
INFORME FINAL 2020 - 2023

PROYECTO: FSA_1_2018_1_152506. Nuevos sistemas de alta producción de cítricos bajo malla

ACTIVIDAD: Componente 1. Modificación del ambiente climático y evaluación de la dinámica del agua, nutrientes y parámetros fisiológicos.

APARTADO: Ambiente y Fisiología del Cultivo

Alvaro Otero, Delia Machado, Matías Manzi, Andrés Di Lorenzi, Fernando Rivas.
aotero@inia.org.uy

Objetivo. Evaluar los cambios ambientales (micrometeorológicos) en las condiciones de producción bajo mallas y cuantificar algunas variables de la dinámica del agua y funciones fisiológicas de los árboles.

Metodología.

a) Medición del contenido de agua del suelo

Se caracterizó la retención de agua en los diferentes horizontes del suelo en cada ambiente. Para el muestreo del suelo imperturbado se utilizaron cilindros muestreadores de acero inoxidable de 100 mL. Se muestrearon 3 cilindros en cada parcela a tres profundidades: 0,10-0,15 m, 0,25-0,30 m y 0,50-0,55 m, que corresponden con los horizontes del suelo. Posteriormente al acondicionamiento de la muestra, se pusieron a saturar en agua y posteriormente se midió la pérdida de agua desde saturación hasta 1,5 MPa utilizando una olla de presión con sus respectivos platos de cerámica (SoilMoisture, USA). Finalmente se calculó la densidad aparente y el contenido volumétrico del agua en el suelo a 0,1 y 1,5 MPa de presión.

A los efectos de implementar las decisiones de riego y de evaluar el contenido de agua del suelo en los diferentes ambientes, se utilizó un modelo de balance hídrico simple (BHS) basado en los procedimientos de FAO 56 (Allen, 1998). El BHS comenzó con el suelo a capacidad de campo (CC). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se estimó con el software Ref-ET (Allen, 2000) a partir de los datos de radiación, temperatura, precipitaciones y viento provenientes de las estaciones meteorológicas de cada ambiente. Se utilizó el K_c simple para cítricos según etapa fenológica obtenido en Uruguay (Petillo y Castel, 2007). Para estimar la evapotranspiración del cultivo ajustada (ET_{c aj}) se utilizó la ecuación 1. Se definió el criterio de manejar un perfil efectivo del sistema radical de 0,50 m, donde se encuentra la mayor parte del sistema con raíces de absorción de agua (Otero y Goñi, 2021). También se definió el agotamiento permitido del agua del suelo en p=60 % y su corrección según (Allen, 1998). El umbral (P) se corrigió por la ET_c, de acuerdo con la ecuación de ajuste: $P = P \text{ diseño} + 0,04 * (5 - ET_c)$. El valor del umbral "P" estima el agua

fácilmente aprovechable (AFA), que es la mínima cantidad de agua en el suelo para que el cultivo se encuentre hídricamente óptimo.

Cuando el riego o las precipitaciones no cubren la demanda del cultivo, se genera un agotamiento de humedad en el suelo (AH). Si el déficit es mayor al umbral, el coeficiente de estrés (Ks) será menor a 1 y el cultivo ajustará su consumo de agua debido al proceso de ajuste estomático. Esta reducción en el consumo de agua por el cultivo está dada por la relación entre el déficit acumulado y el agua fácilmente aprovechable (AFA). Si el Ks es 1, no habrá ajuste estomático y la ETc será igual a ETc aj; pero si Ks es menor a 1, la ETc aj será menor que la ETc.

Por lo tanto, la estrategia de riego utilizada consistió en que el contenido de agua del suelo (CAS) no descendiera por debajo del nivel de agotamiento permisible (NAP) en cada uno de los ambientes.

$$ETc\ aj = ETo * Ks * Kc \text{ (Ec. 1)}$$

$$Ks = (ADT - AH) \cdot [(1-P)^{-1} * ADT^{-1}] \text{ (Ec 2)}$$

Dónde:

ETc aj: ETc ajustada (mm. día⁻¹)

ETo: evapotranspiración de referencia del cultivo (Penman-Monteith modified by FAO)

Ks: coeficiente de estrés (0-1)

AH agotamiento de humedad en la zona radical (mm)

ADT: agua disponible total en la zona radical (mm)

P: fracción del ADT que el cultivo extrae sin sufrir estrés hídrico (umbral de riego)

La productividad del agua (WP) se estimó con la siguiente fórmula:

$$WP = \text{Rendimiento (kg. ha}^{-1}\text{)} / \text{Riego + precipitaciones (m}^3\text{. ha}^{-1}\text{)} \text{ (Naroua et al. 2014, Pradhan et al. 2013, Albaji et al. 2011)}$$

b) Variables fisiológicas y nutricionales

b1) Intercambio de gases y fluorescencia del fotosistema II de las hojas

En cada una de las brotaciones (primavera, verano y otoño) se evaluó la fotosíntesis en la hoja de las plantas bajo los distintos ambientes, a través de la asimilación de CO₂ de la hoja y de la fluorescencia de la clorofila del fotosistema II. En cada evaluación se seleccionaron 12 árboles en cada ambiente. Para la A_{CO2} se seleccionaron en cada árbol 3 hojas bien desarrolladas, de la misma edad crecimiento, aclimatadas a la misma posición respecto al sol y en muy buenas condiciones sanitarias y anatómicas, en la brotación respectiva. Se separaron las medidas en las plantas de los tres ambientes en dos grupos horarios, teniendo en cuenta la variación horaria de la radiación, temperatura y déficit de presión de vapor de los ambientes. A la mañana, con mediciones en las hojas entre las 9:00 y 10:30 horas, y otro grupo independiente de plantas de los tres ambientes medidas entre las 11:00 y 12:30 horas (a la tarde). Con un analizador infrarrojo de gases portátil: CIRAS-3 (PP Systems, USA), se midió la asimilación de CO₂ (A_{CO2}), la conductancia estomática (g_s),

la temperatura de la hoja y concentración interna de CO₂ (C_i) y se calcularon la eficiencia de uso del agua, la relación C_i. Ca⁻¹ y la evaporación (E). La intensidad de la luz fue ajustada previo a las medidas de cada ambiente.

