

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EVALUACIÓN DE RAÍCES EN PORTAINJERTOS SERIE GENEVA ®

por

Antonio SARACHO POSES
Cinthy ZUAZOLA PETEIRO

**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 – Sin Obra Derivada**”.



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (Dra.) Vivian Severino

Ing. Agr. (Dr.) Bruno Carra

Tribunal:

Ing. Agr. (Dra.) Mercedes Arias

Ing. Agr. (Dr.) Gerardo Echeverría

Ing. Agr. (Dr.) Bruno Carra

Fecha:

19 de diciembre de 2025

Estudiante:

Antonio Saracho Poses

Cinthya Zuazola Peteiro

AGRADECIMIENTOS

Gracias al grupo disciplinario de ecofisiología y manejo de frutales de Facultad de Agronomía (FAGRO) y al Instituto Nacional de investigación Agropecuaria (INIA) por la oportunidad de poder realizar este trabajo.

Agradecemos a nuestra tutora Vivian Severino por la guía y ayuda durante este trabajo. Gracias Bruno Wlasiuk quien nos ayudó en muchas de las mediciones y Bruno Carra que nos recibió siempre en la estación.

Agradecemos a nuestras familias que nos hicieron el aguante todo este tiempo y nunca dejaron de creer en nosotros.

Gracias a nuestros amigos que están siempre para darnos para adelante y apoyarnos, especialmente a la barra de 4to de 2022.

Especialmente agradecemos a nuestras parejas, siempre estuvieron ahí en las malas y las buenas.

Gracias a todos los que en alguna forma contribuyeron a la realización de este trabajo y que hicieron posible que llegáramos a este momento de la carrera.

Agradecemos el compañero que elegimos de tesis y a la amistad que nos une, gracias.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN.....	3
AGRADECIMIENTOS.....	4
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	7
RESUMEN.....	8
ABSTRACT.....	10
1 INTRODUCCIÓN	11
1.1 Objetivos	12
2 MARCO CONCEPTUAL.....	13
2.1. Caracterización edafoclimática de la región.....	13
2.1.1 Temperaturas.....	13
2.1.2 Precipitaciones.....	15
2.1.3 Oferta de frío	16
2.1.4 Tipos de suelos	17
2.2 Uso de portainjertos (PI) en manzana	18
2.2.1 Historia de mejoramiento de portainjertos clonales.	19
2.2.2 Ventajas y limitantes de portainjertos (PI) Malling 9 y Malling 7.....	20
2.2.3 Transición hacia los portainjertos Geneva®.	21
2.2.4 Características de los portainjertos Geneva®.....	22
2.3 Crecimiento radicular.....	25
2.3.1 Flujo de crecimiento de las raíces en frutales	25
2.3.2 Método de evaluación de raíces.	26
3 MATERIALES Y MÉTODOS	28
3.1 Ubicación del ensayo y diseño experimental	28
3.2 Caracterización del año de estudio.....	29
3.3 Evaluación con escáner de raíces	30
3.4 Mediciones de crecimiento de brindillas	31
3.5 Evaluaciones de crecimiento de frutos	31
3.6 Análisis estadístico.....	32

4	RESULTADOS	33
4.1	Mediciones radicales	33
4.2	Largo de brindillas	35
4.2.1	Largo de brindillas total	35
4.2.2	Largo de brindillas reproductivas	36
4.2.3	Largo de brindillas vegetativas	37
4.3	Área transversal de brindillas	37
4.4	Calibre de frutos	38
4.5	Análisis conjunto de variables	39
5	DISCUSIÓN	42
6	CONCLUSIÓN	45
7	BIBLIOGRAFÍA	46
8	ANEXOS	53

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Figura 1 Temperatura media anual (°C) del Uruguay.....	14
Figura 2 Temperaturas máximas y mínimas anual promedio 1980-2009.	14
Figura 3 Detalle de precipitaciones en el período 1973-2023 y desvío estándar.....	15
Figura 4 Detalle de precipitaciones promedio anual en el país período 1990-2002.....	15
Figura 5 Porciones de frío reportadas el año 2022 para la estación de INIA Las Brujas.	17
Figura 6 Unidades de Richardson reportadas el año 2022 para la estación de INIA Las Brujas.	17
Figura 7 Escala de vigor de portainjertos de manzana.....	23
Figura 8 Detalle de ubicación al predio del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) “Las Brujas”.	28
Figura 9 Detalle de precipitaciones y ETo históricos de 50 años en comparación con período julio 2022 - junio 2023.....	30
Figura 10 Boxplot de largo de raíces en mm por portainjerto	33
Figura 11 Boxplot de longitud de raíces (mm) por portainjerto y profundidad	34
Figura 12 Área de raíces en mm ² a una profundidad de suelo 50-65 cm	35
Figura 13 Boxplot Largo promedio de Brindillas Total (LBT)	36
Figura 14 Área Transversal de brindillas (mm ²).....	37
Figura 15 Evolución del calibre de fruto (mm)	38
Figura 16 Boxplot de los calibres promedios de los frutos según Portainjerto (PI)	39
Figura 17 Gráfico de análisis de componentes principales.....	40
Figura 18 Correlación de las variables mediante Pearson	41
Tabla 1 Medias de Largo de Brindillas Reproductivas.....	36
Tabla 2 Medias de Largo de Brindillas Vegetativas.....	37

RESUMEN

Los portainjertos más utilizados en el cultivo de manzana en Uruguay durante las últimas décadas (M9 y M7), están siendo sustituidos por portainjertos de la serie Geneva. Estos últimos, han sido propuestos en la década del '90 por sus características de resistencia a plagas y enfermedades, así como la tolerancia al replante, entre otras características positivas.

En el año 2001, el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) firma un acuerdo de evaluación con la Universidad de Cornell generando la introducción en el país de dichos portainjertos, realizando una posterior introducción de nuevos materiales de la serie en el año 2017. A pesar de las características positivas reportadas para dicha serie, se tiene incertidumbre respecto al comportamiento agronómico de éstos tanto a nivel mundial como a nivel país.

La dinámica del crecimiento de raíces es uno de los aspectos poco evaluados, siendo éste el primer trabajo de caracterización de portainjertos de la serie Geneva con evaluación de raíces mediante el método de minirizotron en campo.

En el presente estudio fueron evaluadas seis combinaciones de la variedad Lady in Red con los portainjertos más promisorios de la serie Geneva, mediante estudios radiculares, crecimiento aéreo y calibre de fruto. Las evaluaciones fueron realizadas al cuarto año de implantado el cuadro; en el ciclo productivo 2022-2023 en las instalaciones del INIA "Las Brujas", en el departamento de Canelones. Se planteó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones de 3 árboles cada una. La instalación de tubos para medición con escáner de raíces se realizó en la planta central de cada parcela y las variables de crecimiento aéreo y de fruto se evaluaron en 1 rama por árbol por 3 árboles por repetición. El año de estudio presentó condiciones de déficit hídrico severas siendo declarado de emergencia agropecuaria por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. En dicho ciclo, no se observan diferencias significativas entre PI en las variables radiculares evaluadas, exceptuando el área de raíces en profundidad, donde el portainjerto G.210 presentó mayor área de raíces a una profundidad mayor. No se visualizaron diferencias significativas entre los portainjertos en crecimiento de brindillas, a pesar de esto, se puede visualizar una tendencia de mayor crecimiento total en el PI G.213. Se encontraron diferencias significativas en el calibre de fruto, diferenciándose el PI G.213 del G.210.

Consideramos que estos datos son de gran valor a la hora de definir criterios de plantación como marco de plantación, densidad y sistemas de conducción, se deberá

seguir con las mediciones en otros ciclos para poder entender mejor la dinámica de crecimiento de los diferentes sistemas radiculares de estos portainjertos.

Palabras clave: escáner, sistema radicular, minirizotron, *Malus domestica*

ABSTRACT

The rootstocks most used in apple production in Uruguay over the past decades (M.9 and M.7) are being replaced by Geneva series rootstocks. The latter were developed in the 1990s due to their resistance to pests and diseases, as well as their tolerance to replant conditions, among other positive characteristics.

In 2001, the National Institute of Agricultural Research (INIA) signed an evaluation agreement with Cornell University, leading to the introduction of these rootstocks to the country. A further introduction of new materials from the series followed in 2017. Despite the positive characteristics reported for this series, there is uncertainty regarding their agronomic performance both globally and nationally.

Root growth dynamics are one of the aspects that have been under-evaluated. This is the first study to characterize Geneva rootstocks using the mini-rhizotron method in the field.

In this study, six combinations of the Lady in Red variety with the most promising rootstocks of the Geneva series were evaluated through studies of root development, shoot growth, and fruit size. Evaluations were carried out in the fourth year after planting, during the 2022-2023 growing season at the INIA “Las Brujas” facilities in the department of Canelones. A randomized complete block design with three replicates of four trees each was used. Root measurement tubes with a scanner were installed in the central plant of each plot and shoot growth and fruit size variables were evaluated on one branch per tree, with three trees per replicate. The study year presented severe water deficit conditions, leading to an agricultural emergency declaration by the Ministry of Livestock, Agriculture, and Fisheries. During this cycle, no significant differences were observed between rootstocks in the evaluated root variables, except for root area at depth, where rootstock G.210 showed a greater root area at a greater depth. No significant differences were observed between the rootstocks in shoot growth; however, a trend toward greater overall growth was observed in rootstock G.213. Significant differences were found in fruit size, with rootstock G.213 differing from G.210.

We consider these data to be of great value when defining planting criteria such as planting pattern, density, and training systems. Further measurements should be taken in subsequent cycles to better understand the growth dynamics of the different root systems of these rootstocks.

Keywords: scanner, root system, minirhizotron, *Malus domestica*

1 INTRODUCCIÓN

Según los datos obtenidos en FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), s.f.), ingresando a la sección de datos, seleccionando "Producción", luego "Cultivos y productos de ganadería" y desglosando por Región "Mundo > (Lista)"; al obtener el elemento "Área Cosechada" para los productos "Manzanas", "Ciruelas y endrinas", "Cerezas", "Peras", "Membrillos" y "Melocotones (duraznos) y nectarinas", para los años "2022" y "2024" se visualiza que la producción de manzana a nivel mundial representa el primer cultivo de hoja caduca respecto a la superficie cosechada en 2024. El cultivo de manzano representó en el año 2022 un total de 95,8 millones de toneladas producidas en el marco de la producción mundial, correspondiendo un 66% del total al continente asiático, y un 20% al continente europeo. No obstante, este cultivo es de gran relevancia para la fruticultura del continente americano, tanto en Norteamérica como en Sudamérica, siendo EEUU y Chile los países con mayor producción.

A nivel de país, el informe anual presentado por el Registro Nacional FrutiHortícola del año 2023 (Dirección General de la Granja [DIGEGRA], 2023b), muestra al cultivo de manzano como el frutal de hoja caduca predominante, teniendo el 50% de la superficie dentro de este grupo, y concentrando la producción en la zona sur del país (Montevideo, Canelones y San José). La superficie cultivada de manzana es de 2007 hectáreas, en un total destinado a la producción de frutales de hoja caduca de 4043 hectáreas, relación similar a la de la producción mundial siendo un 44% de la superficie destinada al manzano.

La distribución de superficie por grupo varietal presenta al grupo Red como predominante, con un 65% del total, seguido del grupo Pink y grupo Gala con un 15% y 14% del total respectivamente. El grupo Pink en el país, está integrado predominantemente por el cultivar Cripps Pink, seguido por Rosy Glow y por último Lady in Red (DIGEGRA, 2023a)

Los portainjertos M.9 y M.7 son utilizados ampliamente en la actualidad, siendo un importante porcentaje del área de cultivo de manzana injertado sobre estos (Cabrera & Rodríguez, 2020).

A inicios de la década del 90, James Cummins y Herb Aldwinckle, liberaron los primeros portainjertos (PI) que conforman la serie Geneva® (G.). Esta serie es destacada por poseer distintos grados de control de vigor y resistencia a pulgón lanígero y fuego bacteriano (Fazio et al., 2013; Norelli et al., 2002; Russo et al., 2007). Adicionalmente, se destacan como características positivas de estos PI el aumento del

número de brindillas en la etapa de vivero y la mejora en el ángulo de inserción de dichas ramas, esto se asocia con un aumento en la productividad (Fazio & Robinson, 2008). Algunos portainjertos han sido evaluados para determinar su tolerancia a la sequía, obteniendo que el G.210 y G.890 fueron los menos afectados para las variables evaluadas (Rascón-Castillo et al., 2024). Otra característica positiva de esta serie es la tolerancia al replante, varios estudios en distintos lugares han demostrado que ciertos portainjertos Geneva son muy tolerantes a esta enfermedad de replantación en comparación con otros portainjertos comerciales (Auvil et al., 2011; de Macedo et al., 2021; Rufato et al., 2021; Rumberger et al., 2004).

Los portainjertos Geneva están siendo utilizados en diferentes regiones del mundo, como ejemplo, G.41 en Estados Unidos, G.202 en Nueva Zelanda y G.213 en Brasil. En Uruguay, la introducción de los portainjertos Geneva® ocurre en el año 2001, con la firma un acuerdo de evaluación entre INIA y la Universidad de Cornell (Cabrera & Rodríguez, 2020). En el marco de dicha evaluación se desarrolla el presente trabajo.

1.1 Objetivos

Evaluar seis combinaciones del cultivar Lady in Red con los portainjertos considerados más promisorios de la serie Geneva®, en cuanto al crecimiento radicular, y el desarrollo vegetativo y productivo del cultivar.

Objetivos específicos.

(a) Cuantificar el crecimiento y la distribución espacial de raíces de los portainjertos Geneva® 202, 210, 814, 214, 41 y 213 injertados con el cultivar Lady in Red;

(b) Evaluar el crecimiento vegetativo de manzanos “Lady in Red” con los distintos portainjertos;

(c) Evaluar el crecimiento de frutos y calibre a cosecha de manzanos “Lady in Red” con los distintos portainjertos.

2 MARCO CONCEPTUAL

Tanto en Uruguay como en el mundo, la extensión del cultivo de manzano ha sido hasta el día de hoy limitada por condiciones de clima y suelo. Los factores climáticos que más influyen el cultivo son temperatura, precipitaciones, viento y luminosidad, siendo más significativos y hasta limitantes temperatura y precipitaciones (Hoffmann & Nachtigall, 2004). Los cultivares y portainjertos comerciales derivan de especies nativas procedentes en su gran mayoría de Asia Central, con grandes exigencias de frío invernal para romper la dormancia (Bernardi et al., 2004), restringiendo inicialmente la adopción del cultivo a regiones de clima templado y subtropical. A los efectos de obtener óptimas calidades se debe considerar, además, la importancia de tener diferencias de temperaturas entre el día y la noche en primavera y verano. Sitios con temperaturas nocturnas mayores a 15°C, favorecen la respiración de los frutos, disminuyendo su crecimiento y limitando su coloración. Respecto al suelo, actualmente es el factor menos limitante del ambiente edafoclimático, debido a la disponibilidad de una gama variada de portainjertos, lo cual ha permitido que las condiciones desfavorables, hasta cierto límite, sean total o parcialmente superadas (Hoffmann & Nachtigall, 2004).

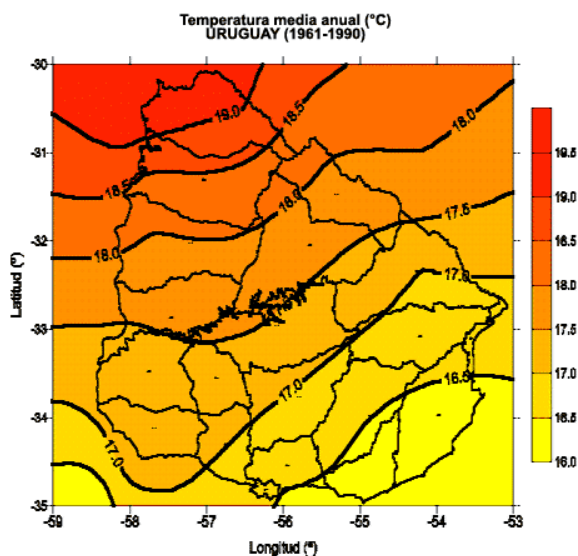
2.1. Caracterización edafoclimática de la región.

