumento de la profundidad. Además, se busca identificar posibles diferencias entre los portainjertos en cuanto a su capacidad para explorar las capas más profundas del suelo.

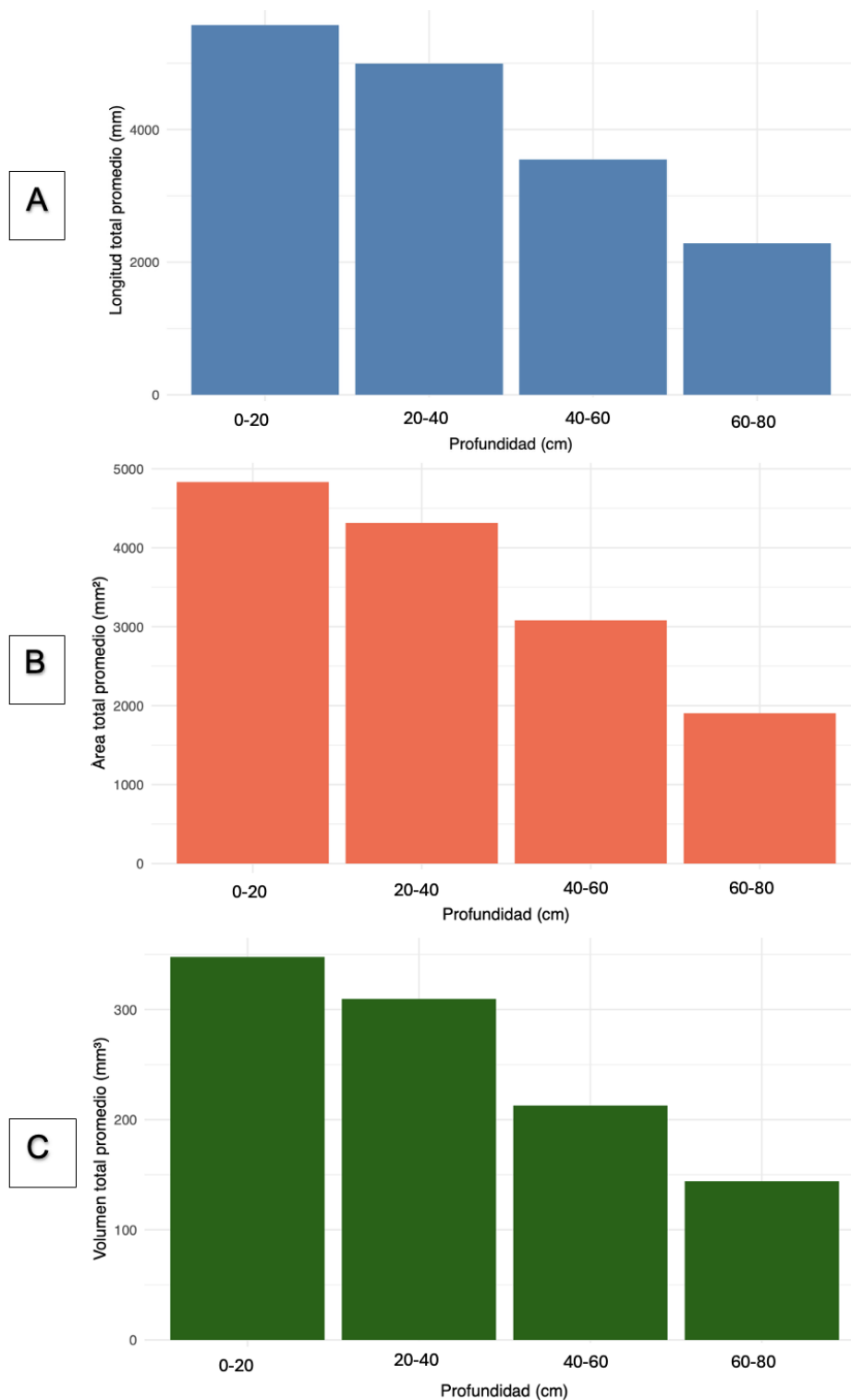
Como se mencionó anteriormente, para las tres variables analizadas (longitud, volumen y área de raíces) se encontraron diferencias significativas entre los portainjertos, lo que sugiere que el comportamiento del sistema radicular varía según el genotipo. A continuación, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para evaluar si existen diferencias significativas en la distribución de raíces entre las distintas profundidades del suelo, así como posibles interacciones entre profundidad y portainjerto. Este análisis permite determinar si la distribución de raíces es uniforme a lo largo del perfil o si existen estratos donde se concentran en mayor medida, y si dicha distribución varía entre portainjertos.