En hojas semejantes a las evaluadas para el intercambio de gases, se midió el rendimiento cuántico del fotosistema II (Φ_{PSII}) de las hojas adaptadas a la luz de los árboles en cada ambiente. Las mediciones se realizaron en hojas expuestas y no expuestas al sol al momento de la medición. En cada lado se midieron 3 hojas por árbol. A tal efecto se utilizó un fluorómetro modulado OS5p+ (OptiScience, USA). El equipo estaba configurado con una ganancia de energía de 12, la intensidad de saturación de 90 % y una intensidad de modulación de 80 %. Se calculó la ETR= $Y_{II} * PPF * a * 0,5$; siendo PFD: Flujo fotónico fotosintético incidente; a: absorbancia (fracción de luz absorbida por la hoja; 0,84); 0,5: fracción de luz absorbida por el PS_{II}.

La eficiencia en el uso del agua (WUE) se estimó con la siguiente fórmula:

$$WUE = ACO_2 \cdot E^{-1} \text{ (Jifon, Syversten 2003, Syversten et al. 2003)}$$

b2) Estimación de clorofila en la hoja

Se estimó el contenido de clorofila de la hoja con un medidor de clorofila (SPAD-502 Plus, Japón) en 20 árboles por ambiente y en 15 hojas por árbol, en los tres flujos de brotación más importantes. Las mediciones se hacían en hojas maduras y sanas en la parte central del brote.

b3) Análisis de N foliar

Se midió el contenido de nitrógeno (N) en el tejido foliar. Se utilizaron 200 hojas por ambiente, totalmente expandidas provenientes de la parte central de brotes sin frutos, de acuerdo a (Legaz et al. 1995). Se realizó un muestreo en cada brotación (noviembre, enero y marzo), en hojas pertenecientes a la última brotación. Las plantas seleccionadas se encontraban sanas, y los brotes no presentaban carencias nutricionales ni problemas sanitarios. Las muestras fueron identificadas, lavadas y secadas hasta peso constante a 65 °C en horno eléctrico. Posteriormente fueron molidas para el análisis. Para la determinación del contenido de N en la hoja y en los frutos se utilizó el método de combustión a 900 °C y posterior detección de N₂ por conductividad térmica, con un analizador elemental de Carbono y Nitrógeno (Leco, TruSpec CN 200-288) siguiendo el método de Dumas (1826).

b4) Solución del suelo

El muestreo de nutrientes en el suelo se realizó mediante succionadores de la solución del suelo o lisímetros (SK20 UMS, Alemania) con periodicidad semanal. Se instaló una batería de dos lisímetros en cada ambiente a 0,30 y 0,60 m de profundidad. El día previo a recoger la muestra, se realizaba vacío en cada uno de los lisímetros a los efectos de que la solución del suelo penetre dentro de la capsula de cerámica del mismo. La solución del suelo era inmediatamente puesta en un freezer hasta el análisis de mismo. Se midió el volumen, pH, conductividad y se filtró con un filtro de 0,45 micras. Posteriormente se determinó por cromatografía de iones (Dionex Aquion, USA) el contenido de nitratos, nitritos y amonio. Para ello, la muestra y un reactivo se introdujeron en el cromatógrafo impulsados por una bomba a una velocidad constante. En primer lugar, llega a una pre-columna, luego a la

columna cromatográfica, de allí a un supresor para luego pasar al detector. La columna separa a los iones, según su carga. El soporte, tiene carga positiva o negativa según los iones a separar. Mediante los sucesivos equilibrios que se forman entre las moléculas de la columna cargada y la fase móvil se fueron separando los distintos aniones o cationes. Luego pasaron por el supresor eliminando los errores generados en la fase móvil. Al detector solo llegan los datos de conductividad de los iones presentes en la muestra, de esta forma son cuantificados y pueden compararse sus valores con una curva de calibración.

c) Variables productivas

c1) Intensidad de floración y tamaño de copa del árbol

En plena floración (50% de flor abierta) se seleccionaron 40 árboles por ambiente y se evaluó la intensidad de floración (IF= flores cada 100 nudos). Para la IF se contaron alrededor del árbol al menos 600 nudos por planta. De estos nudos, se contó el número de flores. Los datos fueron expresados en número de flores cada 100 nudos. El vigor de la planta se evaluó en 20 plantas por ambiente, al comienzo y al finalizar un ciclo de crecimiento (agosto 2020-agosto 2021). Se midió la altura total de la planta, el diámetro de la copa en la zona ecuatorial, en dirección de la fila y transversal a la fila de plantación; también se midió la distancia entre el suelo y la parte inferior de la copa. Se calculó el volumen de la canopia utilizando la ecuación del ovoide (ecuación 3).