Uruguay está ubicado entre los paralelos 30° y 35° de latitud Sur y los meridianos 53° y 58° de longitud Oeste. El clima del país es mayormente homogéneo en todo el territorio, sin presencia de estación seca. Según la clasificación de Köppen, Uruguay queda comprendido dentro de la clasificación climática "Caf", siendo templado, moderado, lluvioso; tipo "C", temperie húmeda; tipo "f" y temperatura del mes más cálido superior a 22°C; tipo "a" (Köppen, 1936).

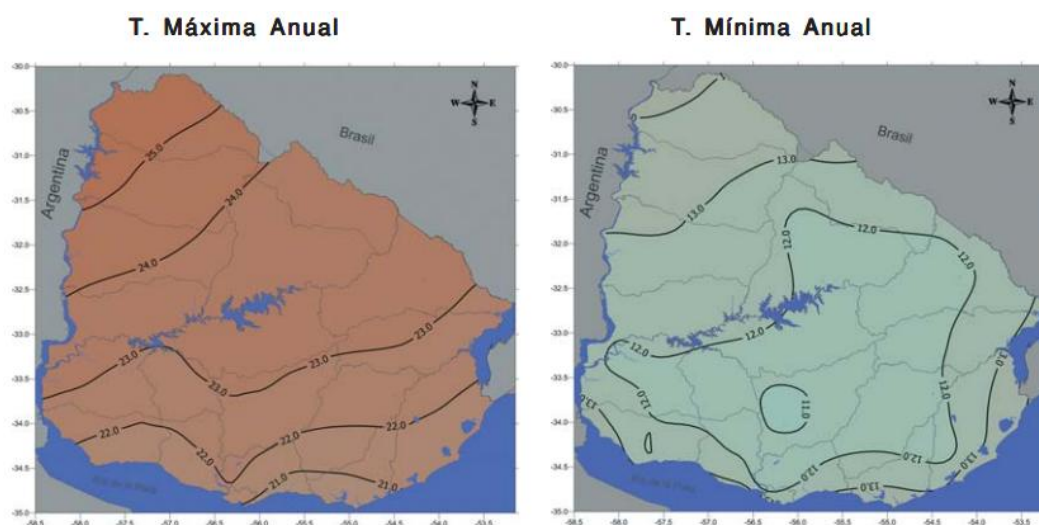
Más recientemente Severino et al. (2020), refieren a la región como de clima "neotropical" y establecen entre otras limitantes la ocurrencia de quemado de sol generado por las altas temperaturas durante el período de crecimiento del fruto.

2.1.1 Temperaturas

Uruguay posee una temperatura media anual de 17,5°C, con variaciones dentro del territorio, donde la máxima temperatura media anual registrada se posiciona al norte del país (20°C), mientras que la mínima se posiciona al sur (16°C) (Instituto Uruguayo de Meteorología [INUMET], s.f.) (Figura 1).

Figura 1*Temperatura media anual (°C) del Uruguay**Nota.* Extraído de INUMET (s.f.).

Las temperaturas anuales máximas y mínimas promedio poseen variaciones en el territorio. Los máximos valores se registran en el norte del país, con un promedio anual de 25°C, mientras que los mínimos se registran en el centro sur del país con un valor de 11°C (Figura 2). A su vez, las máximas temperaturas se dan en los meses de enero y febrero, y las mínimas se presentan los meses de junio y julio.

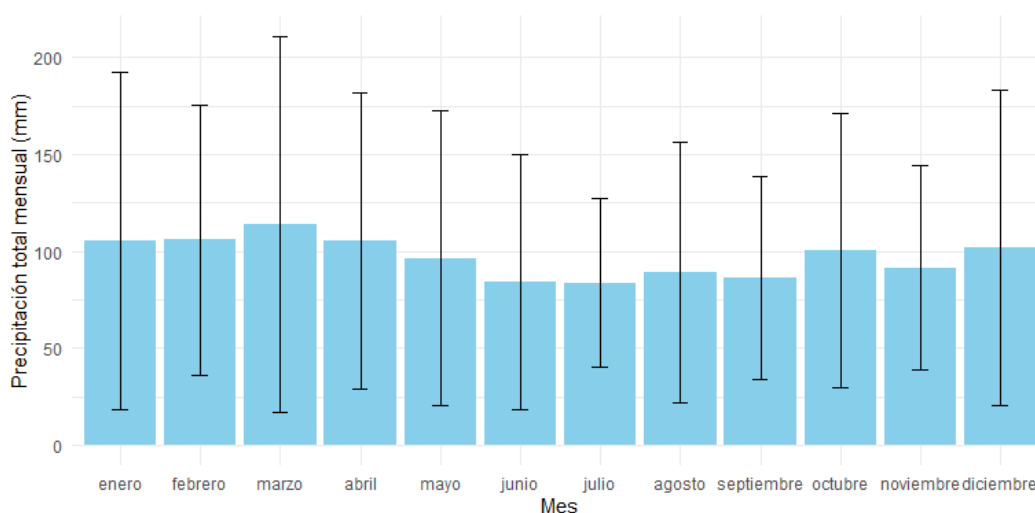
Figura 2*Temperaturas máximas y mínimas anual promedio 1980-2009**Nota.* Extraído de Castaño et al. (2011).

2.1.2 Precipitaciones

El promedio anual de precipitaciones de Uruguay se encuentra entre 1200 y 1600 mm, donde los menores valores se encuentran situados al suroeste del país y los máximos valores al noreste del mismo. No existe una marcada estacionalidad intra anual, pero si existe una marcada variabilidad intra e interanual por lo que los datos de precipitación registrados en un año o estación particular se pueden apartar considerablemente del promedio (Castaño et al., 2011) (Figura 3 y Figura 4).

Figura 3

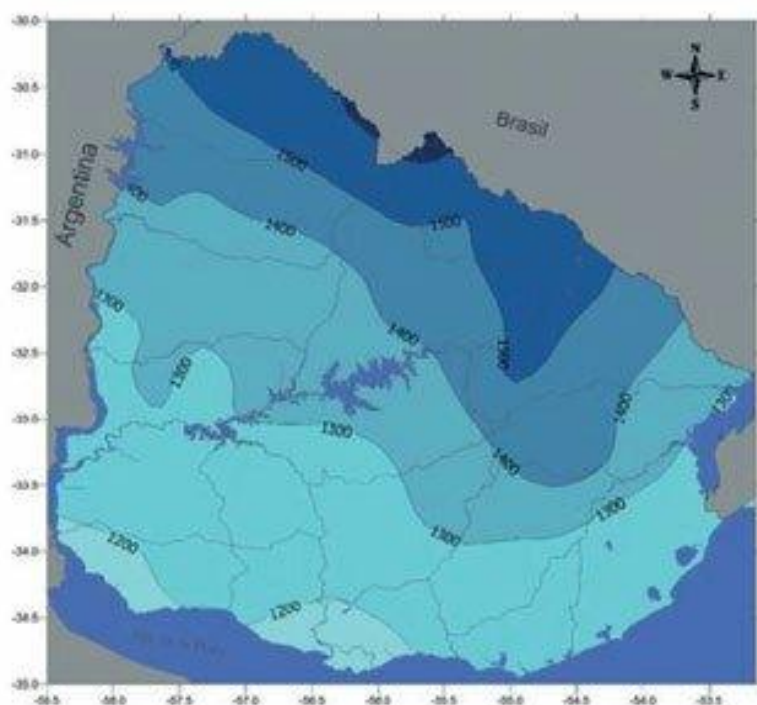
Detalle de precipitaciones en el período 1973-2023 y desvío estándar



Nota. Datos de la Estación “Las Brujas” del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA, s.f.).

Figura 4

Detalle de precipitaciones promedio anual en el país período 1990-2002



Nota. Extraído de Castaño et al. (2011).

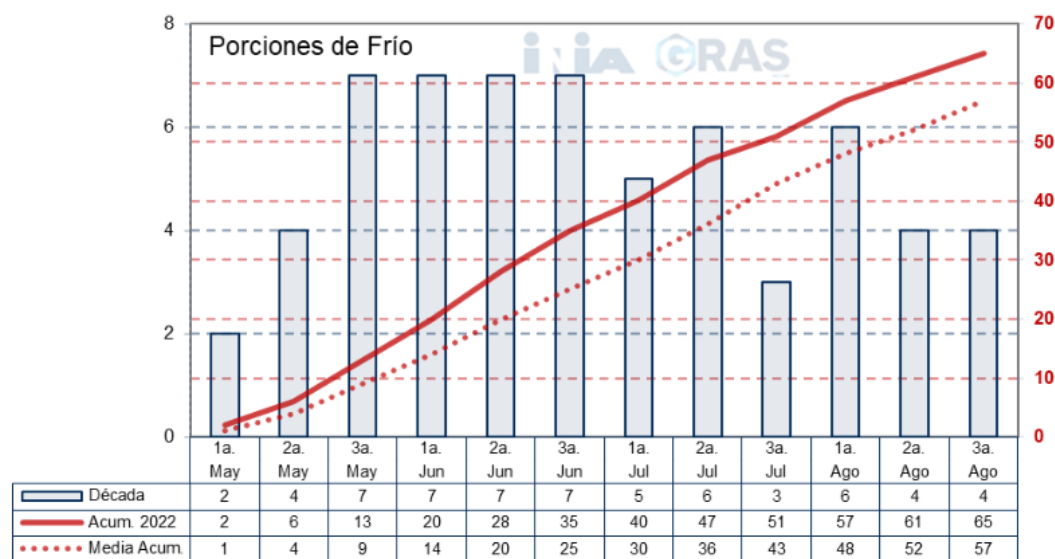
2.1.3 Oferta de frío

Los modelos de cuantificación de frío más utilizados históricamente en Uruguay son el modelo de Richardson (UTAH) y Horas de Frío (HF). La evidencia de la falta de ajuste de dichos modelos respecto al comportamiento fenológico de la mayoría de los cultivos, generó la necesidad de evaluar un mayor número de ellos. Los trabajos de cuantificación de frío invernal más recientes han determinado que el modelo dinámico se muestra como el más promisorio para las condiciones del sur del país (Severino et al., 2011).

En el año 2022 la oferta de frío del ciclo productivo estudiado fue superior a la media histórica, en porciones de frío (PF) acumuladas hasta agosto fueron 57, siendo la media histórica acumulada hasta dicho mes de 48 PF (Figura 5), no obstante, se debe tener en consideración que el método de estimación de porciones de frío posee pocos años de evaluación en el país. Para ese mismo año, las unidades de Richardson acumuladas al mes de agosto fueron de 1185,5 y la media histórica acumulada de 954,5 (Figura 6).

Figura 5

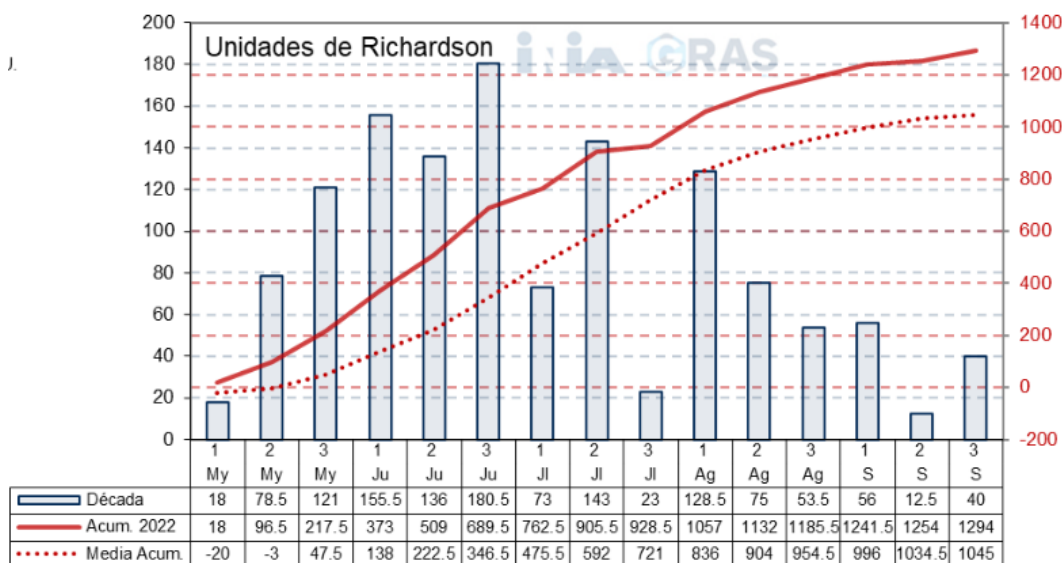
Porciones de frío reportadas el año 2022 para la estación de INIA Las Brujas



Nota. Extraído del INIA (s.f.).

Figura 6

Unidades de Richardson reportadas el año 2022 para la estación de INIA Las Brujas



Nota. Extraído del INIA (s.f.).

2.1.4 Tipos de suelos

La principal zona frutícola del Uruguay se ubica en el sur del país, sobre las formaciones Libertad, Toledo, Ecilda Paullier-Las Brujas, Kiyú, San Jacinto, Tala-Rodriguez e Isla Mala.

Estas formaciones de suelos poseen como suelos dominantes BrunosolesEutricos/Subéutricos Típicos/Lúvicos, Vertisoles RúpticosLúvicos (Típicos) y PlanosolesSubéutricos/Eutricos Melánicos (Durán, 1976).

De las unidades cartográficas se puede determinar que se trata de suelos con contenido de arcilla medio a alto en el horizonte A, variando entre 27% y 36%. El contenido de arcilla se incrementa en profundidad, con un máximo correspondiente al horizonte Bt, ubicado en general a una profundidad de entre 60 a 80 cm (Docampo & Silva, 2014). Respecto a la materia orgánica, la formación con menor porcentaje corresponde a la formación Toledo con un 3,9% en el horizonte A, mientras que la formación que presenta la mayor proporción de materia orgánica es Ecilda Paullier-Las Brujas (EP-LB) con un 5,5%. Todas las formaciones presentan concreciones de carbonato de calcio, variando en la profundidad que se encuentran, donde 62 cm es la menor profundidad presentada (Fm. Tala Rodríguez) mientras que 110 es la mayor (Fm. Kiyú) (Dirección de Suelo, 2019).

2.2 Uso de portainjertos (PI) en manzana

Son varios los motivos que determinan el uso de PI en manzana, entre ellos: la superación del período de juvenilidad de los cultivos y la homogeneidad de las plantaciones (Álvarez Requejo, 1983; Campana & Ochoa, 2007; Razeto Migliaro, 2006), así como las posibilidad de determinar el grado de control de crecimiento de la variedad, la tolerancia a distintos tipos de suelo y ambientes, resistencia a enfermedades y plagas, absorción de nutrientes y en última instancia factores como la calidad del fruto y la eficiencia del rendimiento (Westwood, 1993).

Los portainjertos más extendidos inicialmente fueron originados de semilla (PI francos) que en el caso del manzano se generan por reproducción sexual (Westwood, 1993), obteniendo una alta heterogeneidad en las plantaciones, producto de la variabilidad genética propia de las descendencias entre dos progenitores (Barba Álvarez, 1981; Najt et al., 2011).

Para superar esta limitante de los PI francos se extendió el cultivo en portainjertos clonales, los cuales presentan mayor homogeneidad en las características de crecimiento en un entorno determinado (Chauhan et al., 2020).

Mandl (1990) refiere a una encuesta a viveristas realizada en Uruguay por el Plan Granjero, cuyos datos no fueron publicados, en la que se consulta acerca del volumen de producción, portainjerto utilizado y manejo general del vivero entre otros. Previo al año 1990, surge como insignificante el número de viveristas que realizan producción de PI clonales.

Los portainjertos clonales son en general más difíciles y costosos de producir que los portainjertos francos o de semilla (Mandl, 1990). Esto se debe a la semilla es de muy fácil acceso, barata y el costo de producción es relativamente bajo (Barba Álvarez, 1981; Borscak & Covatta, 2007). Otro beneficio que se encuentra de los portainjertos francos refiere a la producción libre de virus, sumado a poseer un sistema radicular que permite un buen anclaje y una mayor tolerancia a los déficit y excesos de agua (Campana & Ochoa, 2007; Mandl, 1990). Sin embargo, los PI francos presentan una serie de desventajas entre las que se destacan la sensibilidad a *Phytophthora* y a pulgón lanígero, el vigor elevado y la heterogeneidad de las plantaciones (Mandl, 1990).