El análisis de varianza (ANOVA) confirmó que hubo diferencias significativas tanto entre los portainjertos ($F = 3.243$; $p = 0.0133$) como entre las distintas profundidades del suelo ($F = 2.917$; $p = 0.0436$), lo que indica que la longitud, volumen y área total de raíces varían según estas dos variables. No obstante, la interacción entre portainjerto y profundidad no resultó significativa ($F = 0.062$; $p = 0,9$), lo que sugiere que la forma en que se distribuyen las raíces a lo largo del perfil del suelo fue similar para todos los portainjertos evaluados.

Dado que no se encontraron diferencias significativas en la interacción, no se incluirán gráficos individuales por portainjerto. En su lugar, para representar visualmente la distribución del sistema radicular a lo largo del perfil del suelo que, si dieron diferencias significativas, se construyeron gráficos de barras (figura 14) para cada una de las variables evaluadas, longitud total de raíces, volumen total de raíces y área total de raíces. En cada gráfico, se calculó el promedio general de cada variable para cada uno de los cuatro estratos de profundidad, integrando los valores de todos los portainjertos. Esta representación permite observar la tendencia general de la distribución de raíces en el perfil del suelo, sin distinciones significativas entre portainjertos.

Figura 14

Distribución de la longitud, área y volumen de raíces según la profundidad



Nota. **A.** Distribución de la longitud de raíces según profundidad. **B.** Distribución del área de raíces según profundidad. **C.** Distribución del volumen de raíces según profundidad.

El análisis de los gráficos de la figura 14 indica que, del análisis de las variables longitud y área de raíces se puede determinar a partir de los gráficos que ambas muestran una disminución progresiva a medida que se incrementa la profundidad del suelo. Se puede observar que las raíces se concentran en las primeras capas (0-20 cm), aunque también es relevante la concentración en la profundidad de 20 a 40 cm, con una caída a medida que descienden en el perfil. Este patrón sugiere que la mayor parte de la actividad radicular ocurre en las capas superiores del suelo, donde encuentran más recursos como agua y nutrientes. En cuanto a la variable volumen de raíces, se observa un comportamiento similar a la longitud y área de las raíces, en donde también sigue un patrón de disminución en función de la profundidad. Las raíces presentan un mayor volumen en las capas superiores del suelo, lo que indica que las raíces están más desarrolladas en las primeras capas, pero disminuyen considerablemente en las capas más profundas.

En lo que refiere al porcentaje de raíces en distintas profundidades, en este trabajo, se observa que aproximadamente entre el 30 y 40 % del crecimiento radicular (en términos de longitud, volumen y área) se concentró en la capa más superficial del suelo (0–20 cm), y en los primeros 40 cm se acumuló entre el 60 y 70 % de las raíces.

6. DISCUSIÓN

6.1. COMPORTAMIENTO DE LOS PORTAINJERTOS SEGUN EL DESAROLLO DEL SISTEMA RADICULAR

Los resultados mostraron diferencias significativas entre portainjertos, aunque las tres variables analizadas mantuvieron un patrón de comportamiento similar en todos los portainjertos evaluados. Los portainjertos G.202 y G.210 registraron los valores más altos de longitud, volumen y área radicular. En un nivel intermedio se ubicaron G.214, G.814 y G.41, mientras que G.213 presentó los valores más bajos en las tres variables