Volumen del ovoide es $= 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$ (Ec. 3)

c2) Rendimiento y evaluaciones de la calidad del fruto

Para estimar el rendimiento de las plantas, se seleccionaron y cosecharon 30 árboles por ambiente. Se pesó y contó el número de frutos en cada planta. Inmediatamente antes de la cosecha, se muestrearon 30 plantas al azar por ambiente y 15 frutos por planta, donde se evaluó el número de semillas por fruto. También se evaluó el rameado de estos frutos, para esto se clasificaron visualmente de acuerdo al siguiente criterio sin rameado (ausencia), poco rameado (categoría 1) y mucho rameado (categoría 2) (Figura 1). Se contó el número de frutos en cada categoría. Para la estimación de la proporción para el número de frutos rameados en 40 árboles, se unieron las categorías 1 y 2

En particular en este componente se pretende tener una medida precisa del contenido de agua en el perfil del suelo (hasta 60 cm) a intervalos de 1 h y con una distribución espacial en la parcela; se usarán sensores FDR 10HS (Decagon, USA) con un datalogger por estación de registro. Además de estos sensores/registradores, se prevé colocar tubos de acceso hasta 70 cm de profundidad para ser usados con sonda de neutrones (CPN), facilitando la evaluación espacial en profundidad del contenido de agua en el suelo. Se prevé la caracterización de la retención de agua en los diferentes horizontes del suelo en las parcelas, utilizando olla de presión (SoilMoisture, USA). Por otro lado, con la incorporación de medidores del flujo de savia (TDP-Dinamax, USA) se estimará la transpiración de plantas individuales. El muestreo de nutrientes en el suelo se realizará a través de succionadores y muestreadores de solución del suelo (UMS, Alemania) con periodicidad semanal, donde se

determinará por cromatografía de iones (Dionex Aquion, USA) el contenido de nitritos, nitratos, sulfatos, cloruros, calcio, magnesio, potasio, amonio y sodio. Se prevé medir el contenido de nutrientes en hoja y en fruto, así como la medida del intercambio gaseoso (tasa de asimilación de CO₂-fotosíntesis), de la eficiencia del fotosistema II (fluorescencia) y la conductancia estomática en hojas de algunos árboles previamente identificados de las parcelas. Se utilizarán equipos de fotosíntesis CIRAS-3 (PPSystems, USA); Fluorómetro OS5 (OptiScience, USA) y Porómetro AP4 (Delta-T Devices, UK), entre otros.



Figura 1. Escala de rameado. A la izquierda: categoría 1; a la derecha: categoría 2

Resultados

Cambios en el ambiente climático.

1) Radiación solar.

La firma espectral de la radiación bajo las mallas es semejante a la firma espectral sin mallas, en el rango de longitudes de onda medidas (350 a 2500 nm). Solamente la intensidad total de la radiación es menor bajo las mallas, proporcional en cada longitud de onda. Esta evaluación se realizó solo un día a los efectos de caracterizar el espectro de la radiación. Básicamente las mallas han reducido la intensidad de la radiación solar sobre las plantas pero no han cambiado el espectro de la misma (Figura 2).

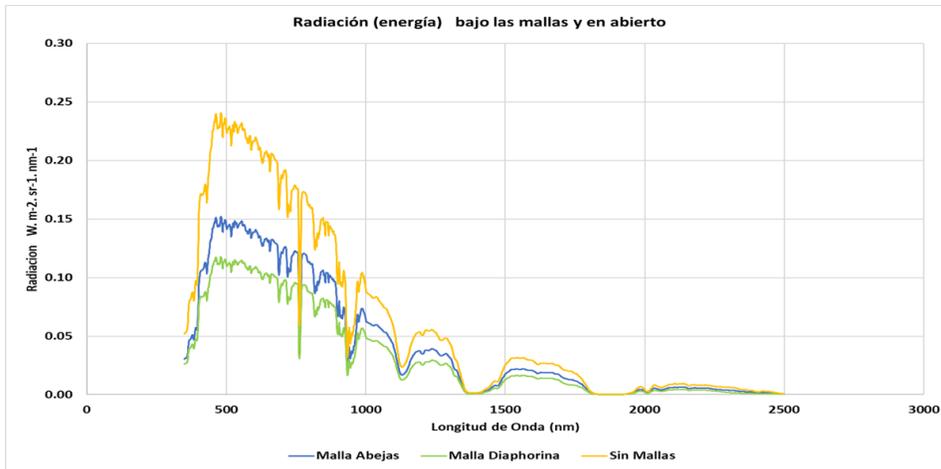


Figura 2. Longitudes de onda de la radiación incidente bajo las mallas y sin malla. Medida con un espectroradiómetro PSR 2500 (Evolution, USA). Medida puntual de caracterización del espectro de la radiación solar.

A lo largo del ciclo productivo, la evolución de la radiación solar diaria sobre las plantas fue similar, con la mayor radiación incidente sobre las plantas sin mallas, y con la menor radiación solar en las mallas anti-abejas (9 mesh). Se presentan solo los datos de 2021-2022, ya que los demás años fueron similares las diferencias entre los tres ambientes (Figura 3).