2.2.1 Historia de mejoramiento de portainjertos clonales.

Los programas de mejoramiento de portainjertos de manzano tuvieron origen en Inglaterra en 1922 y 1924 en East Malling y John Innes Merton (Mandl, 1990; Webster et al., 2000). El objetivo comprendía obtener una gama de portainjertos de vigor escalonado, buscando además adaptabilidad a distintas condiciones de suelo y tolerancia a plagas y enfermedades locales (Mandl, 1990).

Como resultado del trabajo de selección de Wellington y Hatton surge la primera serie de portainjertos clonales, con la denominación EM integrada por 16 clones numerados correlativamente (Mandl, 1990). De esta selección, varios portainjertos eran muy vigorizantes y fueron desapareciendo comercialmente (Webster et al., 2000), mientras que M.9, M.7, M.106 y M.111 fueron los que presentaron mayor adopción (Cabrera & Rodríguez, 2020; Mandl, 1990; Rascón-Castillo et al., 2024)

En el caso de M.9 las selecciones originales presentaron dificultad para la propagación, lo que impulsó a los viveristas de varios países a volver a seleccionar, dentro de las poblaciones de M.9 existentes, subclones que exhibieron una propagación mejorada de plantines. Actualmente, existen muchos subclones de M.9 originarios de los Países Bajos (NAKB 337-340 y Fleuron 56), Bélgica (Nicolai 29), Alemania (Burgmer), Francia (Pajam 1 y 2) y el conocido subclon EMLA de Reino Unido (Webster et al., 2000).

La comparación realizada en Horticulture Research International (HRI)-East Malling de los diferentes subclones de M.9, realizada en 1983 muestra que no se presentan grandes variaciones entre los diferentes clones respecto a la eficiencia de producción, no obstante, se visualiza que subclones como el Burg. 984 y EMLA confieren mayor volumen de copa, correspondiendo a valores de 18 y 18,8 m³ respectivamente y producción acumulada entre 46 y 48,4 kg por árbol (más

vigorizantes) que otros subclones como el T337, M.9A y T340 (enanizantes) donde el volumen de copa se encuentra entre 11,7 y 14,9 m³ de copa y producciones acumuladas de 39 a 48,4 kg por árbol (Webster et al., 2000).

Luego del lanzamiento de las series Malling, entre 1950 y comienzos del 60, el foco del mejoramiento de los investigadores de Inglaterra estuvo dirigido a la obtención de portainjertos semienanizantes y semivigorosos, como forma de cubrir el espacio dejado en la serie entre el M.9 y el M.7 en el control del vigor. De esta forma, se realizaron cruzamientos entre los portainjertos M.13 y M.9 surgiendo así los portainjertos denominados M.27 y M.26 (Mandl, 1990; Webster et al., 2000).

De todos los portainjertos que fueron generados en las décadas 70-80, solamente los portainjertos M.9 y M.7 son utilizados ampliamente en la actualidad, siendo un importante porcentaje del área de cultivo de manzana injertado sobre estos. En los países de la comunidad europea, se estima que para el año 2006, más del 90% de los manzanos estaban siendo cultivados en alta densidad sobre M.9 (Bernardi et al., 2004; Cabrera & Rodríguez, 2020; Razeto Migliaro, 2006; Robinson, 2011; Webster et al., 2000).

2.2.2 *Ventajas y limitantes de portainjertos (PI) Malling 9 y Malling 7.*

El avance hacia los portainjertos clonales generó una disminución del vigor de los árboles respecto a los injertados sobre pies francos. Esta característica propició la adopción de estos PI por los productores para aumentar la producción por unidad de superficie (Mandl, 1990). En el caso de la serie Malling, el M.9 podría conferir un vigor equivalente al 30-45% respecto al atribuido a los PI francos, mientras que en el caso del M.7 se acerca al 55-75% (Danilovich, 2024; Razeto Migliaro, 2006).

En el caso del M.9, además de ser un portainjerto enanizante, se destaca como ventaja la resistencia a *Phytophthora* y la mejora de la calidad de la fruta, obteniendo fruta de mayor tamaño en variedades rojas que se injertan en él, respecto a los injertados sobre PI francos (Bernardi et al., 2004; Mandl, 1990). La producción en vivero del M.9 es buena, al tener buen enraizamiento y soportar el trasplante, además, al injertarlo se comporta como compatible con la mayoría de las variedades, aunque suele manifestar un sobrecrecimiento (Mandl, 1990).

El portainjerto M.7 presenta como ventaja la alta variedad de suelos a los que se adapta, la tolerancia a la asfixia radical (Álvarez Requejo, 1983) y la compatibilidad con una amplia gama de variedades. En vivero se comporta de forma excelente, propagándose fácilmente tanto por acodo como por estaca leñosa (Mandl, 1990).

A pesar de estas ventajas, ambos portainjertos presentan como limitante la necesidad de conducción en sistemas apoyados o semilibres desde la plantación, debido a que poseen un sistema radicular débil y con anclaje deficiente (Danilovich, 2024). En el caso del portainjerto M.7, se presenta también como limitante, la característica de poseer emisión de rebrotes, lo cual hace que, a pesar de ser bastante difundido en Estados Unidos, sea rechazado comercialmente (Álvarez Requejo, 1983; Mandl, 1990).

El M.9 tiene una exigencia respecto al tipo de suelo en donde se puede desarrollar de manera eficiente, además de ser susceptible tanto a déficit como a excesos hídricos (Danilovich, 2024). Esto genera que en condiciones inadecuadas la longevidad de estos se reduzca a 14 o 16 años, obteniendo cosechas reducidas y calibres de fruta muy pequeños. Para el portainjerto M.7, donde se vio una amplia adaptabilidad a distintas condiciones, la restricción de suelos solo se aplica a suelos livianos y cultivos sin riego (Mandl, 1990).

Respecto a la sanidad de esta serie de PI la mayoría de ellos son susceptibles al pulgón lanígero, encontrándose entre estos el M.9, M.26 y M.7 (Beers et al., 2010; Mandl, 1990; Norelli et al., 2002).

Sumado a la susceptibilidad al pulgón lanígero, según Norelli et al. (2002) y Robinson (2011), los portainjertos M.9 y M.26 son muy susceptibles a fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*), donde la infección llega a matar los árboles al anillar el portainjerto. Esto es un problema potencial muy importante para Uruguay, ya que esta enfermedad es cuarentenaria, al no estar presente aún en el mismo (Cabrera & Rodríguez, 2020; Van der Zwet & Beer, 1999).

Respecto a la podredumbre de cuello (*Phytophthora sp.*), el portainjerto M.7 posee tolerancia irregular (Mandl, 1990).

2.2.3 Transición hacia los portainjertos Geneva®.

Desde la adopción de los portainjertos M.7 y M.9, los programas de mejoramiento tuvieron por objetivo la obtención de materiales que cuenten con resistencia a podredumbre de cuello (*Phytophthora sp.*), al pulgón lanígero (*Eriosoma lanigerum*) y fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*). Con ello comienza uno de los programas de mejoramiento dedicados a la búsqueda de dichos atributos, de la Universidad de Cornell, ubicada en la ciudad de Geneva, Nueva York (Europa Fruit Tree Rootstocks, 2025). Para inicios de la década del 90, James Cummins y Herb Aldwinckle, liberaron los primeros portainjertos que conforman la serie Geneva® (G.). Los portainjertos de esta serie están siendo utilizados en diferentes regiones del

mundo: el G.41 en Estados Unidos, G.202 en Nueva Zelanda y el G.213 en Brasil (Cabrera & Rodríguez, 2020).

En Uruguay, en el año 2001, el INIA firma un acuerdo de evaluación con la Universidad de Cornell, generando la introducción en el país de los portainjertos Geneva®41 y Geneva® 16. Posteriormente, en el año 2017, se introducen para evaluación los portainjertos Geneva® 202, 210, 213, 214 y 814 (Cabrera & Rodríguez, 2020; Denardi et al., 2015).

A nivel comercial, en nuestro país se encuentran disponibles los portainjertos Geneva® 41, Geneva® 202 y Geneva® 213 (Cabrera & Rodríguez, 2020).

2.2.4 Características de los portainjertos Geneva®

Las principales características buscadas en la generación de los portainjertos de la serie Geneva fueron la obtención de materiales con distintos grados de control de vigor y resistencia a pulgón lanígero y fuego bacteriano (Fazio et al., 2013).

Adicionalmente al control de vigor y las resistencias mencionadas, se destacan como características positivas de esta serie de PI el aumento del número de brindillas en la etapa de vivero y la mejora en el ángulo de inserción de dichas ramas. Estas características se plantean como positivas para el desarrollo de plantaciones en sistemas de alta densidad tipo Tall Spindle, ya que requeriría menor uso de mano de obra para la conducción de las plantas, y se asocia con un aumento en la productividad, en comparación con PI que no poseen dichas características (Fazio & Robinson, 2008). En tanto las características del sistema radicular, resalta la capacidad de producir mayor proporción de raíces finas respecto a las gruesas, característica hereditaria (Fazio & Robinson, 2008), y que podría estar involucrada en la mayor productividad de estos portainjertos (Fazio et al., 2013).

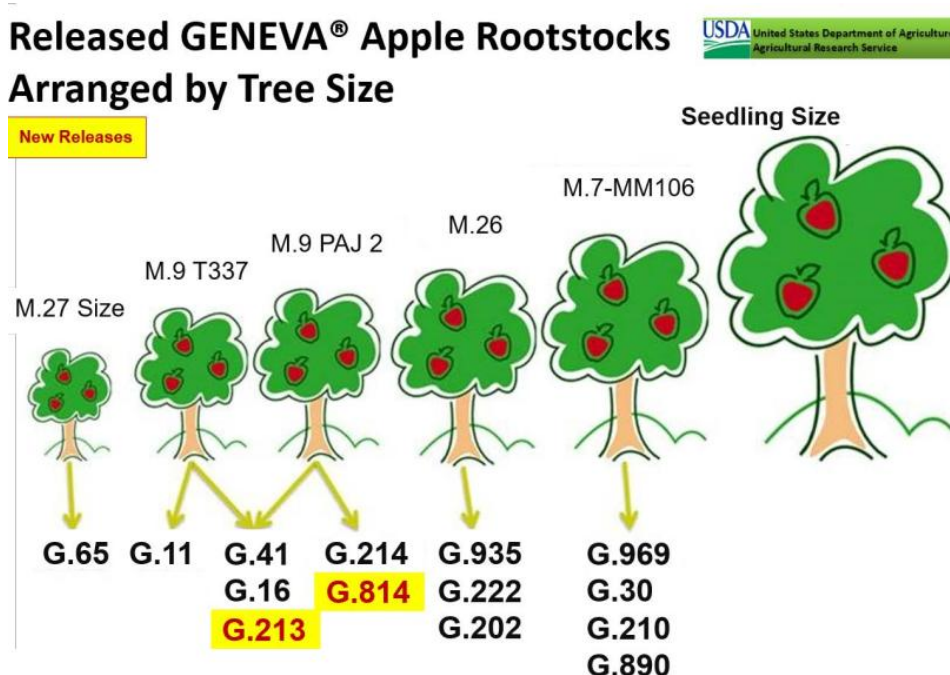
Al Farqani (2019) evaluó los portainjertos G.214, G.41, G.890 y M.9 en plantas en etapa de vivero con uso de escáner de raíces para determinar desarrollo y distribución de estas, sin presentar diferencias significativas en los parámetros radiculares de los cuatro portainjertos analizados. Se visualiza una tendencia (no significativa) del portainjerto G.214 con mayor número y longitud de raíces, mientras que el portainjerto G.890 presenta un mayor volumen y área radicular.

Fazio et al. (2013) presenta al G.41 como un portainjerto que confiere un tamaño similar a clones vigorosos de M.9 (como por ejemplo Pajam 2), con mayor eficiencia productiva. Las dificultades constatadas en el uso de este portainjerto están relacionadas a su dificultad para enraizar, la presencia de raíces quebradizas y una unión de injerto frágil, por lo que los autores plantean que las plantas injertadas en

éste deben manipularse con cuidado. Como alternativa al G.41, y también de tamaño similar al M.9, se propone el PI G.214 liberado posteriormente. Si bien dicho PI presentaría una menor eficiencia productiva que el G.41, presenta mejores características para la propagación en vivero. Con un vigor similar al M.26, la alternativa en la serie PI Geneva es G.202 del cual se resalta la alta eficiencia de rendimiento y precocidad (Figura 7).

Figura 7

Escala de vigor de portainjertos de manzana



Nota. Extraído de Center for Technology Licensing (2023).

Rascón-Castillo et al. (2024) evaluaron el comportamiento de la variedad Golden Delicious con distintos portainjertos (B.9, M.9Nic29, G.41, G.202, G.890, G.210, G.30, M.7, MM.111, MM.109) sometidos a cuatro ciclos de sequía y riego continuo en macetas de 20L, mediante determinación de crecimiento de la rama líder, uso eficiente del agua, potencial hídrico de la hoja, biomasa total, densidad de raíz y relación peso seco (PS) entre parte aérea y raíz. En los PI Geneva, para el crecimiento de la rama líder, los que presentaron diferencias significativas fueron G.202, G.890, G.210, G.41, siendo este último el más afectado en condiciones de sequía. En biomasa total, los portainjertos G.30, G.41 y G.202 no presentaron diferencias significativas entre la situación de estrés hídrico vs. riego continuo, sin cambios en su crecimiento; los más afectados fueron G. 890 y G.210, presentando diferencias significativas entre ambas situaciones. En la relación entre el peso seco de la parte aérea vs la raíz, el portainjerto G.41 tuvo diferencias significativas entre tratamientos

presentando un mayor crecimiento de la raíz respecto a la parte aérea, entendiendo esto como un mecanismo de tolerancia a la sequía. En términos generales, los portainjertos Geneva con mejor desempeño en el 90% de las variables evaluadas en condiciones de estrés hídrico fueron el G.210 y G.890, mientras que el más afectado fue el G.202 en el 70% de las variables evaluadas.

En referencia a los aspectos sanitarios y más específicamente a fuego bacteriano, Norelli et al. (2002) y Russo et al. (2007) citan a los portainjertos de esta serie como tolerantes o inmunes, e indican que permiten la supervivencia de variedades susceptibles incluso bajo alta presión de la enfermedad. En una evaluación realizada por Norelli et al. (2002), donde se probó la resistencia de varios portainjertos a cuatro cepas distintas de la enfermedad, se comprobó que G.11, G.30, G.16, G.65 y la mayoría de los G. (inclusos aquellos no lanzados en el 2002) fueron resistentes a las cuatro cepas utilizadas para la inoculación de forma no diferencial.

Otra característica de esta serie es la tolerancia al replante, este problema tiene varios agentes causales, incluidos *Cylindrocarpon destructans*, *Phytophthora cactorum*, *Pythium spp.* y *Rhizoctonia solani* (Mazzola, 1998). Varios estudios en distintos lugares han demostrado que ciertos portainjertos de esta serie son muy tolerantes a esta enfermedad de replantación en comparación con otros portainjertos comerciales (Auvil et al., 2011; de Macedo et al., 2021; Rufato et al., 2021; Rumberger et al., 2004).

En condiciones de replante, en manzanos “Maxi Gala” en Vacaría, Brasil entre los años 2013 y 2020 los portainjertos G.213 y Marubakaido con interinjerto M.9 alcanzaron la meta de 150 toneladas o más en el quinto año de producción, resultado que no se refleja en el portainjerto M.9. El portainjerto G.213 presentó un 7,3% más de rendimiento acumulado al finalizar la evaluación (de Macedo et al., 2021). A pesar de esto, G. Fazio (comunicación personal, s.f.) menciona que un porcentaje variable de árboles injertados en el portainjerto G.213 han muerto luego de 2 a 3 años posteriores a la plantación, lo cual es atribuido a la formación del tejido calloso en el momento del injerto, exclusivo de la genética del mencionado PI y asociado al balance hormonal del mismo.