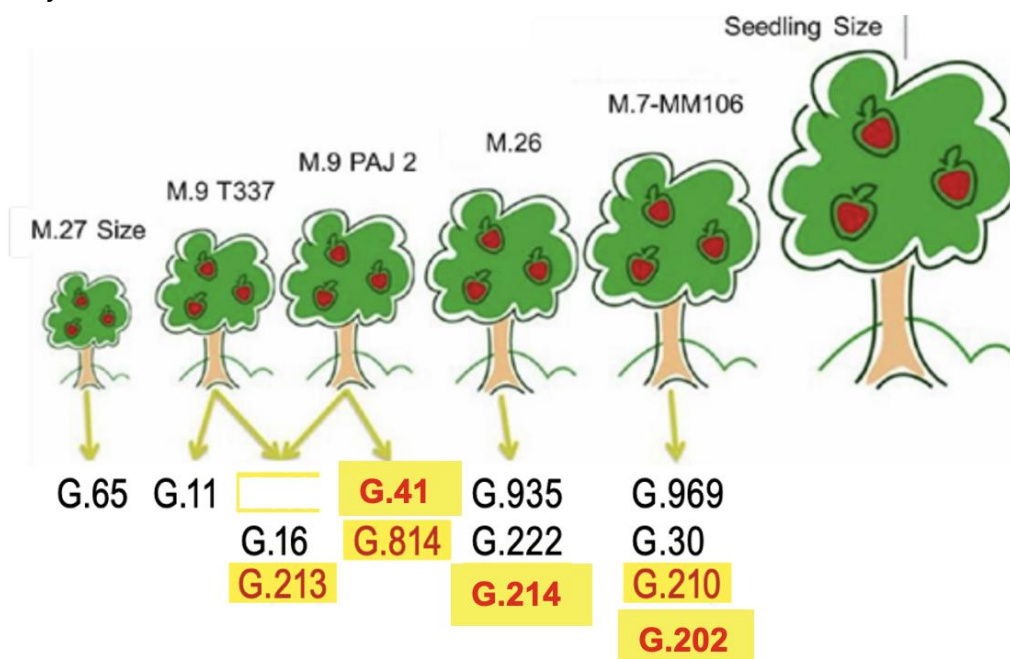
La relevancia de estas variables ha sido demostrada en diversos estudios, donde se evidencio que un sistema radicular más desarrollado, en términos de mayor longitud, volumen y superficie, se asocia con un mayor vigor del árbol. Zhang et al. (2021) encontraron una correlación positiva entre los parámetros del sistema radicular (área proyectada y superficie total de raíces) y el desarrollo de la parte aérea en manzano, incluyendo el volumen y número de ramas. En este sentido, los portainjertos con sistemas radiculares más desarrollados tenderían a inducir un mayor crecimiento del árbol, por lo que estas variables pueden ser utilizadas como indicadores indirectos de vigor. Además, Ma et al. (2013) observaron que los portainjertos más vigorosos presentan raíces más profundas y con mayor biomasa, lo cual refuerza su capacidad de exploración del suelo y contribuye al desarrollo vegetativo de la parte aérea.

El análisis de los resultados indica que los portainjertos G.210 y G.202, al presentar mayores valores de longitud, volumen y área del sistema radicular, serían los que conferirían un mayor vigor a los árboles. En un nivel intermedio se ubicaron G.214, G.814 y G.41, mientras que G.213, con los valores más bajos, se asoció a un vigor reducido. Estos resultados son similares en general a la escala de vigor que se presenta en la figura 2, donde los portainjertos se agrupan visualmente según el tamaño de árbol que inducen. En dicha figura, G.210 es clasificado como más vigoroso que G.202; sin embargo, en nuestro estudio no se observaron diferencias significativas entre ellos, aunque G.202 presentó una media levemente superior. Asimismo, la figura ubica a G.213 y G.41 dentro del mismo grupo de vigor reducido, mientras que en nuestros resultados G.213 se posicionó como el de menor vigor, y G.41 mostró un comportamiento más similar al de los portainjertos de vigor intermedio, como G.214 y G.814. Estas diferencias podrían atribuirse a las condiciones edafoclimáticas locales, al manejo del ensayo, entre otras.

Con el fin de visualizar estas diferencias, se elaboró una adaptación de la figura 2, incorporando los resultados obtenidos en este ensayo. Esta representación permite comparar de forma directa la posición relativa de cada portainjerto respecto a la escala de vigor mencionada, tal como se presenta en la figura 15.

Figura 15

Adaptación de la escala de vigor de portainjertos con los resultados obtenidos en este ensayo



En otros trabajos también se han evaluado el vigor de portainjertos de la serie Geneva®, como en un trabajo realizado en el estado de Nueva York por Robinson et al. (2011), en el que se evaluó el rendimiento y vigor de varios portainjertos Geneva® en ensayos de campo con cultivares 'Golden Delicious' y 'Honeycrisp'. En este estudio, Geneva® 41 (G.41) fue clasificado como un portainjerto enanizante, con un vigor similar a M.9. Este hallazgo es parcialmente parecido con nuestros resultados, ya que si bien G.41 no siempre mostró diferencias significativas con G.214 y G.814 en las variables de longitud, volumen y área del sistema radicular, consistentemente presentó una media inferior, ubicándose en el grupo de menor vigor o en el límite inferior del grupo intermedio. En cuanto a Geneva® 202, el estudio lo ubicó dentro del grupo de portainjertos con vigor intermedio, ligeramente más vigoroso que M.9 pero menor que M.7. También se destacó por su alta eficiencia productiva, comparable a la de M.9. Estos resultados coinciden en parte con nuestras observaciones, ya que en nuestro estudio este portainjerto presentó los valores más altos en el sistema radicular, lo cual podría indicar un vigor aún mayor bajo nuestras condiciones experimentales.