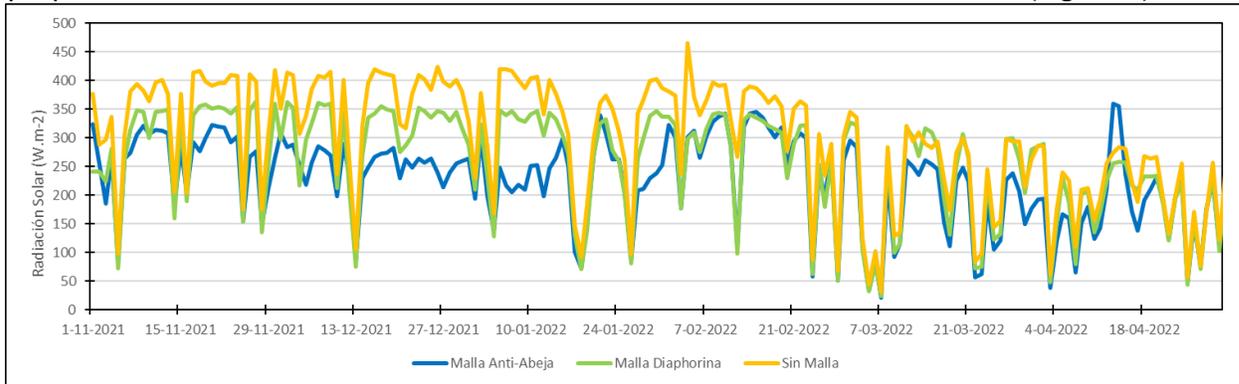


Figura 3. Evolución de la radiación solar diaria en los tres ambientes: bajo las mallas y sin malla. Período 2021-2022. Promedio de 4 sensores por ambiente.

2) Temperatura y humedad el aire.

Ambas variables fueron afectadas por el tipo de ambiente que generaron las mallas y donde se desarrollaron los árboles cítricos. El ambiente con malla de 40 mesh (Diaphorina) fue consistentemente el más húmedo, seguido por el ambiente con mallas anti-abeja, en relación con la humedad del aire sin mallas. Este efecto lo podemos ver en la figura 4, que presenta la diferencia entre los valores de humedad diarios y los valores de la HR% sin mallas. En las mallas para Diaphorina el ambiente fue entre 2 y 7 % superior al ambiente sin

mallas. Se presentan los valores del período 2020-2021, en los demás años las diferencias relativas entre los ambientes fueron similares.

La mallas, también modificaron la temperatura del aire (media y máxima), creando ambientes más cálidos, en especial aumentando la temperatura máxima (Figura XX). El ambiente más cálido se desarrolló bajo las mallas de 40 mesh (Diaphorina) teniendo diferencias diarias entre 2 y 3 °C.

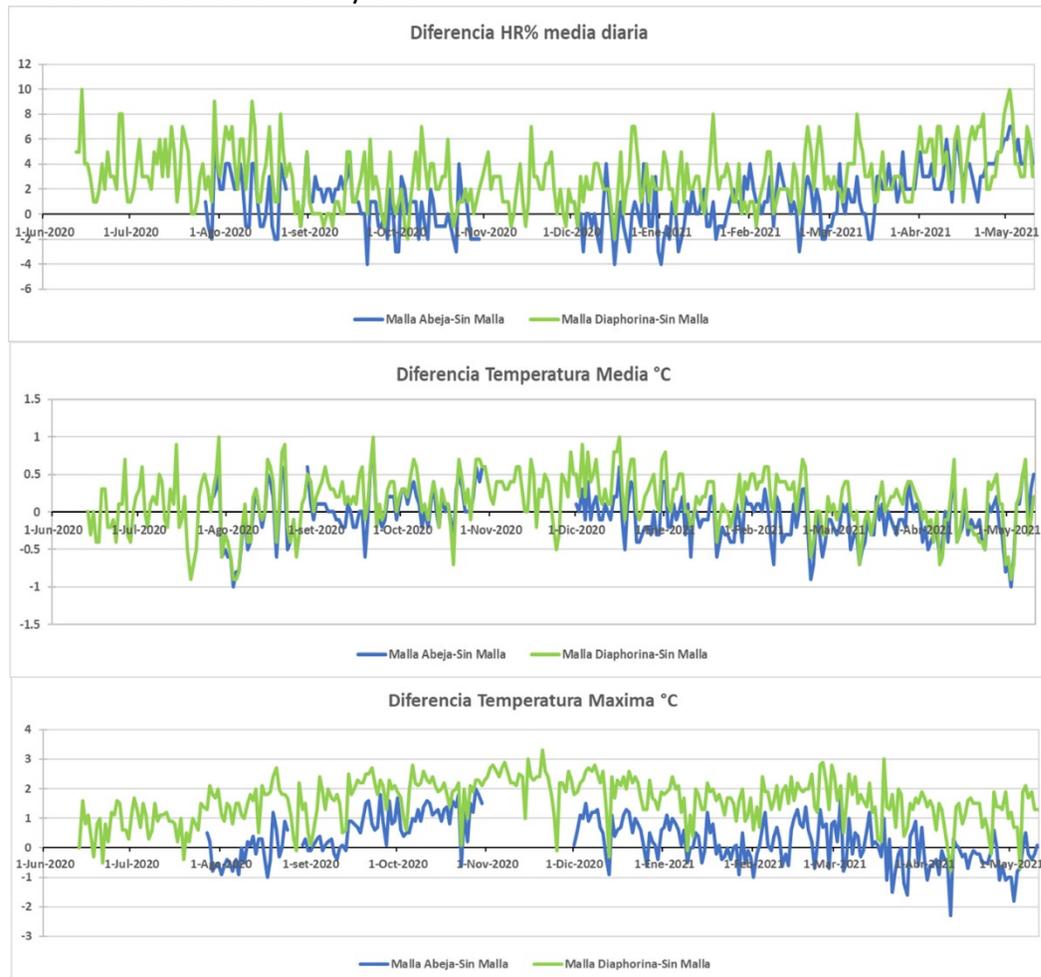


Figura 4. Evolución de la temperatura (°C) y humedad relativa del aire (%) diaria, expresada como la diferencia entre el valor bajo la malla menos el valor sin malla, durante el período 2020-2021.