Respecto a la calidad de fruta, de Macedo et al. (2021) evaluó los parámetros diámetro de fruto, peso de fruto, firmeza y sólidos solubles en las cosechas, no obteniendo diferencias significativas entre portainjertos tanto en condiciones de suelo virgen como de replante. Esto no se alinea con lo presentado por Araujo Pallares (2021) quien observó diferencias significativas en la mayoría de los parámetros

medidos (peso de fruto, sólidos solubles totales, acidez titulable y firmeza) entre portainjertos evaluados para la variedad Honeycrisp.

Algunos portainjertos de Geneva® han tenido más rendimiento acumulado, eficiencia productiva y supervivencia, superando en algunos casos a variedades comerciales estándar como por ejemplo algunos clones M.9, B.9, M.26, M.7, etc. en varios ensayos (Autio et al., 2011; Czynczyk & Bielicki, 2012; de Macedo et al., 2021; Robinson, 2011; Russo et al., 2007).

2.3 Crecimiento radicular

2.3.1 *Flujo de crecimiento de las raíces en frutales*

Existen varias investigaciones realizadas en la que marcan dos grandes flujos de crecimiento de raíces en manzanos. Según Head (1967), en manzana el primer flujo de crecimiento de raíces comienza antes de la brotación y tiene el máximo pico de crecimiento en plena floración, en el hemisferio sur se da entre los meses de septiembre y octubre, y el segundo flujo comienza una vez se dé el cese del crecimiento vegetativo, a fines de marzo.

El crecimiento de las raíces varía entre años, en la misma estación y por los diferentes manejos realizados en el cultivo (Atkinson, 1983). En general, las temperaturas de suelo entre 15°C y 25°C son las más adecuadas para el crecimiento de las raíces (Bernardi et al., 2004). La compactación, así como la estructura y textura del suelo pueden limitar el crecimiento de las raíces, la capacidad de absorción de agua y nutrientes, y por consecuencia reducen el vigor y la productividad de las plantas (Bengough et al., 2006; Hoffmann & Bernardi, 2004). También influyen en el crecimiento de las raíces, proceso regulado hormonalmente, las disponibilidades hídricas y nutricionales. En períodos de déficit hídrico, las raíces dejan de crecer, retomando su crecimiento en condiciones hídricas adecuadas; por su parte, el desarrollo de las raíces a lo largo del año está contrapuesta con la de los brotes, apuntando a cierto grado de competencia entre el desarrollo de los órganos vegetativos y radicales (Agustí, 2010).

El desarrollo del sistema radicular de un árbol frutal esta mediado por diferentes factores, siendo el genotipo (portainjerto) el que afecta directamente el tamaño de este, y el ambiente (suelo) define su distribución (Fernandez et al., 1995). En general, un portainjerto vigoroso se corresponde con un volumen de raíz más grande. La exploración de un volumen de suelo mayor por parte de la planta tiene ventajas y desventajas. La distribución de raíces en superficie favorece la

disponibilidad de nutrientes, pero, al explorar un volumen exiguo de suelo, la planta es más susceptible a situaciones de déficit hídrico (Sánchez, 2007).

Si bien se han realizado estudios exhaustivos sobre la interacción entre el portainjerto y el cultivar, existe poca información sobre cómo los portainjertos transmiten sus efectos a éste. Una razón por la que el comportamiento de las raíces no se comprende completamente es que están enterradas bajo el suelo, lo cual dificulta físicamente el seguimiento del crecimiento a lo largo del tiempo (Al Farqani, 2019).

2.3.2 *Método de evaluación de raíces.*

No existe una única técnica recomendada para estudiar el desarrollo y la arquitectura radicular en el suelo. Los distintos métodos de evaluación pueden agruparse en destructivos y no destructivos. Los métodos destructivos requieren la recolección de núcleos de suelo, el uso de bolsas de crecimiento interno y el análisis de raíces finas, la excavación de zanjas, dibujos anatómicos de raíces, entre otros. Sin embargo, proporcionan menos información para rastrear los cambios en las raíces en respuesta a su rizosfera (Al Farqani, 2019). Los métodos convencionales (núcleos de suelo y crecimiento) no pueden medir la producción, muerte y desaparición de raíces finas simultáneamente (Kurz & Kimmins, 1987; Santantonio & Grace, 1987). Según (McMichael, 1986) los métodos de excavación son muy laboriosos, perturban los sistemas radiculares y son muy estresantes para la planta.

Los métodos no destructivos están basados en el uso de rizotrones y georadares. Los rizotrones se han utilizado desde principios del siglo XX, implementando ventanas de observación subterráneas con paredes de vidrio permitiendo a los científicos monitorear in situ el desarrollo de las raíces y su interacción con el suelo y los microorganismos de la rizosfera a lo largo de las estaciones (Al Farqani, 2019). Los métodos de pared de vidrio permiten el estudio de raíces en situaciones reales de campo y no perturban el sistema radicular, pero se necesita de una gran estructura que permita la observación de las raíces (McMichael, 1986).

En 1937, Bates (como se cita en Al Farqani, 2019) presentó lo que propuso como el primer rizotrón en miniatura al publicar su artículo "Un dispositivo para la observación del crecimiento de las raíces en el suelo". El método propuesto, permite visualizar a las raíces in situ, a través de tubos de acrílicos colocados en el suelo. Esto permite realizar evaluaciones de las raíces a lo largo del tiempo en situaciones de

campo, pudiendo utilizarse en plantaciones estándares sin tener un gran cuidado al momento de realizar las tareas de campo (Al Farqani, 2019; Waddington, 1971).

La adopción del método no destructivo “minirizotróf” para evaluación de raíces en el cultivo de manzano se ha extendido en los últimos años, ejemplo de esto son la evaluación realizada por Al Farqani (2019) y la realizada por Webber (2021). Estas difieren en la metodología de instalación de los tubos para el escáner de raíces debido a la naturaleza de dichos ensayos, siendo un cultivo aeropónico para Al Farqani mientras que en el caso de Webber se realiza un ensayo a campo. Respecto a la colocación de los tubos, en el caso de Webber (2021) los mismos se colocaron a 45° respecto al suelo, a una distancia de 10 cm del tronco y perpendicular a la fila, cada imagen representa aproximadamente 19,6 cm por 19,6 cm visualizando 384 cm² de suelo por imagen.

Para el estudio con cultivo aeropónico realizado por Al Farqani (2019) se utilizaron 7 tubos de observación por planta, colocados de forma horizontal en distintas profundidades. Aunque el software utilizado por el escáner de raíces presenta un sistema de autodetección de estas, se menciona que se realiza el trazado de las mismas de forma manual, ya que se visualiza una sobrestimación de la extensión de las raíces con este software.

La implementación de este método de evaluación de raíces ha permitido un mejor entendimiento de la dinámica de estas, proporcionando información muy valiosa a la cual no era posible acceder con los métodos anteriores (Al Farqani, 2019; Kurz & Kimmins, 1987; McMichael, 1986).

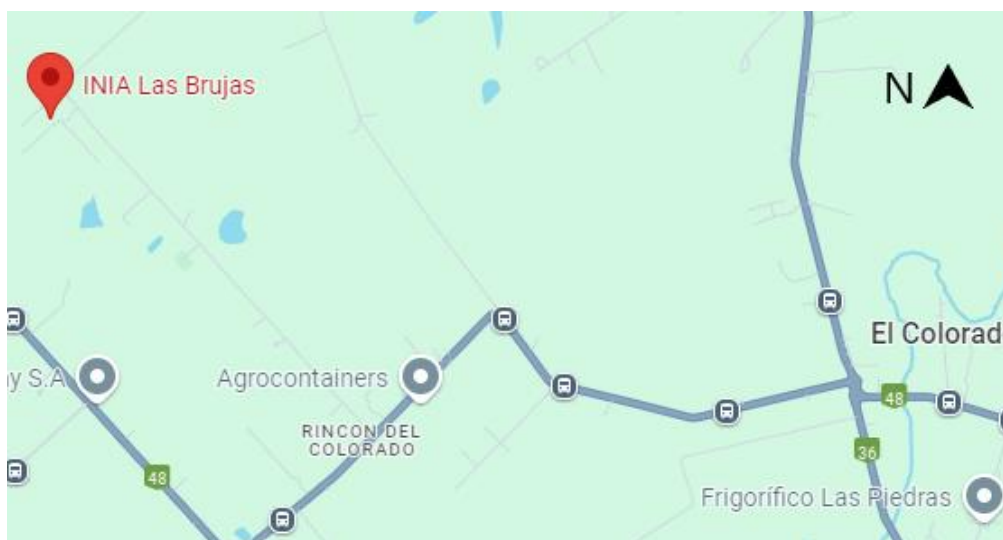
3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del ensayo y diseño experimental

El ensayo se realizó en las instalaciones del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), en la estación experimental “Wilson Ferreira Aldunate” Las Brujas, ubicado en ruta 48 km 10, Rincón del Colorado, Canelones (Figura 8).

Figura 8

Detalle de ubicación al predio del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) “Las Brujas”



Nota. Extraído de Google (2025).

Según el mapa de suelos al que se accede a través del visualizador de INIA (2022), y seleccionando la unidad de suelos L1 en éste, se obtiene un archivo que detalla las características geomorfológicas y descripción del perfil de suelo asociado a dicha unidad. Al momento de la realización de este trabajo dicho archivo no está vigente para su visualización en la web. La unidad de suelos L1 posee geomorfología y posición local asociada a lomadas fuertes, ladera alta y convexa. El material generador de la unidad son limos arcillosos cuaternarios (Lodolitas Formación Libertad), la pendiente oscila entre 2-4% y la erosión actual es nula a baja.

La clasificación ROU actual para este tipo de suelo es un Vertisol Rúptico Lúvico, FAc., que según Soil Taxonomy corresponde a “Fine, smectitic, thermic Typic Hapludert” (A. Silva & R. Docampo, comunicación personal, 2013).

El perfil de suelo tipo de dicha unidad posee una fase profunda y una fase superficial, donde se visualizan caras de deslizamiento características de un Vertisol Rúptico (Anexo A). En general, se trata de un suelo con texturas franco arcillo limosas

a arcillosas, con presencia de un horizonte Bt a 28 cm de profundidad en la fase profunda y concreciones de carbonato de calcio en ambas fases. El horizonte Ck comienza en los 34 cm de profundidad para la fase superficial y a los 79 en la fase profunda (Anexo B y Anexo C).

El cuadro en el que se instaló el ensayo fue implantado en 2019, con un diseño de bloques completos al azar, siendo el criterio de bloqueo la posición en el campo. Consta de cuatro repeticiones y 4 plantas por parcela. En el ensayo original se evaluaron 6 combinaciones del cultivar Lady in Red sobre portainjertos Geneva® siendo estos G.41, G.210, G.214, G.202, G.213 y G.814 y como “testigo” el portainjerto M.9. El grupo Cripps Pink tiene requerimientos de frío del entorno de las 600 a 800 horas de frío, correspondiente a 72,9 porciones de frío (Los Álamos de Rosauer, 2010; Parkes et al., 2020).

El sistema de conducción realizado es doble eje y la distancia de plantación 3,0 m x 1,2 m obteniendo una densidad de plantación de 2778 plantas por hectárea. El cuadro en cuestión cuenta con sistema de riego por goteo, presentando una línea de riego por fila. Para la evaluación del presente ensayo solo se realiza el estudio de los portainjertos Geneva® en los bloques “A”, “C” y “D” excluyendo del estudio a los portainjertos M.9.

A los efectos de este trabajo, se analiza la evaluación del mes de abril de 2023, correspondientes con la última medición antes de la cosecha del cuadro, en esta se asume que terminó el primer flujo de crecimiento de raíces detallado por Head (1967), y que aún no se presenta el segundo flujo de brotación, que corresponde al periodo fenológico de postcosecha.

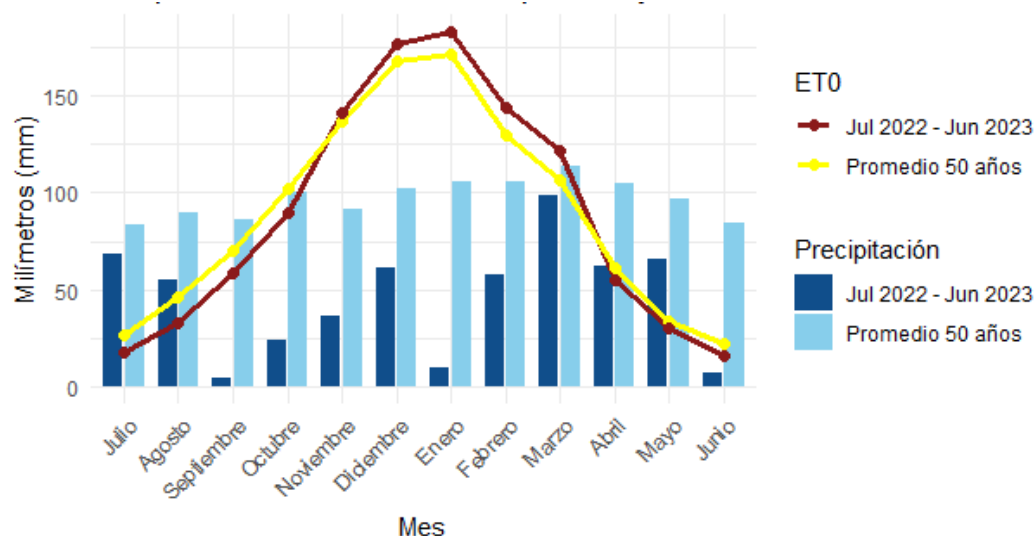
3.2 Caracterización del año de estudio

El estudio fue realizado entre setiembre de 2022 y octubre de 2023. Dicho período se caracterizó por un déficit hídrico (Cortelezzi et al., 2023) que de acuerdo con el banco de datos agroclimático del INIA (s.f.) presentó un total anual de precipitaciones de 500 mm. La media de los últimos 30 años se posiciona en los 952,7 mm (período 1994 a 2024), siendo el 2022 el cuarto año más seco de los últimos 30 años.

Para el período en que se desarrolló esta evaluación, se observa que la demanda atmosférica supera ampliamente a la oferta por parte de las precipitaciones, no llegando a generar una recarga en el suelo hasta el invierno de 2023, y siendo esta insuficiente (Figura 9).

Figura 9

Detalle de precipitaciones y ETo históricos de 50 años en comparación con período julio 2022 - junio 2023



Nota. Los datos fueron extraídos del Banco de Datos Agroclimáticos de INIA (s.f.) para la estación agroclimática establecida en Las Brujas.

3.3 Evaluación con escáner de raíces

Para la evaluación de raíces se utilizó un escáner de raíces modelo CI-600 de CID Bio-Science, el cual toma imágenes de 360 grados, pudiendo seleccionar la resolución entre 100 y 1200 DPI, variando el tiempo de escaneo entre 0,5 y 4 minutos. Para la toma de imágenes se requirió instalar en el suelo tubos de acrílico, los cuales miden 105 cm de altura, 6,4 cm de diámetro interno y 7 cm de diámetro externo.

En el ensayo presentado, los tubos fueron colocados en la tercera planta de cada parcela evitando así los bordes, finalizado la colocación el día 4 de agosto de 2022. Se colocaron un total de 18 tubos, siendo 6 tratamientos (distintos portainjertos Geneva[®]) y 3 repeticiones.

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 realizó un pozo con un taladro, buscando introducir 1 metro del tubo, que, debido al ángulo de inserción del mismo, obtienen imágenes equivalentes a aproximadamente los primeros 70 centímetros de profundidad real. El tubo se colocó en el pozo y luego se rellenó con una mezcla de suelo del sitio y agua hasta obtener una solución homogénea y fluida, para asegurar que no existan zonas donde no haya contacto entre el tubo y el suelo.

En cada medición se obtuvieron 4 imágenes por cada tubo evaluado, correspondientes a distintas profundidades de suelo (1:0-19 cm, 2:19-35 cm, 3:35-50 cm, 4: 50-65 cm). El primer escaneo de raíces se realizó en setiembre de 2022, reiterándose mensualmente hasta el mes de octubre de 2023.