Es importante considerar que algunas diferencias menores entre estos resultados y los reportados por Robinson et al. (2011) podrían atribuirse a la interacción específica entre portainjerto y cultivar, dado que nuestro ensayo se realizó con el cultivar 'Lady in Red', mientras que Robinson et al. (2011) evaluaron 'Golden Delicious' y 'Honeycrisp'. Estas interacciones pueden influir en el vigor y desarrollo radicular, sugiriendo que los efectos observados podrían variar según la combinación portainjerto-cultivar utilizada en cada estudio.

Finalmente, considerando que en Uruguay los portainjertos más utilizados históricamente han sido M.9 y M.7 (Cabrera & Rodríguez, 2020; Mondino et al., 2018), los resultados de este estudio permiten sugerir alternativas viables dentro de la serie Geneva®. En particular, G.213, por su menor desarrollo radicular, podría representar una opción para sustituir a M.9 en sistemas de alta densidad donde se busca un porte

enanizante y un control estricto del crecimiento del árbol. Por otro lado, G.202 y G.210, con sistemas radiculares más desarrollados y un mayor potencial de vigor según nuestros resultados, podrían ser considerados como alternativas a M.7. Esta característica debe ser considerada al momento de definir la densidad de plantación y el sistema de conducción, ya que estos portainjertos podrían requerir más espacio y manejo específico para optimizar su desarrollo.

6.2. DISTRIBUCCION VERTICAL DE RAICES EN PROFUNDIDAD

Los resultados obtenidos en este estudio confirman un patrón ampliamente reportado en la literatura: la mayor concentración de raíces del manzano se encuentra en las capas superficiales del suelo. En nuestro ensayo, entre el 60 y 70 % de la longitud total de raíces se ubicó en los primeros 40 cm del perfil del suelo, es decir, en las capas más superficiales. Este resultado es coherente con lo observado por Ma et al. (2013), De Silva et al. (1999) y Thomaj et al. (2019), quienes reportaron una disminución exponencial de la densidad radicular con la profundidad, con una acumulación significativa de raíces finas en los primeros 40 a 60 cm del perfil, lo que respalda la observación de que la mayor parte de la actividad radicular ocurre en las capas superficiales del suelo, donde el acceso al agua, oxígeno y nutrientes es más favorable.

Asimismo, nuestros resultados coinciden con los hallazgos de Gjamovski et al. (2018), quienes señalaron que la mayor proporción de raíces finas, responsables principalmente de la absorción de agua y nutrientes, se concentra entre los 0 y 40 cm de profundidad, con una acumulación destacada en los primeros 20 cm. De forma complementaria, la revisión realizada por Atkinson (1980) respalda esta tendencia general, indicando que los primeros 30 a 40 cm del perfil del suelo suelen albergar la mayor densidad radicular en el manzano.

Sin embargo, se observó algo distinto en este trabajo. A pesar de evaluarse portainjertos de diferente vigor (G.202 y G.210, considerados más vigorosos, y G.214, G.814, G.213, más enanizantes), no se detectó interacción significativa entre portainjerto y profundidad. Es decir, la distribución vertical del sistema radicular fue similar entre los distintos portainjertos Geneva evaluados, lo cual contrasta con varios estudios previos que sí reportan diferencias atribuibles al vigor del patrón. Esto indicaría que todos los portainjertos exploran principalmente las capas superficiales del suelo, independientemente de su vigor relativo.

Por ejemplo, Fernández et al. (1995) y Ma et al. (2013) observaron que los portainjertos más vigorosos tienden a desarrollar sistemas radiculares más profundos, mientras que los enanizantes concentran sus raíces en los estratos superficiales. Gjamovski et al. (2018) también reportaron diferencias entre portainjertos enanizantes respecto al perfil de distribución. No obstante, en nuestro caso, todos los portainjertos Geneva presentaron un perfil de distribución vertical muy similar, independientemente de su nivel de vigor relativo.

Este resultado podría explicarse por varias razones. Las condiciones edáficas, el tipo de suelo, el régimen de riego y la edad de los árboles (relativamente jóvenes) podrían haber contribuido a atenuar las diferencias entre genotipos. Por ejemplo, De Silva et al. (1999) observaron que las diferencias entre portainjertos se reducen con la edad del árbol, mientras que Thomaj et al. (2019) encontraron que los patrones de distribución cambian con el tiempo, con raíces desplazándose gradualmente hacia capas más profundas en árboles más viejos. En nuestro ensayo, realizado sobre árboles

jóvenes, es posible que aún no se hayan expresado completamente las diferencias potenciales entre portainjertos en cuanto a su arquitectura radicular.