3) Velocidad del viento

La velocidad del viento se redujo drásticamente bajo las mallas, especialmente bajo la malla de 40 mesh (Diaphorina) llegando a valores mínimos de velocidad. La malla anti-abejas reduce la velocidad del viento respecto al viento en un ambiente productivo sin mallas, pero con intensidades de viento superiores a la malla 40 (Figura 5). Se presentan los datos del período 2020-2021, los demás años las variaciones relativas fueron similares.

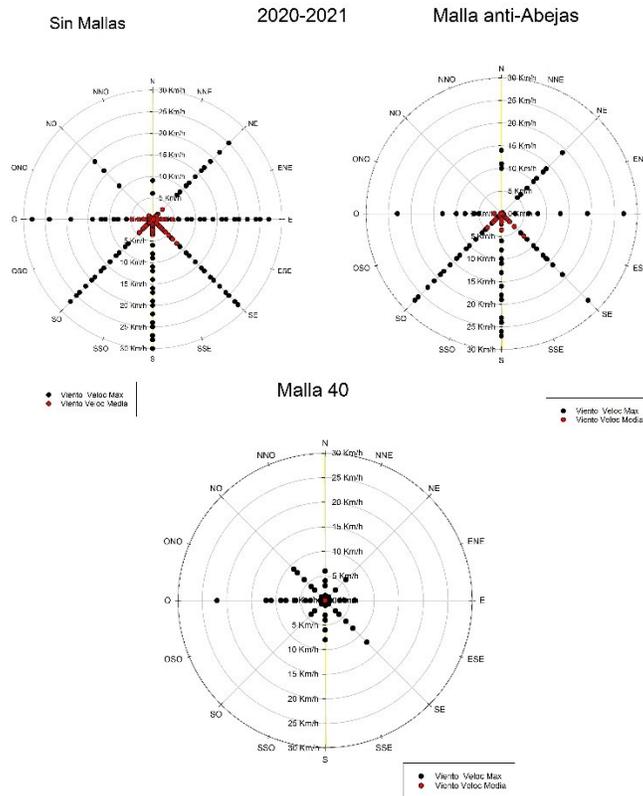


Figura 5. Variaciones en la velocidad máxima y mínima y dirección del viento diario en los tres ambientes productivos. Datos de 2020-2021. Puntos negros representan la velocidad máxima diaria. Puntos rojo representan la velocidad promedio diaria ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$).

4) Evapotranspiración.

Se utilizaron los datos ambientales bajo las mallas para realizar el cálculo de la evapotranspiración de referencia PM-FAO 56 (Allen, 1989). La evapotranspiración es mayormente consecuencia de las variaciones ambientales bajo los tres ambientes: temperatura del aire, humedad relativa, radiación y viento principalmente. La evapotranspiración es mayor en el ambiente sin mallas en la intemperie, consecuencia de tener mayor velocidad del viento y mayor radiación; seguido por el ambiente bajo mallas Diaphorina y finalmente el ambiente bajo mallas anti-abeja. Se presentan en la figura 6, la evolución de la evapotranspiración durante el ciclo 2022-2023, en los demás ciclos productivos las diferencias relativas entre los ambientes fueron similar.

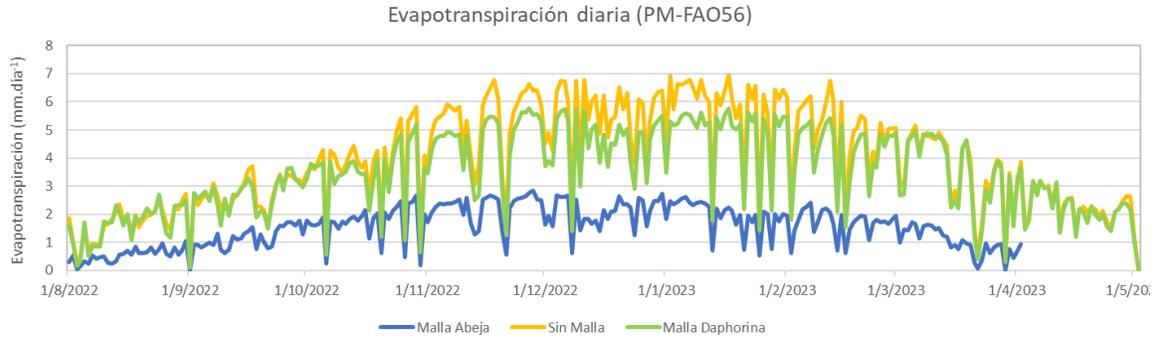


Figura 6. Evolución de evapotranspiración de referencia diaria (PM-FAO 56) en los tres ambientes. Período 2022-2023.

Evaluación de la dinámica del agua y nutrientes.