Posteriormente, estas imágenes debieron ser cargadas en un Software para su procesamiento, el cual se denomina RootSnap (CID Bio-Science, 2023), donde se cargaron las imágenes ordenadas por tubo, profundidad y fecha de evaluación. En dicho Software se marcaron las raíces visibles en las imágenes, determinando el grosor y largo de las mismas. El programa cuenta con una función de autodetección de raíces, el cual no se pudo utilizar debido a que sobreestima el largo de estas. Una vez finalizado el procesamiento, el Software generó un archivo tipo hoja de cálculo, donde se obtuvieron diferentes parámetros, en este trabajo se utilizaron largo de raíces (mm) y el área (mm²) que ocupan las mismas.

3.4 Mediciones de crecimiento de brindillas

Para las evaluaciones de crecimiento de brindillas se procedió a marcar una rama por árbol en tres árboles de cada parcela, los árboles seleccionados son los centrales de cada parcela, eliminando así el efecto “borde”, por lo cual se marcó una rama del árbol donde está colocado el escáner y los dos árboles laterales a este.

Las ramas seleccionadas eran representativas del crecimiento del árbol, y similares de edad siendo no mayores a dos años. En estas ramas se clasificaron los brotes en vegetativo y reproductivo, y se registró el largo de cada brote (LBV y LBR) además del diámetro del mismo y de la rama principal, a partir del diámetro se calculó el área transversal de rama (ATR) y de las brindillas (ATB).

Las evaluaciones se realizaron mensualmente, coincidiendo con la fecha de evaluación de raíces con el escáner, comenzando en octubre de 2022 hasta el mes de abril de 2023.

El día 15 de diciembre de 2022, el cuadro tuvo una poda en verde de tipo mecánica, por lo cual algunas de las ramas marcadas para evaluación fueron cortadas parcialmente.

3.5 Evaluaciones de crecimiento de frutos

A partir de las ramas que se tienen marcadas, se hizo una evaluación de calibre de todos los frutos, midiendo el diámetro ecuatorial de los mismos. Estas evaluaciones se realizaron mensualmente desde noviembre de 2022 y hasta el mes de abril de 2023, antes de que la fruta sea cosechada.

A lo largo del tiempo se registraron menor número de frutos debido a la evolución del cuajado natural de la planta y de la caída precosecha de las frutas.

3.6 Análisis estadístico

El modelo estadístico utilizado para el análisis del experimento fue el siguiente:

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

Donde:

- Y_{ij} corresponde al valor obtenido de la variable de respuesta, en el tratamiento i y bloque j .
- μ corresponde a la media poblacional.
- τ_i representa el efecto del i -ésimo tratamiento.
- β_j corresponde al efecto del j -ésimo bloque.
- ε_{ij} representa el error experimental para el tratamiento i y bloque j , asumiendo una distribución normal $N(0, \sigma^2)$.

Los distintos tratamientos son los portainjertos (PI) Geneva: G.202, G.210, G.814, G.214, G.41 y G.213.

Los bloques son A, C y D, representando un total de 3 repeticiones.

Para cada una de las variables estudiadas, se probó el siguiente juego de hipótesis:

- H_0 = todos los efectos de los PI son iguales
- H_a = al menos un PI es diferente

Las variables se probaron mediante un análisis de varianza (ANAVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En caso de rechazar la H_0 se realizó test de Tukey para visualizar las diferencias entre tratamientos.

Se analizó la correlación de las variables medidas por medio de coeficiente de Pearson y análisis multivariados utilizando la función de componentes principales (ACP) del paquete FactorMineR en el software R.

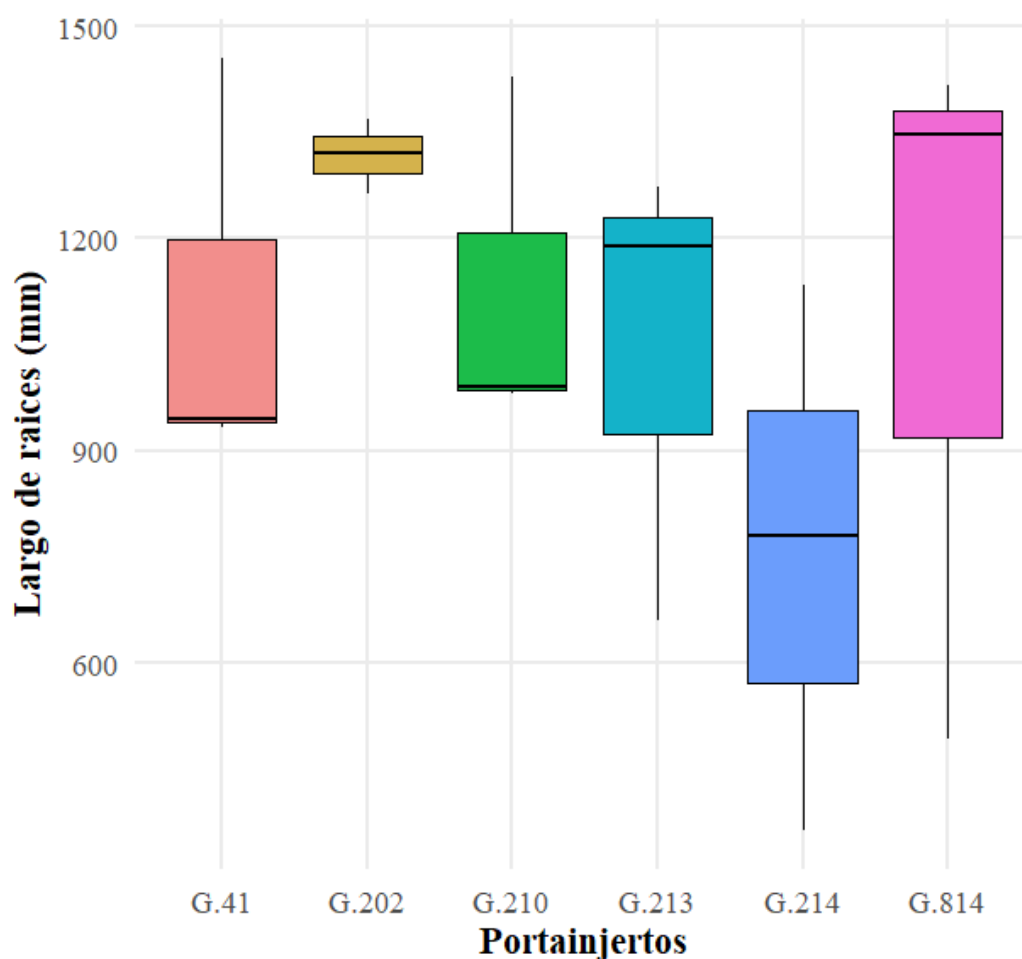
4 RESULTADOS

4.1 Mediciones radiculares

Para la variable largo de raíces (LR) no se presentaron diferencias significativas entre los diferentes portainjertos, observándose una alta variabilidad dentro de ellos (Figura 10). Los más variables fueron los portainjertos G.814, G.214 y G.213, mientras que el G.202 presento menor variabilidad.

Figura 10

Boxplot de largo de raíces en mm por portainjerto

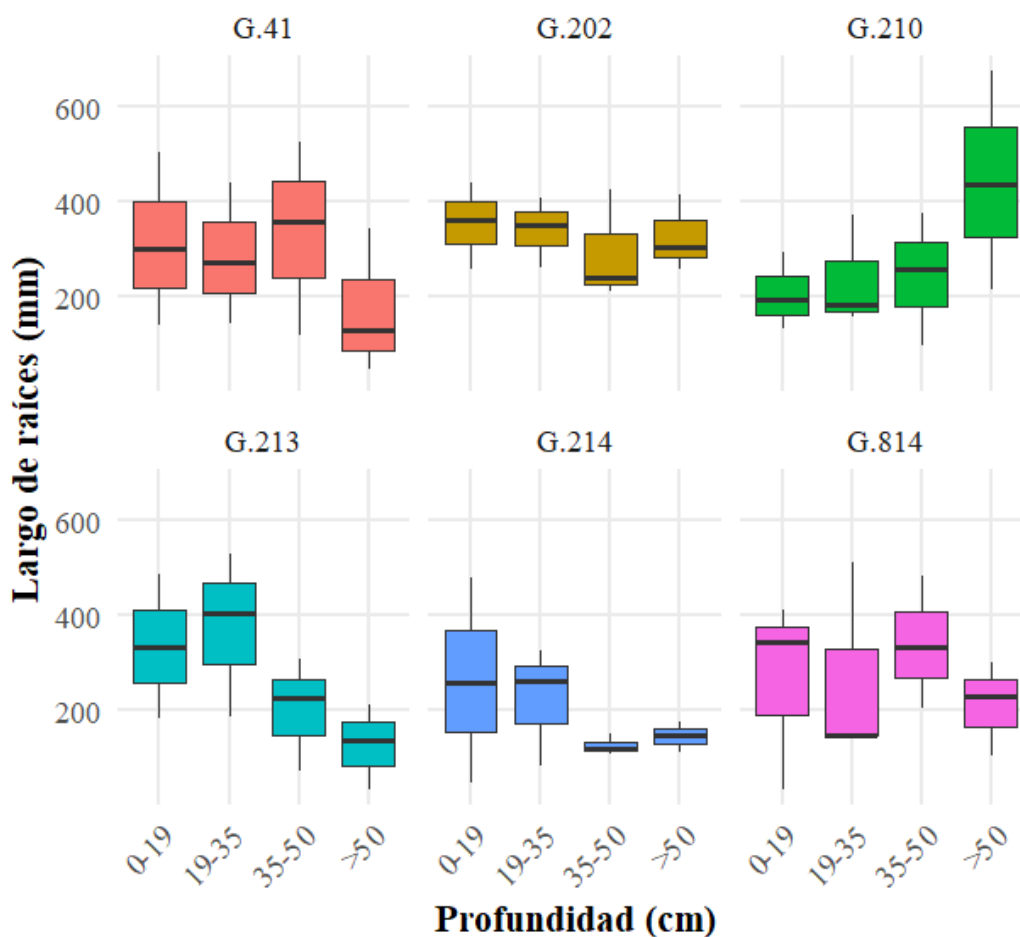


El análisis de la distribución de raíces según profundidad del suelo; 1:0-19 cm, 2:19-35 cm, 3:35-50 cm, 4:50-65 cm; (Figura 11), no se detectó diferencias significativas entre portainjertos, sin embargo, se destaca la alta variabilidad entre repeticiones al igual que en el largo total de raíces. Se pueden observar tendencias como por ejemplo el G.210 tiende a tener un mayor largo de raíces a una profundidad mayor a 50 cm, mientras que por el contrario el G.213 tiende a disminuir el largo de raíces a medida que aumenta la profundidad. El G.214 disminuye el largo de raíces en profundidad más abruptamente a los 35-50 cm. El portainjerto G.202 se mantuvo

constante a lo largo de todo el perfil y presentó una menor variabilidad entre las repeticiones.

Figura 11

Boxplot de longitud de raíces (mm) por portainjerto y profundidad

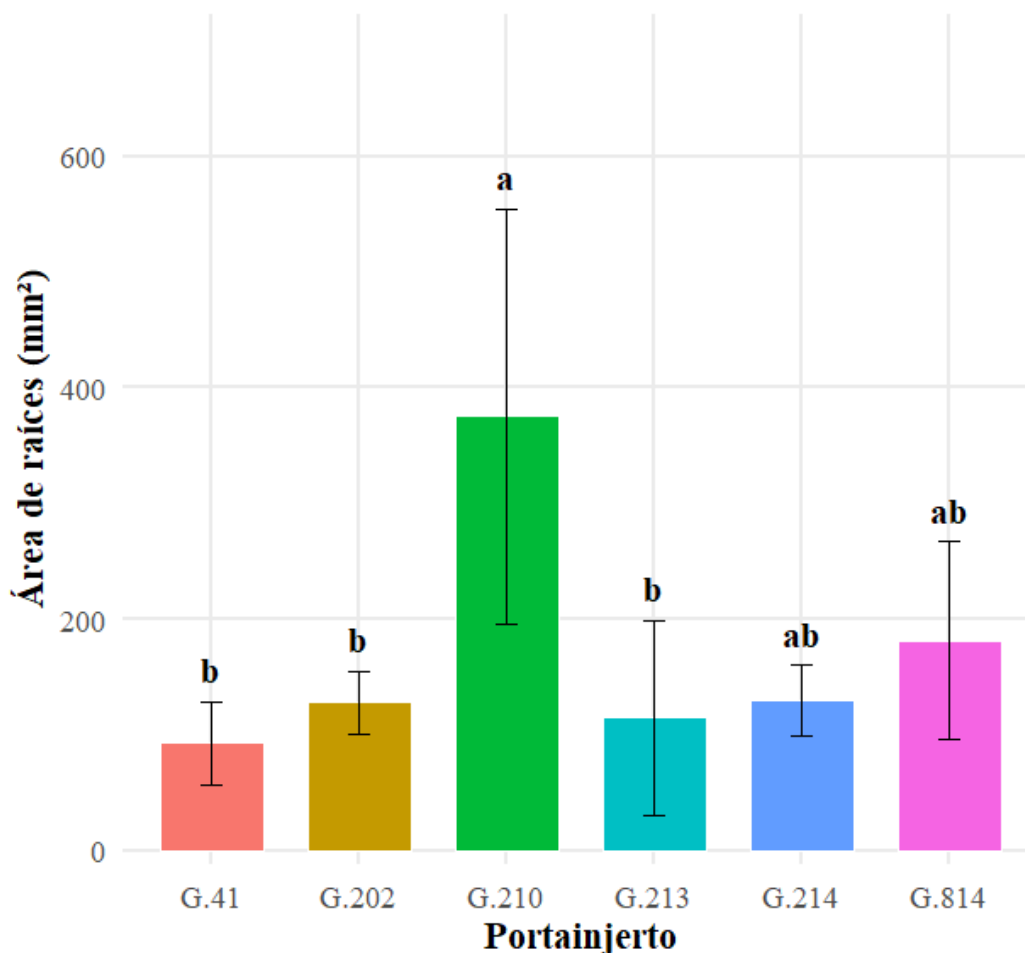


Nota. Profundidades de suelo: 0-19 cm, 19-35 cm, 3: 35-50 cm y 50-65 cm

Al analizar el área ocupada por las raíces se observan diferencias entre portainjertos a una profundidad 50-65 cm. El G.210 fue el portainjerto que presentó mayor área de raíces y se diferenció del G.41, G.213 y G.202. Los portainjertos G.214 y G.814 se presentan en un grupo intermedio (Figura 10).

Figura 12

Área de raíces en mm² a una profundidad de suelo 50-65 cm



Nota. Medias estimadas y error estándar por portainjerto con comparación de Tukey. Letras distintas significan diferencias entre tratamientos con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$

4.2 Largo de brindillas

En cuanto al largo de las brindillas evaluado al finalizar el primer pico de crecimiento de raíces, el análisis estadístico no mostró diferencias significativas, ni en reproductivas ni en vegetativas, entre los diferentes portainjertos (PI) evaluados.