En resumen, los resultados obtenidos corroboran el patrón general de concentración de raíces en las capas superficiales del suelo en manzanos. No obstante, en esta etapa juvenil no se detectaron diferencias significativas en la distribución vertical del sistema radicular entre portainjertos de distinto vigor, a diferencia de lo reportado por Fernández et al. (1995) y Ma et al. (2013), quienes observaron que portainjertos con diferentes niveles de vigor distribuyen sus raíces de manera diferente en el perfil del suelo. A partir de estos resultados, se plantea la hipótesis de que dichas diferencias podrían manifestarse en etapas más avanzadas del desarrollo arbóreo, lo que hace necesario realizar evaluaciones en árboles de mayor edad para confirmar o refutar esta posibilidad.

7. CONCLUSIÓN

El análisis conjunto de las variables morfológicas del sistema radicular: longitud, volumen y área de raíces, permitió caracterizar de manera integral el comportamiento de seis portainjertos de la serie Geneva bajo las condiciones del ensayo. Se observaron diferencias significativas entre genotipos en las tres variables de estudio, lo que evidencia que el desarrollo del sistema radicular varía según el portainjerto.

En términos generales, los portainjertos G.202 y G.210 se destacaron por presentar los mayores valores promedios de longitud, volumen y área de raíces, ubicándose consistentemente en el grupo superior en todos los análisis, lo que indica un sistema radicular más desarrollado y potencialmente más eficiente en la exploración del suelo. Ambos mostraron además una baja variabilidad entre repeticiones, lo que sugiere estabilidad en su comportamiento.

En contraste, el portainjerto G.213 presentó los valores más bajos para las tres variables, diferenciándose significativamente de los de mayor desarrollo en el test de Tukey, y evidenciando también la mayor variabilidad entre repeticiones, lo que puede reflejar una menor uniformidad o sensibilidad a factores micro ambientales.

Los portainjertos G.214, G.814 y G.41 mostraron valores intermedios, sin diferencias significativas entre ellos en varios de los análisis. En particular, G.214 se posicionó de forma intermedia a alta en algunas variables, mientras que los portainjertos G.814 y G.41 tendieron a agruparse con G.213 en los grupos de menor desarrollo radicular.

Además, al analizar la distribución en profundidad de las raíces, se observó que la mayor proporción de longitud, volumen y área radicular se concentró en los primeros 20 cm de profundidad en el perfil del suelo, con una disminución progresiva en los estratos inferiores. Esta distribución, común en frutales sobre portainjertos clonales, resalta la importancia de una adecuada preparación del perfil superficial del suelo, así como del manejo del riego y fertilización en las capas más activas.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Ackermann, M. N., & Díaz, A. (2022). Frutales de hoja caduca: Situación y perspectivas. En *Anuario OPYPA 2022* (pp. 299-316). MGAP.
<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/anuario-opypa-2022/analisis-sectorial-cadenas-productivas/frutales-hoja>
- Agustí, M. (2022). *Fruticultura* (3ª ed.). Mundi Prensa.
- Albornoz Gutiérrez, F. (2014). Absorción de nutrientes por las raíces y transporte dentro de la planta. En J. Hirzel Campos (Ed.), *Diagnóstico nutricional y principios de fertilización en frutales y vides* (pp. 171-191). INIA.
<https://www.researchgate.net/publication/325402709>
- Allendes Lagos, G. (s.f.). *La importancia de las raíces en cultivos frutales*. Consultas Agrícolas. <https://consultasagricolas.com/2020/10/19/la-importancia-de-las-raices-en-cultivos-frutales/>
- Apple rootstocks*. (2022, 31 de mayo). Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.
<https://www.ontario.ca/page/apple-rootstocks>
- Aruani, M. C., & Behmer, S. (2004). Efecto de la granulometría y la compactación del suelo sobre la distribución de raíces en manzano. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 33(2), 43-53. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86433204>
- Atkinson, D. (1980). The distribution and effectiveness of the roots of tree crops. *Horticultural Reviews*, 2, 424-490. <https://doi.org/10.1002/9781118060759.ch9>
- Böhm, W. (1979). *Methods of studying root systems*. Springer-Verlag.
- Bulatovic-Danilovich, M. (2023). *Rootstocks for Apples*. West Virginia University.
<https://extension.wvu.edu/agriculture/horticulture/apple-rootstocks>
- Cabrera, D., & Rodríguez, P. (2020). Evaluación de portainjertos para manzano - Portainjertos de la serie Geneva®: Mayor eficiencia y sostenibilidad en la producción de manzana. *Revista INIA*, (61), 73-76.
<https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-73-76.pdf>
- CID Bio-Science. (2014). *CI-690 RootSnap!: Operations manual*.
https://cid-inc.com/static/media/uploads/manuals/ci690rootsnap_manual.pdf
- Claffey, S., & Farquh, M. (2022). *All about apple rootstocks*. University of Maryland Extension. https://extension.umd.edu/sites/extension.umd.edu/files/publications/AllAboutAppleRootStocks_FS_2022-0638.pdf
- Crassweller, R., & Schupp, J. (2023, 24 de marzo). *Apple rootstocks: Capabilities and limitations*. Penn State Extension. <https://extension.psu.edu/apple-rootstocks-capabilities-and-limitations>
- Cummins, J. N., & Aldwinckle, H. S. (1995). Breeding rootstocks for tree fruit crops. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 23(4), 395-402.
<https://doi.org/10.1080/01140671.1995.9513915>