La dinámica del agua se evaluó a través de los balances hídricos del suelo en los tres ambientes productivos. Se presentan los datos de dos años contrastantes: a) el ciclo 2020-2021, con mayor precipitación y en consecuencia con un menor riego y b) el ciclo 2022-2023, un ciclo con menor precipitación y con mayor intensidad del riego (Figura 7).

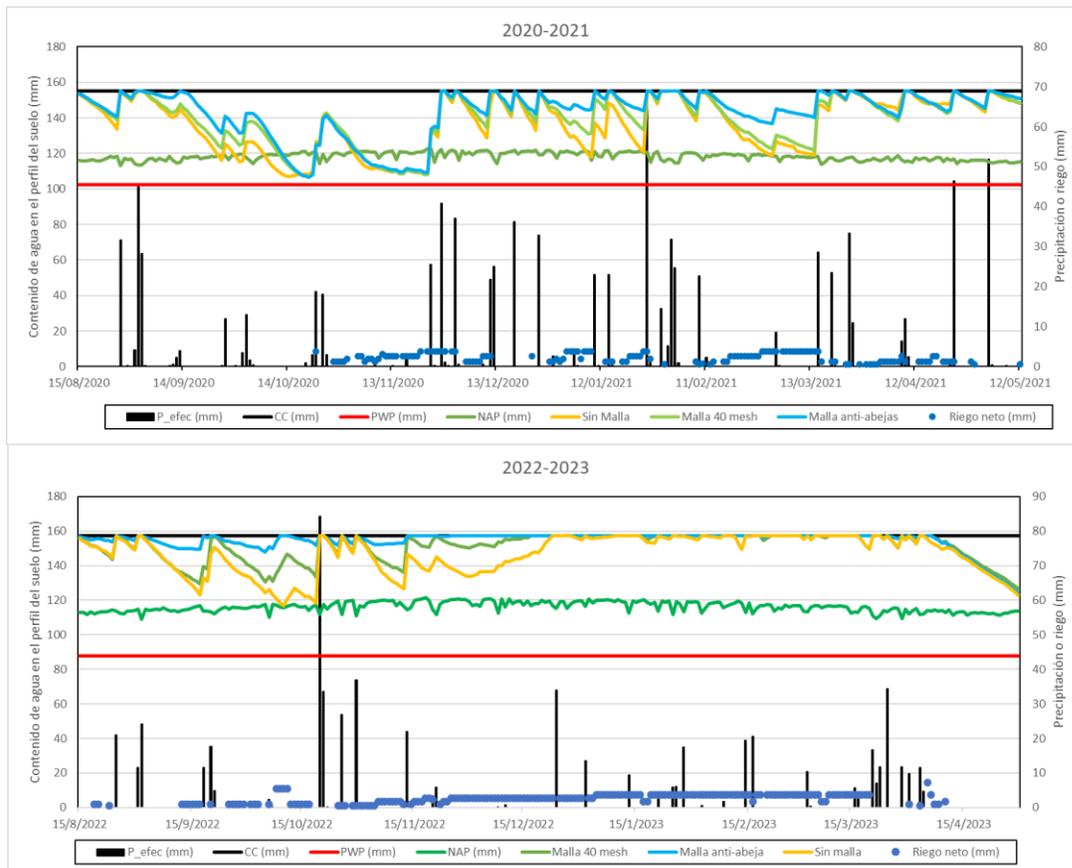


Figura 7. Balance de agua en el suelo para los tres ambientes: malla 40 mesh, malla antiabejas y sin malla. PP: precipitaciones (mm); CC: capacidad de campo (mm); PMP: punto de marchitez

permanente (mm); NAP: nivel de agotamiento permisible (mm); CAS: contenido de agua del suelo (mm)

En el ciclo 2020-20221 durante la primavera el cultivo presentó -en algunos días- un pequeño déficit hídrico evidenciado por los registros del contenido de agua con valores por debajo del límite permitido o umbral de riego (P), línea de color verde en la figura XX. Esto no tuvo consecuencias en la productividad ni en la calidad de la producción. El ciclo 2022-2023, con menor precipitación, especialmente en primavera y verano, el riego fue casi diario para mantenerlo en niveles óptimos del contenido de agua del suelo. En todos los ciclos, los presentados y en el ciclo 2021-2022, el contenido de agua en el suelo fue superior en el ambiente bajo mallas anti-abeja, seguido del ambiente con mallas 40 mesh (Diaphorina) y el ambiente con menor contenido de agua en el suelo fue el ambiente sin mallas. En los tres sistemas, se varió la cantidad de horas de riego, a igualdad de la lamina de diseño del sistema, a los efectos de no sobre regar aquellos ambientes que tenían mayor contenido de agua del suelo.

El balance del agua del suelo nos permite hacer algunas consideraciones cuantitativas del uso del agua en el suelo (Tabla 1). La evapotranspiración de referencia y la del cultivo, sigue los valores relativos de la radiación solar. La precipitación como fue mencionado anteriormente fue significativamente menor en el ciclo 2022-2023 y en consecuencia fueron más las horas de riego. La evapotranspiración actual representa la verdadera evapotranspiración realizada por los arboles y la evapotranspiración directa del suelo. Podemos evidenciar en los dos ciclos como los ambientes con malla tuvieron menor evapotranspiración actual y menor evapotranspiración del cultivo, la relación entre ambas fue muy alta mayor a 0.92 en los dos ciclos, mostrando una correcta gestión del riego.