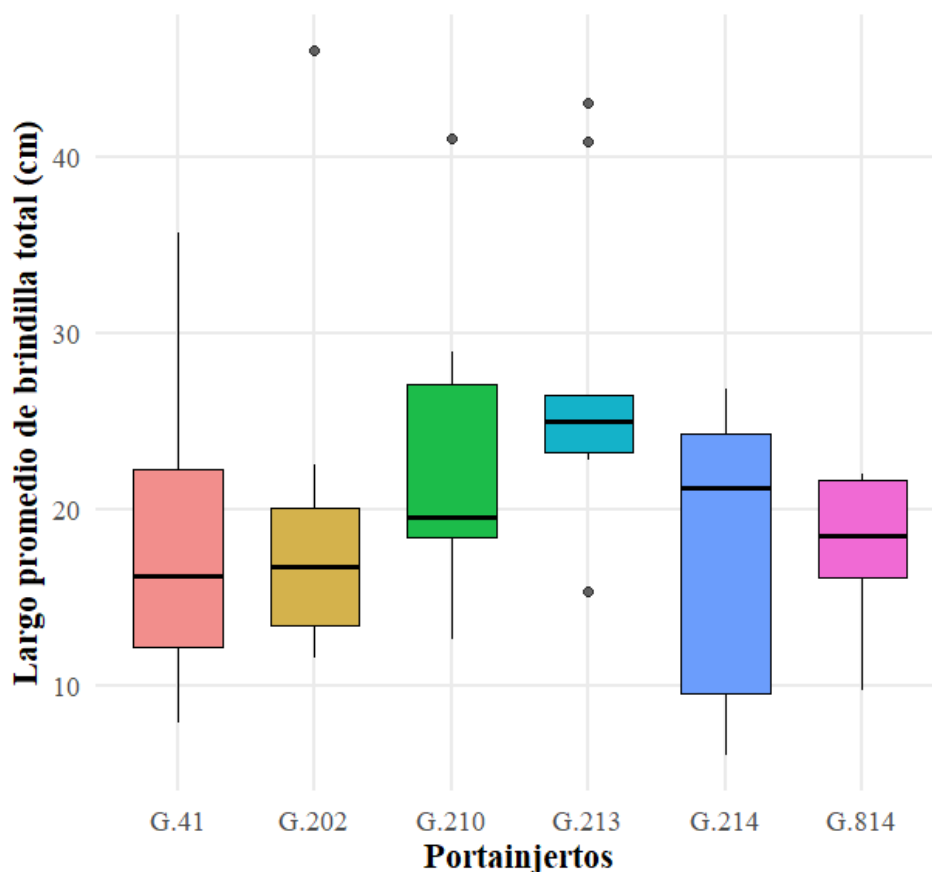
4.2.1 Largo de brindillas total

La variable largo de brindilla total (LBT), calculada como el promedio de brindillas vegetativas y reproductivas que se desarrollaron en una rama por árbol, dio como resultado que no hubo un efecto significativo del portainjerto ($P \geq 0,05$). Sin embargo, el portainjerto G.213 obtuvo una media de 21,8 cm siendo la más alta,

mientras que las medias más bajas fueron la del G.41 y G.202, siendo de 13,7 y 13,2 cm respectivamente (Figura 13).

Figura 13

Boxplot Largo promedio de Brindillas Total (LBT)



4.2.2 Largo de brindillas reproductivas

En cuanto al largo de las brindillas reproductivas (LBR) no hubo una diferencia significativa entre los PI, sin embargo, los datos muestran que la media general fue de 22,5 cm siendo la más baja la obtenida del G.41 (18,2 cm) y la más alta fue la del G.213 (30,5 cm) (Tabla 1).

Tabla 1

Medias de Largo de Brindillas Reproductivas

PI	Media	DE
G.41	18.17	7.73
G.202	22.14	11.18
G.210	22.46	9.88
G.213	30.50	11.64
G.214	21.50	11.76
G.814	19.90	7.16

Nota. DE: Desvíos estándar por portainjerto.

4.2.3 Largo de brindillas vegetativas

El largo de brindillas vegetativas (LBV) no se diferenció significativamente entre los diferentes PI. La media general de los datos recolectados en este trabajo fue de 16 cm siendo el G.210 el que obtuvo la media más alta (24 cm) y la más baja fue la del G.213 (5 cm) (Tabla 2).

Tabla 2

Medias de Largo de Brindillas Vegetativas

PI	Media	DE
G.41	15.90	16.59
G.202	14.21	6.38
G.210	23.99	7.98
G.213	5.00	4.24
G.214	16.77	13.59
G.814	12.65	8.61

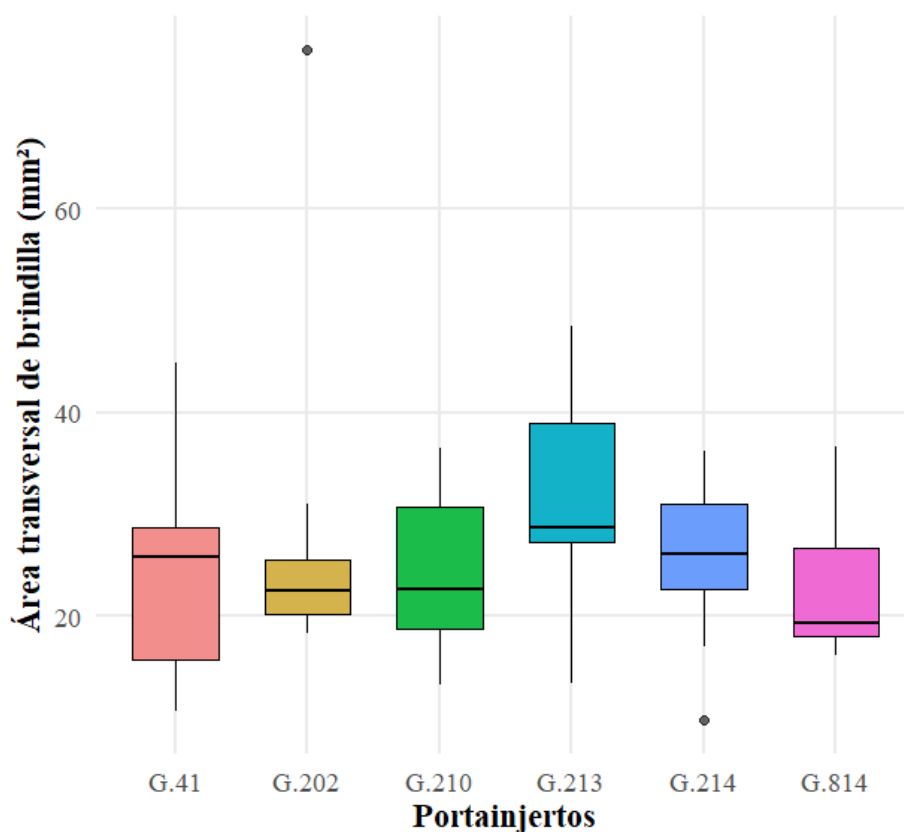
Nota. DE: Desvíos estándar por portainjerto.

4.3 Área transversal de brindillas

No se observaron diferencias significativas en cuanto el área transversal de las brindillas en mm² (ATB). La media general fue de 26,1 mm², siendo la mayor media la del G.213 (31 mm²) y la menor la del G.814 (22,9 mm²) (Figura 14).

Figura 14

Área Transversal de brindillas (mm²)



4.4 Calibre de frutos

La evolución del calibre de fruto (CF) se presenta en la Figura 155. Esta variable presenta una diferencia significativa en la última medición. El PI G.214 se diferenció del G.210, con una media ajustada de 80,7 y 75,1 mm respectivamente (Figura 16).

Figura 15

Evolución del calibre de fruto (mm)

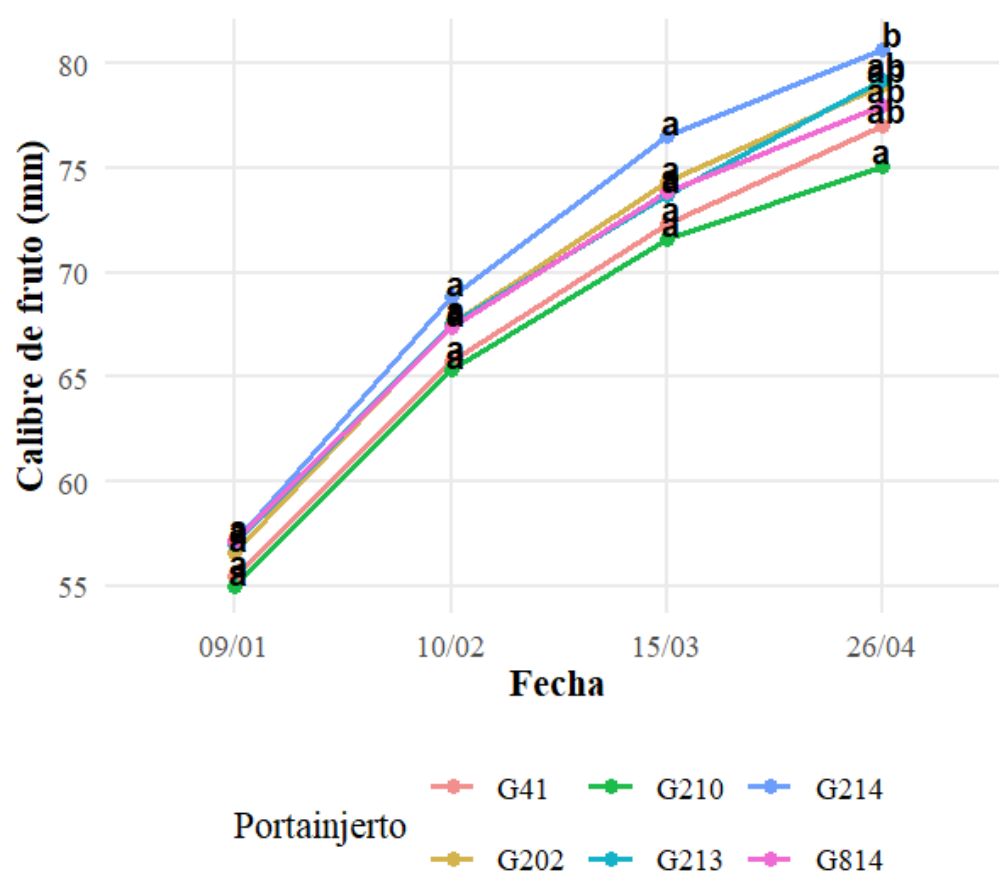
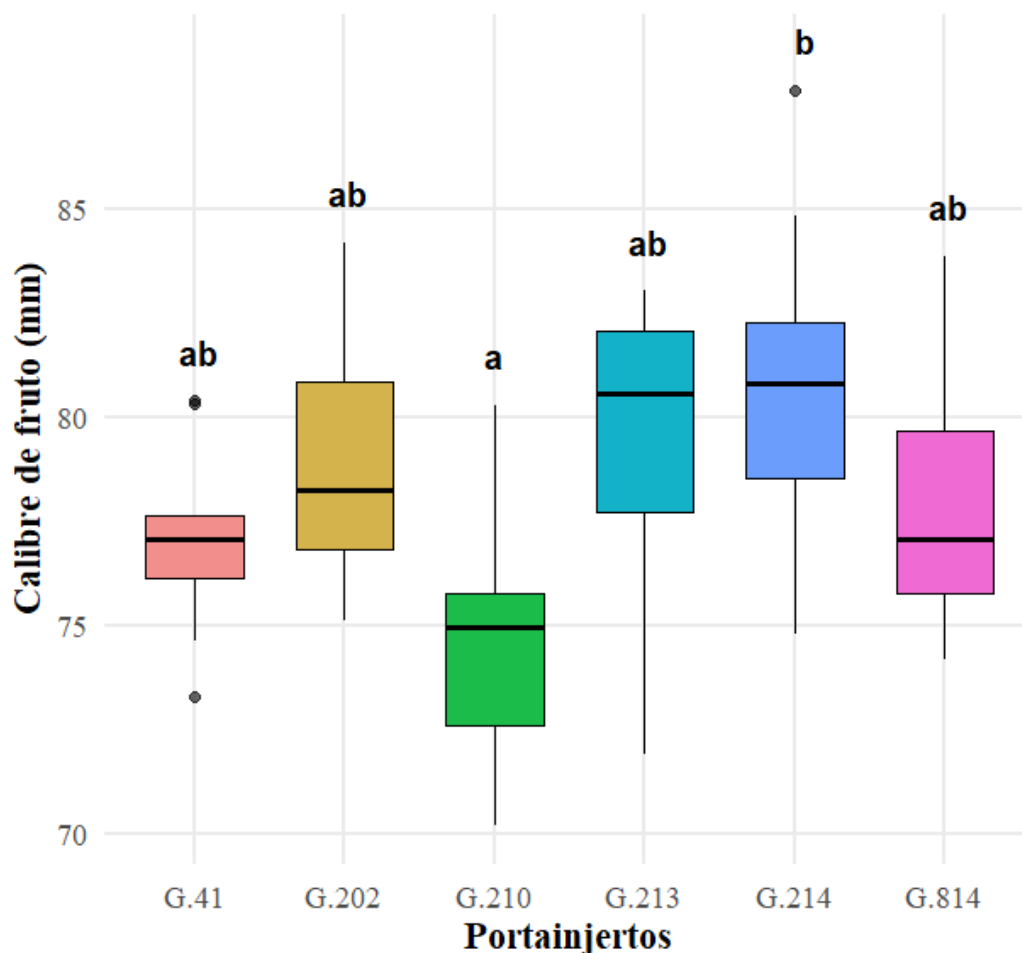


Figura 16

Boxplot de los calibres promedios de los frutos según Portainjerto (PI)



Nota. Letras distintas significan diferencias entre tratamientos con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$

Cuando vemos el número de frutos por rama no hay diferencia significativa entre portainjertos.

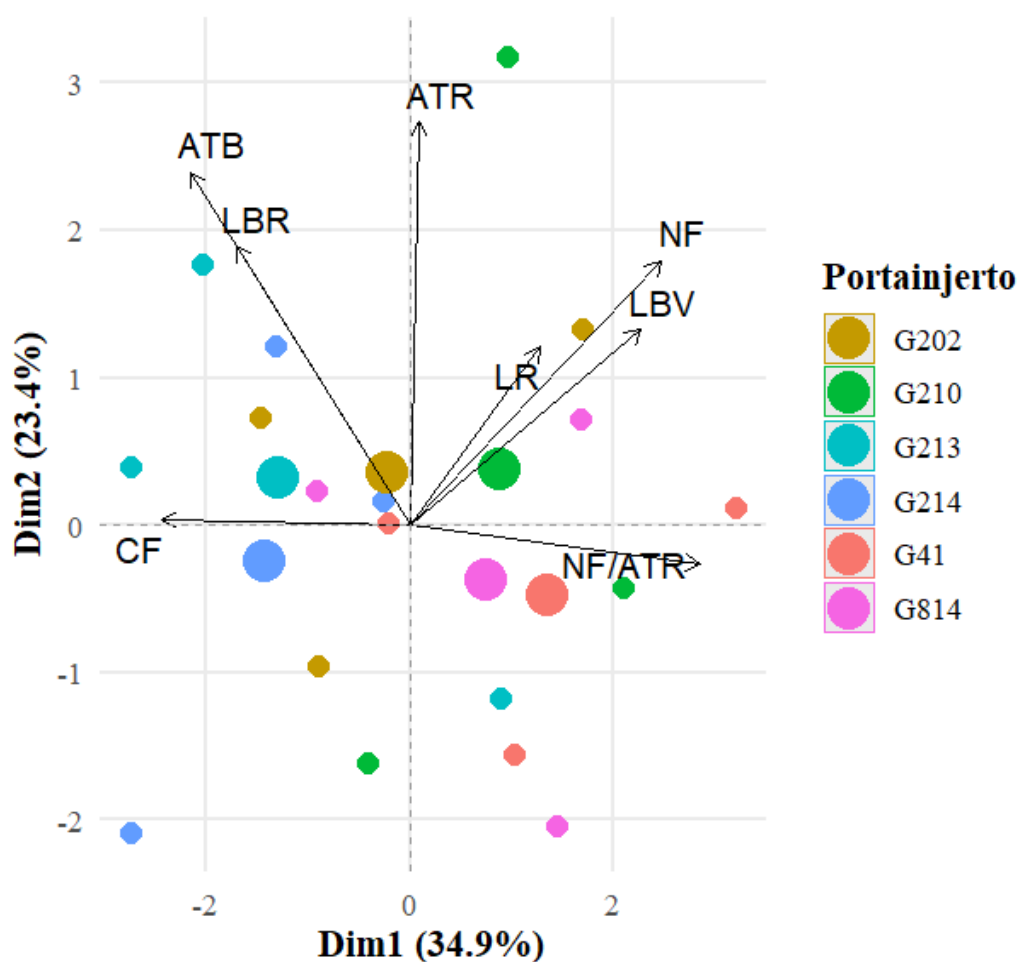
4.5 Análisis conjunto de variables

El análisis de componentes principales sugiere dos planos principales de variación: Dim1 (34.9%) y Dim2 (23.4%), que juntas capturan ~58% de la variabilidad (Figura 17). Las variables Numero de Frutos (NF), LBV y Largo de Raíces (LR) se ubican en el cuadrante superior derecho, la variable Numero de Frutos/Área Transversal de Rama (NF/ATR) se ubica en el cuadrante inferior derecha, ATB se asocia con LBR las cuales están ubicadas en el cuadrante superior izquierdo, ATP se ubicó en el cuadrante superior derecho, pero asociándose más al eje de la dimensión 2 mientras que CF se ubicó en la dimensión superior izquierda asociándose más a la dimensión 1.