- De Angelis, V., & Calvo, P. (2018). *Portainjertos de manzano*. INTA. https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/3951/INTA_CRPatagoniaNorte_EEAAltoValle_DeAngelis_V_Portainjertos_de_manzano.pdf
- De Silva, H. N., Hall, A. J., Tustin, D. S., & Gandar, P. W. (1999). Analysis of distribution of root length density of apple trees on different dwarfing rootstocks. *Annals of Botany*, 83(4), 335-345. <https://doi.org/10.1006/anbo.1999.0829>
- Dini, M., Cabrera, D., & Zoppolo, R. (2023). Cultivares locales, portainjertos y mejoramiento frutícola. En G. P. García-Inza, J. M. Paruelo, & R. Zoppolo (Eds.), *Aportes científicos y tecnológicos del INIA a las trayectorias agroecológicas* (pp. 347-372). CICCUS. <https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/Aportes-cientificos-y-tecnologicos-del-INIA-a-trayectorias-agroecologicas.pdf>
- Dininy, S. (2018, 20 de febrero). *¿Con qué portainjerto debe cultivar?* Good Fruit Grower en Español. <https://www.goodfruit.com/es/con-que-portainjerto-debe-cultivar/>
- Dirección General de la Granja (2024). *Registro Nacional Frutihortícola: Reporte anual 2024*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/REPORTE%20RNFH%202024.pdf>
- Dirección General de Servicios Agrícolas. (2023, 29 de diciembre). *Resolución N.º 1.173/2023: Tarifas para todos los servicios prestados por la Dirección General de Servicios Agrícolas, a regir a partir del 1.º de enero de 2024 hasta el 30 de junio*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/institucional/normativa/resolucion-n-1173023-tarifas-para-todos-servicios-prestados-direccion>
- Dong, S., Scagel, C. F., Cheng, L., Fuchigami, L. H., & Rygiewicz, P. T. (2001). Soil temperature and plant growth stage influence nitrogen uptake and amino acid concentration of apple during early spring growth. *Tree Physiology*, 21(8), 541-547. <https://doi.org/10.1093/treephys/21.8.541>
- DuPont, T., Granatstein, D., & Sallato, B. (2020). *Soil health in orchards*. Washington State University Extension. https://s3.us-west-2.amazonaws.com/treefruit.wsu.edu/wp-content/uploads/2020/11/23134102/EM120E_Soil-Health-in-Orchards.pdf
- Equipo editorial INTAGRI. (s.f.). *Sistemas de conducción en manzano*. INTAGRI. <https://www.intagri.com/articulos/frutales/sistemas-de-conduccion-en-manzano>
- Farcu, M. (2022, 31 de octubre). *Portainjertos de manzanas: Importancia y selección*. Extensión en Español. <https://extensionesp.umd.edu/2022/10/31/portainjertos-de-manzanas-importancia-y-seleccion/>
- Fazio, G., Aldwinckle, H., & Robinson, T. (2013). Unique characteristics of Geneva® apple rootstocks. *New York Fruit Quarterly*, 21(2), 25-28. <https://nyshs.org/wp-content/uploads/2016/10/Pages-25-28-from-NYFQ-Book-Fall-2013-7.pdf>