En el ciclo 2020-2021 -año de mayor pluviometría- las horas de riego bajo las mallas (230 h) fue de un 29% inferior que en el ambiente sin mallas (323 h) y un ahorro de agua del 24 % (Tabla 1); por otro lado, en el ciclo 2022-2023 -año con un 35% menos de lluvia- las diferencias finales en horas de riego y lamina total no fueron significativas entre los tres ambientes, especialmente en el verano (Tabla 1).

Tabla 1. valores del balance hídrico del suelo y de la gestión del riego. De dos ciclos productivos contrastantes 2020-2021 y 2021-2023. El balance es del 15 de agosto al 30 de abril de cada año.

Ambiente	Período	Evapotranspiración de referencia (mm)	Evapotranspiración del cultivo (mm)	Precipitación (mm)	Horas de riego (h)	Riego neto (mm)	Evapotranspiración actual (mm)	ETa/ETc
Sin malla	2020-2021	1038	690	870	323	155	634	0.92
Mallas Antibejas		724	485	870	230	118	457	0.94
Mallas 40 mesh		874	580	870	230	118	548	0.94
Sin malla	2022-2023	1060	702	568	508	548	702	1.0
Mallas Antibejas		438	293	568	511	459	293	1.0
Mallas 40 mesh		935	622	568	511	551	622	1.0

La evaluación de los nutrientes en el suelo no mostró una diferencia significativa entre los ambientes en ninguno de los tres años. Se presentan en la tabla 2 los datos del contenido de nitratos, nitritos y amonio en la solución del suelo a 30 y 60 cm de profundidad. El contenido de amonio en la solución del suelo fue mayor que el de nitratos, explicado por el

tipo de fertilizante (base amoniacal) utilizado. Sin embargo, la poca presencia de nitrato en el suelo sugiere que todo el disponible en la solución del suelo es absorbido rápidamente por la planta, esto concuerda con los niveles de nitrógeno en la hoja de las plantas dentro de los valores normales en los estándares foliares.

Tabla 2. Concentración de NH₄⁺, NO₃⁻ y NO₂⁻ (mg de N. kg⁻¹) en cada ambiente a 0.3 y 0.6 m de profundidad. Ciclo 2020-2021.

Ambiente	Ion/profundidad	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Sin malla	NH ₄ ⁺ 0.3 m	9.8	31.3	17	16.9	124.3	12.4	10.1	37.4
Malla Antiabejas	NH ₄ ⁺ 0.3 m	24.9	57.7	16.5	21.5	177	0	42.5	15.2
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NH ₄ ⁺ 0.3 m	15.7	34.5	19.7	15.2	165.9	17.3	14.4	29.2
Sin malla	NO ₃ ⁻ 0.3 m	1.2	0.6	0.7	0.6	1.2	0.8	0.1	0.7
Malla Antiabejas	NO ₃ ⁻ 0.3 m	1.3	0.9	1.4	0.5	1	0.9	4	0
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NO ₃ ⁻ 0.3 m	0.5	0.4	2	0.4	0.7	0.7	0.4	0.8
Sin malla	NO ₂ ⁻ 0.3 m	0.9	0.6	0.1	1.1	2.3	1.6	1.3	0.9
Malla Antiabejas	NO ₂ ⁻ 0.3 m	0.3	0.7	1.7	0.7	1.2	6.2	3.5	0
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NO ₂ ⁻ 0.3 m	0	0.1	1.3	0.9	1.5	2.1	0.8	2.5

Ambiente	Ion/profundidad	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Sin malla	NH ₄ ⁺ 0.6 m	9.7	27.9	15.5	-	-	-	15	85.4
Malla Antiabejas	NH ₄ ⁺ 0.6 m	14.3	66.4	20.8	18.7	153.4	0	21.9	14.7
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NH ₄ ⁺ 0.6 m	16.2	47.3	25.1	21.5	154.2	14.4	9.7	40.1
Sin malla	NO ₃ ⁻ 0.6 m	0.6	1.9	0.6	-	-	-	0	0.7
Malla Antiabejas	NO ₃ ⁻ 0.6 m	1.1	0.5	0.9	0.8	0.1	0.7	0.9	0
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NO ₃ ⁻ 0.6 m	0.7	0.5	0.4	0.6	0.5	0.5	0.8	0.6
Sin malla	NO ₂ ⁻ 0.6 m	0.7	2.1	1.3	-	-	-	2.4	1.1
Malla Antiabejas	NO ₂ ⁻ 0.6 m	0.6	0.3	2.7	1.4	0.8	6.4	3.1	0
Malla 40 mesh (Diaphorina)	NO ₂ ⁻ 0.6 m	0.6	1.9	2.9	1.4	1.4	2.9	2.2	1.7

Variables Fisiológicas

1) Nutrientes foliares.

El contenido de nutrientes en la hoja no varió sustancialmente con el ambiente donde crecían las plantas, si hubo diferencias entre los años (figura 8). El primer muestreo foliar (marzo 2020) corresponde a valores del régimen de fertilización inicial anterior (2019-2020) a la instalación de las mallas en enero de 2020. El N foliar estuvo en el límite inferior en varios de los años, no así en el P, Ca foliares. Por otro lado, el magnesio foliar fue modificado en las últimas dos fertilizaciones incrementando su nivel foliar. El potasio foliar en los tres últimos años se mantuvo por encima de los niveles de referencia, teniendo en cuenta el antagonismo ocasionado por el aumento del K en perjuicio de la absorción de N. A excepción del K durante el año 2022 que fue bajo en el ambiente sin mallas, no se encontraron diferencias en cada año evaluado entre los ambientes.