La distribución de los PI en el plano presenta cierta agrupación. Algunos portainjertos (PI) se agrupan en la región derecha (asociados a NF, LBV, LR y NF/ATR), lo que sugiere perfiles de rasgos más orientados a mayor número de frutos y mayor crecimiento, siendo ejemplo de esto G.210. El G.41 y G.814 se asociaron a la variable NF/ATR, G.213 se mantuvo entre ATR, LBR y CF y por último el G.214 se asoció en mayor medida con CF.

Figura 17

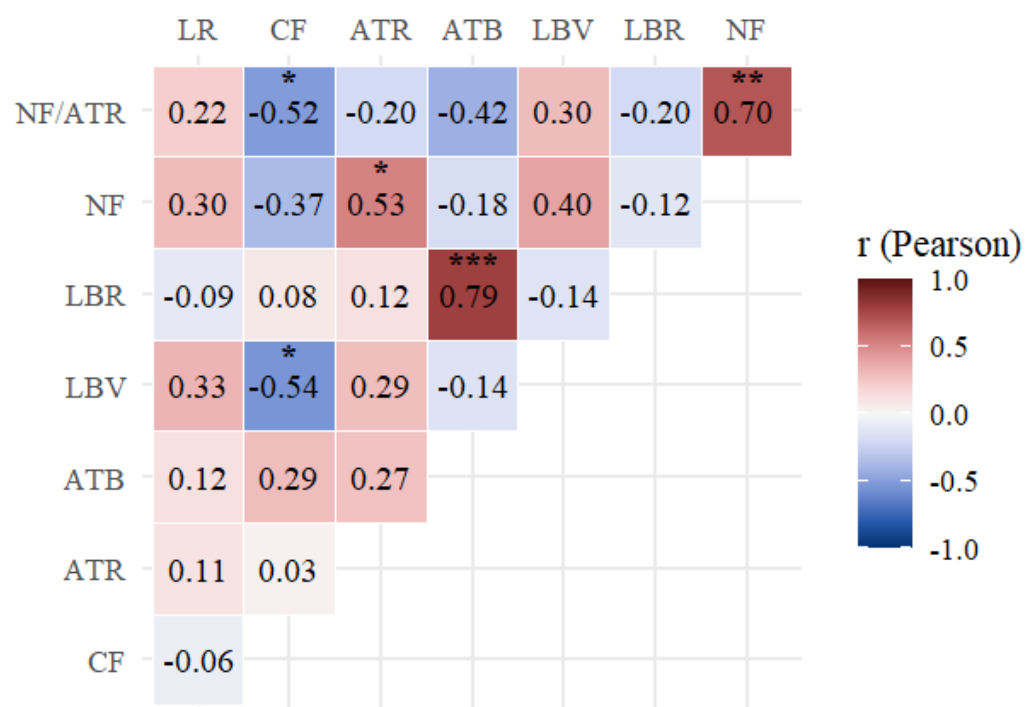
Gráfico de análisis de componentes principales



El análisis de las variables mediante el modelo de Pearson mostro una correlación positiva y significativa entre: LBR y ATB (0,79), la relación NF/ATR y NF (0,70) y NF con ATR (0,53). Por otra parte, dio como resultado una correlación negativa entre: LBV con CF (-0,54) y NF/ATR con CF (-0,52) (Figura 18).

Figura 18

Correlación de las variables mediante Pearson



Nota. Los asteriscos refieren al nivel de significancia de la correlación (*=0,05; **=0,01; ***=0,001).

5 DISCUSIÓN

Los portainjertos de la serie Geneva fueron lanzados en la década del 90. A pesar de las características positivas de dicha serie, se tiene incertidumbre respecto al comportamiento agronómico de éstos, tanto a nivel mundial como nacional (Cabrera & Rodríguez, 2020; Czynczyk & Bielicki, 2012; Fazio et al., 2013; Romero Domínguez et al., 2017), motivo por el cual se plantea evaluar el crecimiento de seis combinaciones de la variedad 'Lady In Red', con los portainjertos más promisorios de la serie Geneva para las condiciones locales. Si bien la mayor parte de los trabajos refieren a información de crecimiento de los PI sin variedad injertada (Acosta et al., 2023; Al Farqani, 2019) o en combinación con las variedades Honeycrisp, Fuji, Gala, Golden Delicious y Red Chief (Cabrera & Rodríguez, 2020; Czynczyk & Bielicki, 2012; Rumberger et al., 2004; Russo et al., 2007), esta evaluación determina las características de crecimiento aéreo, fruto y crecimiento de raíces de las combinaciones de PI Geneva con Lady in Red. A los efectos del análisis de los resultados obtenidos, es relevante destacar que este conforma el primer año de medición desde la instalación de los tubos de raíces y que el mismo se caracterizó por un déficit hídrico severo, que alcanzo a ser declarado emergencia agropecuaria por el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (Cortelezzi et al., 2023). Si bien el rubro cuenta con alta proporción de área regada, las fuentes de agua de los predios resultaron insuficientes para regar adecuadamente los cultivos (Cortelezzi et al., 2023), situación que se presentó también en el cultivo en que fue instalado el ensayo (B. Carra, comunicación personal, s.f.).

En este primer año de evaluación el largo de raíces no presento diferencias significativas entre PI (Figura 10). Este resultado concuerda con lo presentado por Al Farqani (2019) quienes evaluaron crecimiento de raíces de PI Geneva en plantas de 1 año en condiciones de aeroponía. Sin embargo, la observación realizada en nuestro trabajo, respecto de que el PI con el mayor valor de crecimiento de raíces fue G.202 (Figura 10), concuerdan con las observaciones de Acosta y Miguez (2025) quienes evaluando el mismo ensayo un año más tarde reportan un mayor número, longitud y área de raíces en los portainjertos G.202 y G.210.

La distribución de raíces según profundidad fue igual para todos los PI, sin embargo, en el análisis de los estratos de profundidad en forma independientes, podemos observar que el G.210 tiende a tener una mayor longitud de raíces en el estrato de mayor profundidad (50-65 cm) al contrario que el G.213 (Figura 11) este comportamiento fue confirmado en el estudio realizado por Acosta y Miguez (2025). Esta mayor longitud de raíces en profundidad podría considerarse una característica

vinculada al mayor vigor presentado por dicho PI (Center for Technology Licensing, 2023).

El área de raíces en mm^2 no presenta diferencias significativas entre PI. Esto indica que ni el largo de raíces (Figura 12) ni el diámetro de estas presentaron diferencias. Sin embargo, al analizar esta variable por profundidad podemos observar una diferencia significativa a una profundidad de suelo de más de 50 cm (Figura 12). Esta diferencia se da entre el G.210 y los PI G.41, G.213 y G.202. Considerando la escala de vigores presentada para estos PI (Center for Technology Licensing, 2023) entre las variables largo de raíces (LR) y largo de brindillas vegetativas (LBV) (Figura 17) nuestros resultados corroboran la característica de vigoroso del PI G.210.

La variable largo de brindillas no registró diferencias significativas. A diferencia de las otras variables evaluadas, las tendencias mostradas por los valores obtenidos en este ensayo no se alinean con la escala de vigores presentada por Center for Technology Licensing (2023). La combinación con mayor largo de brindillas reproductiva (LBR) fue G.213 (Tabla 1) y la media más baja de las brindillas vegetativas (LBV) también fue el G.213 (Tabla 2). El mayor LBV lo presentó la combinación con el PI G.210. Estos valores de las variables vinculadas al vigor (largo de brindillas) podría estar fuertemente vinculado a la sequía ocurrida en el año de estudio y la imposibilidad de regar en cantidades suficientes para satisfacer la demanda del cultivo, expresando por tanto las habilidades de los distintos PI en respuesta a las condiciones de estrés hídrico. Dicha respuesta de los distintos PI Geneva al déficit hídrico fue evaluada por Rascón-Castillo et al. (2024), quienes identifican al G.210 como el de mejor desempeño en condiciones de estrés hídrico para el 90% de las variables evaluadas en el estudio, diferenciándose del G.41 y G.202, siendo el G.202 el más afectado en el 70% de las variables evaluadas. Esta característica del G.210 con buen desempeño en condiciones de sequía, reportado en la bibliografía, podría estar relacionado con la mayor área de raíces presentada por este PI en el estrato más profundo evaluado en este trabajo (50-65 cm) (Figura 12).

En cuanto al calibre de frutos se puede observar un efecto del PI, diferenciándose el PI G.214 respecto al G.210 (Figura 16). Esto no coincide con la bibliografía consultada, ya que según de Macedo et al., (2021) y Denardi et al., (2015) no hay un efecto estadísticamente significativo de los PI sobre el calibre de los frutos. En un estudio realizado por Rufato et al. (2021) donde se compara los PI G.210, G.213, G.202 y G.814, en condición de replante, se obtuvo que el G.213 anticipó la maduración obteniendo un mayor tamaño de fruto y sólidos solubles totales para las variedades Gala y Fuji, presentando también la mayor cantidad de frutos de tamaño

“grande” en conjunto con el PI G.814, comparado con los PI G.202 y G.210, esta respuesta no se visualiza en este trabajo para la variedad Lady in Red.

El análisis de componentes principales (Figura 17) muestra tendencias de agrupación de los PI, en donde el G.210 tiene mayor expresión de las variables vinculadas al vigor, comportamiento acorde a lo reportado por (Center for Technology Licensing, 2023; Rufato et al., 2021). Este último realiza un análisis de componentes principales, pero en las variedades Gala y Fuji en condiciones de replante, donde el PI G.210 estuvo muy asociado a las variables vinculadas al vigor.

En el caso de los PI G.41 y G.814 y su asociación con la relación de número de frutos sobre el área transversal de la rama (NF/ATR), podemos identificar una mayor eficiencia productiva, hecho que se condice con lo presentado por Romero Domínguez et al. (2017) y Czynczyk y Bielicki (2012), donde se evaluaron distintos portainjertos con la variedad Golden Delicious y muestran como el PI con mayor eficiencia al G.41, estos datos se contraponen con lo presentado por Rufato et al. (2021), quienes mediante un análisis de componentes principales muestran al portainjerto G.213 como el PI con mayor eficiencia productiva, tanto en la variedad Fuji como en la variedad Gala y posicionan al PI G.814 como el más asociado a características de productividad acumulada. En oposición a las variables vinculadas al vigor, G.214 marcó una mayor asociación con el calibre de fruto (CF), comportamiento que es esperable en PI menos vigorosos con mayor eficiencia productiva (Autio et al., 2011; Denardi et al., 2015).

6 CONCLUSIÓN

La información obtenida en este estudio constituye la primera evaluación de portainjertos de la serie Geneva mediante minirizotron en condiciones de campo en Uruguay, atravesando un periodo de déficit hídrico. Cómo tal, ha confirmado algunas características citadas en la bibliografía y ha refutado otras tantas.

Durante el presente estudio no se visualizan diferencias significativas en las variables radicales evaluadas, exceptuando el área de raíces en profundidad, donde el portainjerto G.210 presenta mayor área en la profundidad 50-65 cm, aspecto que podría vincularse con el mejor desempeño de este PI en condiciones de sequía. Sin embargo, las tendencias observadas en este trabajo fueron confirmadas en el año siguiente de evaluación, las cuales son acordes con lo esperado de acuerdo a la escala de vigor de la Universidad de Cornell.

Aunque el calibre de fruto muestra diferencias significativas en los portainjertos de la serie, obteniendo un mayor calibre en el PI G.214 respecto al G.210, no existe una asociación clara entre el calibre de fruto respecto a la combinación de los distintos portainjertos, tanto en este trabajo como en la bibliografía consultada.

Es necesario realizar más evaluaciones de este tipo, buscando reflejar una mayor amplitud de escenarios climáticos.

Los datos obtenidos son relevantes para las definiciones de criterio de manejo de las distintas combinaciones en tanto marcos de plantación, densidades y sistemas de conducción, entre otros.

En este trabajo se tomaron mediciones a lo largo del ciclo, lo que generó un gran banco de información, el cual sería importante en futuras evaluaciones poder analizar en su totalidad. Dicho análisis permitiría visualizar si hay diferencias o no entre los portainjertos en cuanto a la dinámica de crecimiento de las raíces, ya sea, en el comienzo de los flujos de crecimiento o en la duración de estos en un mismo ambiente de desarrollo.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, S., & Miguez, E. (2025). *Evaluación del crecimiento radicular de portainjertos de la serie geneva en manzano (Malus domestica borkh.) bajo condiciones del sur de Uruguay* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri.
<http://tesis.fagro.edu.uy/index.php/tg/catalog/book/394>
- Acosta, T. F., de Mello-Farias, P. C., Herter, F. G., Bologna, C. D. C., Marques, L. O. D., & Dias, C. S. (2023). Hydraulic conductivity and native embolism of Geneva® Series apple rootstocks measured by the XYL'EM-Plus® embolism meter. *Scientia Agricola*, 80, Artículo e20220224. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2022-0224>
- Agustí, M. (2010). *Fruticultura*. Mundi-Prensa.
- Al Farqani, A. S. A. (2019). *Evaluation of root's architecture, growth performance and fruiting of Honeycrisp™ apple scion grafted on 8 rootstocks in response to soil and solution's pH using field, aeroponics, and minirhizotron growing systems* [Disertación doctoral]. Cornell University.
- Álvarez Requejo, S. (1983). *El manzano* (4ª ed.). Publicaciones de Extensión Agraria.
- Araujo Pallares, D. L. (2021). *Fenología floral, rendimiento y calidad de fruto en "honeycrisp" con diferentes portainjertos de manzano [Malus sylvestris (L.) var. domestica (Borkh) Mansf)]* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Chihuahua]. Repositorio Institucional Posgrado.
<http://repositorio.uach.mx/id/eprint/415>
- Atkinson, D. (1983). The growth, activity and distribution of the fruit tree root system. *Plant and Soil*, 71, 23-35.
- Autio, W., Robinson, T. L., Bradshaw, T., Cline, J., Crassweller, R. M., Embree, C. G., Hoover, E., Lang, G., Masabni, J., Parker, M. L., Perry, R., Reighard, G. L., Schupp, J., & Warmund, M. (2011). Performance of several dwarfing rootstocks with "Fuji" and "McIntosh" as scion cultivars in the 1999 NC-140 dwarf apple rootstock trials. *Acta Horticulturae*, (903), 319-326.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.41>
- Auvil, T. D., Schmidt, T. R., Hanrahan, I., Castillo, F., McFerson, J. R., & Fazio, G. (2011). Evaluation of dwarfing rootstocks in Washington apple replant sites. *Acta Horticulturae*, (903), 265-271. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.903.33>

- Barba Álvarez, A. (1981). *Propagación vegetativa "in vitro" de los portainjertos EM-26 y MM-106 del manzano (Malus sylvestris Mili) (estudios preliminares)* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Digital de la Dirección General de Bibliotecas, UNAM.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000002574>
- Beers, E. H., Cockfield, S. D., & Gontijo, L. M. (2010). Seasonal phenology of woolly apple aphid (Hemiptera: Aphididae) in central washington. *Environmental Entomology*, 39(2), 286-294. <https://doi.org/10.1603/EN09280>
- Bengough, A. G., Bransby, M. F., Hans, J., McKenna, S. J., Roberts, T. J., & Valentine, T. A. (2006). Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. *Journal of Experimental Botany*, 57(2), 437-447.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erj003>
- Bernardi, J., Denardi, F., & Hoffmann, A. (2004). Cultivares e porta-enxertos. En G. R. Nachtigall (Ed.), *Maçã: Produção* (pp. 32-46). Embrapa.
- Borscak, J. D., & Covatta, F. (2007). Propagación sexual de especies frutales. En G. O. Sozzi (Ed.), *Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (pp. 106-131). Universidad de Buenos Aires.
- 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://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14498/1/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-73-76.pdf>
- Campana, B. M. R., & Ochoa, M. J. (2007). Propagación vegetativa o agámica de especies frutales. En G. O. Sozzi (Ed.), *Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (pp. 133-197). Universidad de Buenos Aires.
- Castañó, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Center for Technology Licensing. (2023). *GENEVA® Apple Rootstocks Comparison Chart*. Cornell University. <https://ctl.cornell.edu/wp-content/uploads/plants/GENEVA-Apple-Rootstocks-Comparison-Chart.pdf>