- Fazio, G., Kviklys, D., Grusak, M. A., & Robinson, T. (2012). Soil pH, soil type and replant disease affect growth and nutrient absorption of apple rootstocks. *New York Fruit Quarterly*, 20(1), 22-28. <https://nyshs.org/wp-content/uploads/2016/10/5.Soil-pH-Soil-Type-and-Replant-Disease-Affect-Growth-and-Nutrient-Absorption-of-Apple-Rootstocks.pdf>
- Fazio, G., Robinson, T. L., & Aldwinckle, H. S. (2015). The Geneva apple rootstock breeding program. *Plant Breeding Reviews*, 39, 379-401. <https://doi.org/10.1002/9781119107743.ch8>
- Fernández, R. T., Perry, R. L., & Ferree, D. C. (1995). Root distribution patterns of nine apple rootstock in two contrasting soil types. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 120(1), 6-13. <https://doi.org/10.21273/JASHS.120.1.6>
- Fischer, G. (2005). Aspectos de la fisiología aplicada de los frutales promisorios en cultivo y poscosecha. *Revista Comalfi*, 32(1), 22-34. https://www.researchgate.net/profile/Gerhard_Fischer/publication/257363534_Aspectos_de_la_fisiologia_aplicada_de_los_frutales_promisorios_en_cultivo_y_poscosecha/links/02e7e5250b7c3cb597000000/Aspectos-de-la-fisiologia-aplicada-de-los-frutales-promisorios-en-cultivo-y-poscosecha.pdf
- García Luis, A., & Guardiola, J. L. (2008). Transporte en el floema. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Coord.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (2ª ed., pp. 81-102). McGraw-Hill. <https://ia600202.us.archive.org/1/items/fisiologia-vegetal/FISIOLOGIA%20VEGETAL%20.pdf>
- Gayosso-Rosales, L. Y., Rojas-Martínez, R. I., de Folter, S., Ochoa-Martínez, D. L., Silva-Valenzuela, M., & Zavaleta-Mejía, E. (2023). Transportadores de azúcar en las interacciones planta-hongos endófitos benéficos y planta-nematodos fitopatógenos. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 29(3), 59-78. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2022.11.016>
- Gil-Albert, F. (1995). *Tratado de arboricultura frutal: Vol. 1. Morfología y fisiología del árbol frutal* (4ª ed.). Mundi Prensas. https://books.google.com.uy/books?id=-gfaq5rddaMC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Gjamovski, V., Kiprijanovski, M., & Arsov, T. (2018). Distribution of root system at apple CV. Granny Smith grafted on different dwarfing rootstocks. *Contributions, Section of Natural, Mathematical and Biotechnical Sciences, MASA*, 39(1), 69-74. https://www.researchgate.net/publication/326143781_DISTRIBUTION_OF_ROOT_SYSTEM_AT_APPLE_CV_GRANNY_SMITH_GRAFTED_ON_DIFFERENT_DWARFING_ROOTSTOCKS
- Goldschmidt, E. E. (2014). Plant grafting: New mechanisms, evolutionary implications. *Frontiers in Plant Science*, 5, Artículo e727. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00727>
- Google Earth. (2023). [Las Brujas, Canelones, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 5 de junio de 2025, de https://earth.google.com/web/search/INIA+Las+Brujas,+Departamento+de+Canelones/@-34.67096802,-56.34121441,30.10058647a,679.96109335d,34.9996072y,0h,0t,0r/data=CpkBGmsSZQoIMHg5NWExYzhkNzFkNzIyMTkzOjB4MjVhYmYxZTc2OTU2YTUyYhneq2h65FVBwCHtBQvMrytMwCoqSU5JQSBMYXMgQnJ1amFzLCBEZXhbcnRhbWVudG8gZGUgQ2FuZWxvbmVzGAlgASlmCiQJ-96bnspVQcAR7oprhxVWQcAZJbRbRT4rTMAhk_4Y-N4rTMBCAggBOgMKATBCAggASg0l_ARAA

- Hirzel, J., & Rodríguez, N. (2018, 26 de febrero). *Manejo de frutales: La fertilización de postcosecha*. Portal Frutícola. <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/02/26/manejo-de-frutales-la-fertilizacion-de-postcosecha/>
- Iglesias, I., Macedo, T., Peverelli, A., Rodríguez, P., & Cabrera, D. (2022). Innovación en fruticultura: La respuesta a los retos para una producción sostenible de manzana. *Revista INIA*, (71), 98-102. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/16936/1/INIA-71-diciembre-2022-Iglesias.pdf>
- Instituto Nacional de Semillas. (2006). *Producción de materiales de propagación de hoja caduca de clase certificada*. INASE. <https://www.inase.uy/Files/Docs/4CBB86673E5D7623.pdf>
- Kosina, J. (2002). Evaluation of some dwarf apple rootstocks. *Horticultural Science*, 29(1), 23-25. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/hor/2002/01/05.pdf>
- Lawrence, B. T., Fazio, G., Nieto, L. G., & Robinson, T. L. (2025). Rootstock effect on horticultural performance and fruit quality is not uniform across five commercial apple cultivars in western New York. *Frontiers in Plant Science*, 16, Artículo e1552625. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1552625>
- Ma, L., Hou, C. W., Zhang, X. Z., Li, H. L., Han, D. G., Wang, Y., & Han, Z. H. (2013). Seasonal growth and spatial distribution of apple tree roots on different rootstocks or interstems. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 138(2), 79-87. <https://doi.org/10.21273/JASHS.138.2.79>
- Mandl Motta, B. (1990). *Portainjertos del manzano*. INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2842/1/111219220807113842.pdf>
- Manzana. (s.f.). MAG. <https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-0658manzana.pdf>
- Marini, R. P., & Fazio, G. (2018). Apple rootstocks: History, physiology, management, and breeding. *Horticultural Reviews*, 45, 197-311. <https://doi.org/10.1002/9781119431077.ch6>
- McMichael, B. L., & Taylor, H. M. (1987). Applications and limitations of Rhizotrons and Minirhizotrons. En H. M. Taylor (Ed.), *Minirhizotron observation tubes: Methods and applications for measuring Rhizosphere dynamics* (pp. 1-13). ASA; CSSA; SSSA. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub50.c1>
- Mondino, P., Fourment, M., Severino, V., Silveira, A. C., Leoni, C., Mujica, V., Cabrera, D., Rabellino, F., Cescato, I., Buschiazzi, M., & Carrega, E. (2018). *Normas para la Producción Integrada de Manzano: Actualización 2018*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/norma_pi_manzana_actualizacion_2018_0.pdf
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2023). *FAOSTAT: Cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL/visualize>

- Reig, G., Lordan, J., Hoying, S., Fargione, M., Donahue, D. J., Francescatto, P., Acimovic, D., Fazio, G., & Robinson, T. (2020). Long-term performance of 'Delicious' apple trees grafted on Geneva® rootstocks and trained to four high-density systems under New York State climatic conditions. *HortScience*, 55(10), 1538-1550. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14904-20>
- Rienzi, E., & Maggi, A. (2007). Manejo y conservación de suelos de sistemas frutícolas. En G. Sozzi (Ed), *Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (pp. 345-394). Universidad de Buenos Aires.
- Robinson, T. L. (2003). Apple-orchard planting systems. En D. C. Ferree & I. J. Warrington (Eds.), *Apples: Botany, production and uses* (pp. 346-400). CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20073012721>
- Robinson, T. L., Fazio, G., Holleran, T., & Aldwinckle, H. S. (2003). The Geneva series of apple rootstocks from Cornell: Performance, disease resistance, and commercialization. *Acta Horticulturae*, (622), 513-520. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.622.56>
- Robinson, T. L., Hoying, S. A., & Fazio, G. (2011). Performance of Geneva rootstocks in on-farm trials in New York State. *Acta Horticulturae*, (903), 249-255. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.31>
- Rufato, L., Luz, A. R., Rufato, D. P., Kretschmar, A. A., de Macedo, T. A., da Silva, P. S., & Bogo, A. (2022). Changing the perspective of apple culture in Brazil with the Geneva® series rootstocks. *Acta Horticulturae*, (1346), 633-640. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2022.1346.79>
- Taylor, H. M. (1986). Methods of studying root systems in the field. *HortScience*, 21(4), 952-956.
- Thomaj, F., Domi, H., Sallaku, G., & Balliu, A. (2019). The spatial distribution of root system in M9 rootstock is affected by apple cultivar and tree age. *Journal of Agricultural Studies*, 7(4), 160-175. <https://doi.org/10.5296/jas.v7i4.15482>
- Trimble, S. (2020, 14 de octubre). *Crops, nutrients, irrigation & root analysis*. CID Bio-Science. <https://cid-inc.com/blog/plantcrop-root-analysis-in-the-field-industries-uses/>
- Urbino Vallejo, V. (2001). *Morfología y desarrollo vegetativo de los frutales*. Paperkite. <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/a9dcb01e-93ac-4205-8dcd-f069da9ae169/content>
- Viale, S., Guevara, E., Tamiozzo, L., & Llanos Viale, A. (2016). *Constitución del árbol frutal: Organografía de frutales rosáceos*. UniRío editora. https://www.produccionvegetalunrc.org/images/fotos/37_978-987-688-199-9.pdf
- Zhang, Z., Li, M., Yao, J., Zhou, Y., Wang, Y., Zhang, X., Li, W., Wu, T., Han, Z., Xu, X., & Qiu, C. (2021). Root architecture characteristics of differing size-controlling rootstocks and the influence on the growth of 'Red Fuji' apple trees. *Scientia Horticulturae*, 281, Artículo e109959. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.109959>