- Chauhan, A., Ladon, T., & Verma, P. (2020). Strategies for rootstock and varietal improvement in apple: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 9(5), 2513-2516. https://www.phytojournal.com/archives/2020/vol9issue5/PartAI/9-5-403-591.pdf?utm_source=chatgpt.com
- CID Bio-Science. (2023). *RootSnap!* (Versión 1.4.0.113) [Software]. <https://cid-inc.com/plant-science-tools/root-measurement-plants/ci-600-in-situ-root-imager/>
- Cortelezzi, Á., Rava, C., Gutiérrez Silva, S., Mila, F., Gorga, L., Laguna, H., Barboza, N., & Ackermann, M. N. (2023). Impactos del déficit hídrico 2022-2023 en la producción agropecuaria. En *Anuario OPYPA 2023*. MGAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuarioopypa2023/estudios/1/e1web/1EImpactos.pdf>
- Czynczyk, A., & Bielicki, P. (2012). Eleven year evaluation of american (Geneva®) and polish rootstocks with 'Golden Delicious Reinders' apple in Poland. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 20(2), 11-21. <https://doi.org/10.2478/v10290-012-0011-y>
- Danilovich, M. (2024). *Rootstocks for Apples*. WVU Extension Agriculture and Natural Resources. https://extension.wvu.edu/files/d/e34e0199-3b6f-430c-808c-2deb7714d9f0/rootstocks-for-apples-fact-sheet_digital.pdf
- de Macedo, T. A., da Silva, P. S., Sander, G. F., De Rossi, A., Kretschmar, A. A., Petry, D., & Rufato, L. (2021). G.213 rootstock – Alternative to apple tree cultivation in different planting areas in southern Brazil. *Scientia Horticulturae*, 286, Artículo e110219. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110219>
- Denardi, F., Kvitschal, M. V., Basso, C., Boneti, J. I. D. S., & Katsurayama, Y. (2015). Desempenho agrônômico de porta-enxertos de macieira da serie americana 'Geneva®' no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 37(1), 104-111. <https://doi.org/10.1590/0100-2945-438/14>
- Dirección de Suelo. (2019). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: Descripciones, datos físicos y químicos de los suelos dominantes* (Vol. 3). MAP. <https://descargas.mgap.gub.uy/DGRN/CONEAT/Ap%C3%A9ndice%20I%20tomo%20III%20Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay.pdf>

- Dirección General de la Granja. (2023a). *Registro Nacional Frutihortícola: Reporte anual 2023*. MGAP. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/REPORTE%20RNFH%202023-Rew.pdf>
- Dirección General de la Granja. (2023b). *Registro Nacional Frutihortícola: Reporte preliminar 2023*. MGAP.
- Docampo, R., & Silva, A. (2014). Manejo del suelo y nutrición mineral. En J. Soria (Ed.), *Manual del duraznero: La planta y la cosecha* (pp. 1-32). INIA. <https://inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/bd-108-p-32.pdf>
- Durán, A. (Coord.). (1976). *Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay*. MAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/Carta%20de%20Reconocimiento%20de%20Suelos%20del%20Uruguay%201.1.000.000_0.pdf
- Europa Fruit Tree Rootstocks. (2025). *El programa*. <https://geneva-rootstocks.com/es/el-programa/>
- 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., & Robinson, T. (2008). Modification of nursery tree architecture with apple rootstocks: A breeding perspective. *New York Fruit Quarterly*, 16(1), 13-16. <https://www.researchgate.net/publication/43269811>
- Fernandez, 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://journals.ashs.org/view/journals/jashs/120/1/article-p6.xml?isSearch=true>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s.f.). *Crops and livestock products*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Google. (2025). [INIA “Las Brujas”, Canelones, Uruguay. Mapa]. Recuperado el 20 de noviembre de 2025, de <https://www.google.com/maps/@-34.6721243,-56.3275187,14.5z>
- Head, B. C. (1967). Effects of seasonal changes in shoot growth on the amount of unsuberized root on apple and plum trees. *Journal of Horticultural Science*, 42(2), 169-180. <https://doi.org/10.1080/00221589.1967.11514205>

- Hoffmann, A., & Bernardi, J. (2004). Aspectos botánicos. En G. R. Nachtigall (Ed.), *Maçã: Produção* (pp. 17-24). Embrapa.
- Hoffmann, A., & Nachtigall, G. R. (2004). Factores edafoclimáticos. En G. R. Nachtigall (Ed.), *Maçã: Produção* (pp. 25-31). Embrapa.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Banco de datos agroclimáticos*.
<https://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2022). *IDE-INIA: Visualizador SIG*.
<https://sig.inia.org.uy/ideinia/visualizador.html>
- Instituto Uruguayo de Meteorología. (s.f.). *Características climáticas*.
<https://www.inumet.gub.uy/clima/estadisticas-climatologicas/caracteristicas-climaticas>
- Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. En W. Köppen & R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie in fünf Bänden* (pp. 11-43). Verlag von Gebrüder Borntraeger.
- Kurz, W. A., & Kimmins, J. P. (1987). Analysis of some sources of error in methods used to determine fine root production in forest ecosystems: A simulation approach. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(8), 909-912.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1139/x87-142>
- Los Álamos de Rosauer (2010). *Catálogo del productor*.
<https://es.scribd.com/doc/77021441/catalogo-de-frutales>
- Mandl, B. M. (1990). *Portainjertos del manzano*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2842/1/111219220807113842.pdf>
- Mazzola, M. (1998). Elucidation of the microbial complex having a causal role in the development of apple replant disease in Washington. *Phytopathology*, 88(9), 930-938. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1998.88.9.930>
- McMichael, B. L. (1986). Growth of roots. En J. R. Mauney & J. M. Stewart (Eds.), *Cotton Physiology* (pp. 29-38). The Cotton Foundation.
- Najt, E., Arjona, C., Ojer, M., Reginato, G., & Weibel, A. (2011). Portainjertos y calidad de plantas. En M. Ojer (Ed.), *Producción de duraznos para industria* (pp. 17-28). Universidad Nacional de Cuyo. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/120287>

- Norelli, J. L., Aldwinckle, H. S., Holleran, H. T., Robinson, T. L., & Johnson, W. C. (2002). Resistance of "geneva" apple rootstocks to erwinia amylovora when grown as potted plants and orchard trees. *Acta Horticulturae*, (590), 359-362. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.590.53>
- Parkes, H., Darbyshire, R., & White, N. (2020). Chilling requirements of apple cultivars grown in mild Australian winter conditions. *Scientia Horticulturae*, 260, Artículo e108858. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108858>
- Rascón-Castillo, M., Lozano-Martínez, C. A., Jacobo-Cuellar, J. L., Frias-Moreno, M. N., Cruz-Álvarez, O., Hernández-Rodríguez, O. A., Ojeda-Barrios, D. L., & Parra-Quezada, R. Á. (2024). Apple tree rootstocks [*Malus sylvestris* (L.) mill. Domestic var (Borkh) Mansf.] under water stress. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1773>
- Razeto Migliaro, B. (2006). *Para entender la fruticultura* (4ª ed.). Bruno Razeto.
- Robinson, T. (2011). Advances in apple culture worldwide. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 33(Spe. 1), 37-47. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500006>
- Romero Domínguez, L., Parra Quezada, R. A., Jacobo Cuellar, J. L., Ojeda Barrios, D. L., Guerreño Prieto, V. M., Ávila Quezada, G. D., & Ruiz Anchondo, T. de J. (2017). Respuesta de portainjertos de manzano a vigor, eficiencia de producción y concentraciones foliar y en fruto de NPK. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(4), 849-861. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.12>
- Rufato, L., da Silva, P. S., Kretzschmar, A. A., Bogo, A., de Macedo, T. A., Welter, J. F., Fazio, G., & Petry, D. (2021). Geneva® series rootstocks for apple trees under extreme replanting conditions in southern Brazil. *Frontiers in Plant Science*, 12, Artículo e712162. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.712162>
- Rumberger, A., Yao, S., Merwin, I. A., Nelson, E. B., & Thies, J. E. (2004). Rootstock genotype and orchard replant position rather than soil fumigation or compost amendment determine tree growth and rhizosphere bacterial community composition in an apple replant soil. *Plant and Soil*, 264, 247-260. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:PLSO.0000047760.13004.94>
- Russo, N. L., Robinson, T. L., Fazio, G., & Aldwinckle, H. S. (2007). Field evaluation of 64 apple rootstocks for orchard performance and fire blight resistance. *HortScience*, 42(7), 1517-1525. <https://doi.org/https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.7.1517>

- Sánchez, E. E. (2007). Nutrición mineral y fertilización de frutales de hoja caduca. En G. O. Sozzi (Ed.), *Árboles frutales: Ecofisiología, cultivo y aprovechamiento* (pp. 395-434). Universidad de Buenos Aires.
- Santantonio, D., & Grace, J. C. (1987). Estimating fine-root production and turnover from biomass and decomposition data: A compartment–flow model. *Canadian Journal of Forest Research*, 17(8), 900-908. <https://doi.org/10.1139/x87-141>
- Severino, V., Arbiza, H., Arias, M., Manzi, M., & Gravina, A. (2011). Modelos de cuantificación de frío efectivo invernal adaptados a la producción de manzana en Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*, 15(2), 19-28. <https://doi.org/10.31285/AGRO.15.589>
- Severino, V., Arias-Sibillotte, M., Dogliotti, S., Frins, E., Gonzalez-Talice, J., & Yuri, J. A. (2020). Climatic and physiological parameters related to the progress and prediction of apple sunburn damage in a neotropical climate. *Advances in Horticultural Science*, 34(4), 431-440. <https://oaj.fupress.net/index.php/ahs/article/view/9764/9186>
- Van der Zwet, T., & Beer, S. V. (1999). *Fire blight: Its nature, prevention, and control: A Practical guide to integrated disease management*. USDA. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.309584>
- Waddington, J. (1971). Observation of plant roots in situ. *Canadian Journal of Botany*, 49(10), 1850–1852. <https://doi.org/10.1139/b71-261>
- Webber, M. (2021). *The effect of biostimulants on the performance of newly planted apple trees in fumigated soil* [Tesis de maestría, Stellenbosch University]. Repositorio SUNScholar. <https://scholar.sun.ac.za/server/api/core/bitstreams/51a0e455-c1a8-40fa-9be6-06aad5aff848/content>
- Webster, T., Tobutt, K., & Evans, K. (2000). Breeding and evaluation of new rootstocks for apple, pear and sweet cherry. *The Compact Fruit Tree*, 33(4), 100-104. <https://anachile.cl/wp-content/uploads/2016/02/Breeding-y-evaluación-nuevos-patrones-Manzano-peral-y-cerezo.pdf.pdf>
- Westwood, M. N. (1993). *Temperate-zone pomology: Physiology and culture* (3rd ed.). Timber Press.

8 ANEXOS

Anexo A*Perfil tipo observado en la Unidad L1*

Nota. Extraído a través del visualizador de INIA (2022), donde, seleccionando la unidad de suelos L1, se obtiene un archivo de A. Silva y R. Docampo (comunicación personal, 2013), que detalla las características geomorfológicas y descripción del perfil de suelo asociado a dicha unidad. Al momento de la realización de este trabajo dicho archivo no está vigente para su visualización en la web.

Bibliografía Anexo A

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2022). *IDE-INIA: Visualizador SIG*.

<https://sig.inia.org.uy/ideinia/visualizador.html>

Anexo B

Descripción morfológica de fase superficial de Unidad

Fase superficial

Horizonte y Profundidad (cm)	Descripción morfológica
0 – 16 A	Negro (10YR 2/1); bloques subangulares y granular, firmes, medio y finos; franco arcillo limoso, pegajoso, plástico; raíces finas, abundantes; transición clara.
16 – 22 AC1	Negro (10YR 3/1), mezcla de colores, naranja parduzco (7.5YR 6/4); arcillo limoso; pegajoso plásticos; bloques subangulares, medios, firmes, rompen en granular; raíces comunes finas; transición gradual.
22 – 34 AC2	Negro (10YR 3/1), mezcla de colores, naranja parduzco (7.5YR 6/4), veteados negros (10YR2/1); bloques subangulares, firmes medios y gruesos- Transición clara.
34 – 48 C_k	Pardo amarillento (10YR 5/3), moteados pardo amarillento grisáceo (10YR 4/2); franco arcillo limoso, pesado, plástico, ligeramente pegajoso; bloques subangulares medios, débiles; concreciones de carbonato de calcio, abundantes, pulverulentas; raíces medias y gruesas, comunes. Transición clara
48 – 65 AC2_k	Pardo oscuro (10YR 3/3); arcillo Limoso, liviano; bloques subangulares medios, moderados; vetas, negro parduzco (10YR 2/2); concreciones carbonato de calcio, comunes. Transición clara, límite ondulante.
65 – 82 AC3_k	Pardo oscuro (10YR 3/3); franco arcillo limoso, plástico, pegajoso; bloques subangulares medios moderados. Cara de deslizamientos. Transición gradual, límite ondulante, concreciones carbonato comunes.
82 + C_k	Pardo (7.5YR 5/3); arcillo limoso; concreciones de carbonato de calcio, abundantes betas negras.

Nota. Extraído a través del visualizador de INIA (2022), donde, seleccionando la unidad de suelos L1, se obtiene un archivo de A. Silva y R. Docampo (comunicación personal, 2013), que detalla las características geomorfológicas y descripción del perfil de suelo asociado a dicha unidad. Al momento de la realización de este trabajo dicho archivo no está vigente para su visualización en la web.

Bibliografía Anexo B

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2022). *IDE-INIA: Visualizador SIG*.

<https://sig.inia.org.uy/ideinia/visualizador.html>

Anexo C

Descripción morfológica de fase profunda de Unidad L1

Fase profunda

Horizonte y Profundidad (cm)	Descripción morfológica
0 – 28 A	Negro (10YR 2/1); franco arcillo limoso, pesado; bloques subangulares, medios, firmes, rompe a granular; raíces finas, abundantes. Transición clara.
28 – 55 Bt1	Negro (10YR 3/1); franco arcillo limoso a arcillo limoso; bloques subangulares medios y gruesos, firmes; películas de arcilla, finas, abundantes, continuas; raíces finas abundantes; caras de deslizamiento (ss); pequeños fragmentos de roca. Transición gradual.
55 – 68 Bt2	Negro parduzco (7.5YR 3/1); arcilloso a arcillo limoso; bloques angulares, medios y gruesos, fuertes; películas de arcilla, pocas discontinuas; raíces comunes; transición clara.
68 – 79 BC_k	Pardo grisáceo (7.5YR 4/2) y negro (10YR 2/1); arcillo limoso; bloques medios, moderados a firme; concreciones de carbonato de calcio, abundantes; vetas negras; raíces finas, pocas; transición clara con límites ondulantes.
79 + C_k	Pardo (7.5YR 5/3); arcillo limoso; concreciones de carbonato de calcio, abundantes vetas negras

Nota. Extraído a través del visualizador de INIA (2022), donde, seleccionando la unidad de suelos L1, se obtiene un archivo de A. Silva y R. Docampo (comunicación personal, 2013), que detalla las características geomorfológicas y descripción del perfil de suelo asociado a dicha unidad. Al momento de la realización de este trabajo dicho archivo no está vigente para su visualización en la web.

Bibliografía Anexo C

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (2022). *IDE-INIA: Visualizador SIG*.

<https://sig.inia.org.uy/ideinia/visualizador.html>