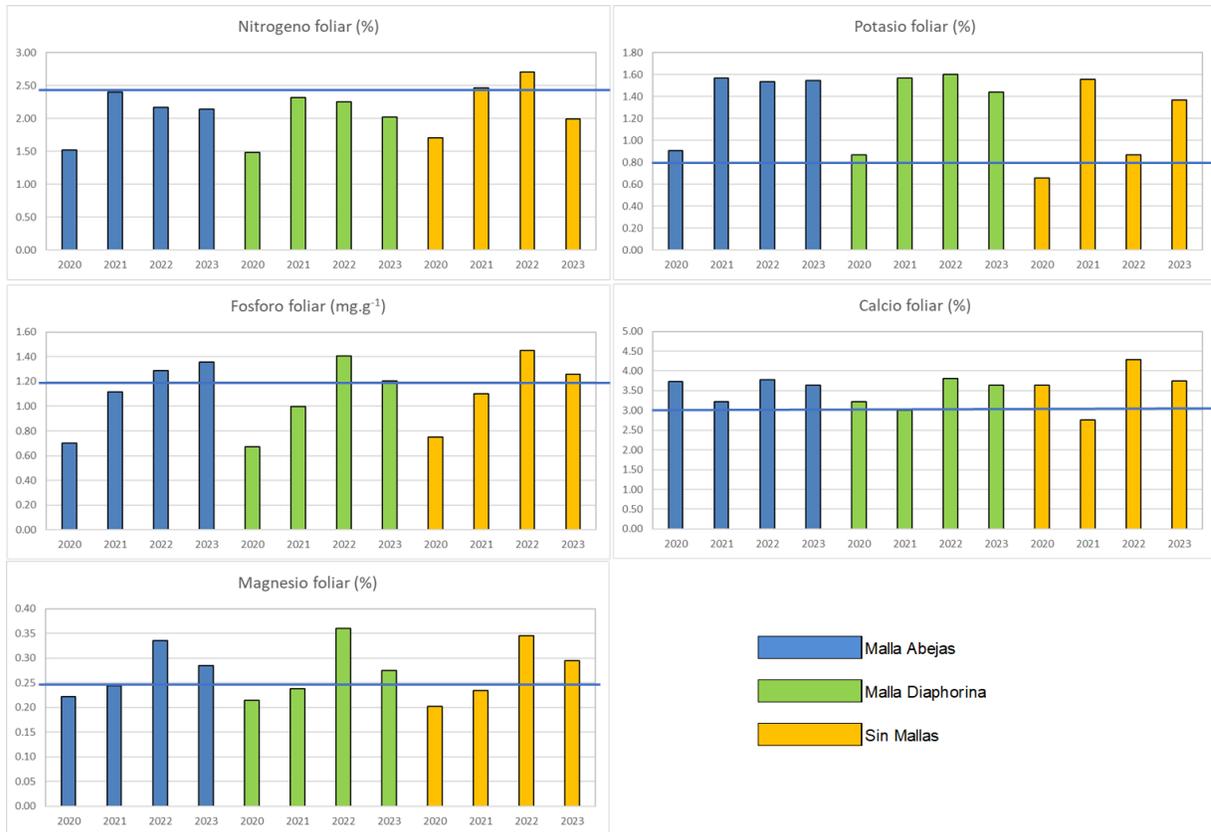


Figura 8. Contenido de N, P, K, Ca y Mg foliares de las plantas en los tres ambientes. Muestreo en marzo de cada año de hoja no fructífera de la brotación de primavera. Línea azul representa el nivel de normalidad basado en Quiñones et al 2005.

2) Variables productivas.

El tamaño de los árboles fue incrementándose a lo largo de los años como es de esperar; ya sea medido por la altura de la planta como a través de su volumen. Los árboles en los ambientes bajo malla tenían un promedio de altura y volumen levemente superior a los árboles del ambiente sin malla (2020); esta diferencia aumento con los años (Figura 9). Bajo las mallas, luego de los tres años de evaluación, el aumento del volumen de la copa fue mayor, especialmente en la malla anti-abeja. Esta diferencia también concuerda con el mayor crecimiento (altura de la planta) relativo a la altura inicial en las plantas bajo malla anti-abeja. Las plantas en el ambiente con malla 40 mesh tuvo un crecimiento intermedio.



Figura 9. Evolución de la altura (m) y volumen del árbol (m³), y aumento del volumen y altura relativa 2020-2022. Las barras de error en las medias representan los desvíos estándar de las plantas muestreadas.

La intensidad de la floración de las plantas fue diferente entre los ambientes a través de los años (Figura 10), expresada como el número de flores totales provenientes de brotes florales con y sin hojas cada 100 nudos. Globalmente, la intensidad de la floración de los árboles fue más constante bajo las mallas que la floración en los árboles creciendo sin mallas. Estos últimos presentaron una alternancia importante y mayor variabilidad entre las parcelas, así como una mayor variabilidad dentro de la misma parcela, evidenciada por el mayor desvío estándar de la media de cada parcela (Figura 10). Por otro lado, la calidad de la flor (tipo de brote floral) es altamente importante en la productividad de esta variedad (Afourer); podemos ver la relación entre el número de frutos por planta en relación con el aumento de flores provenientes de brotes florales con hoja, mayormente terminales en Afourer (Figura 11).

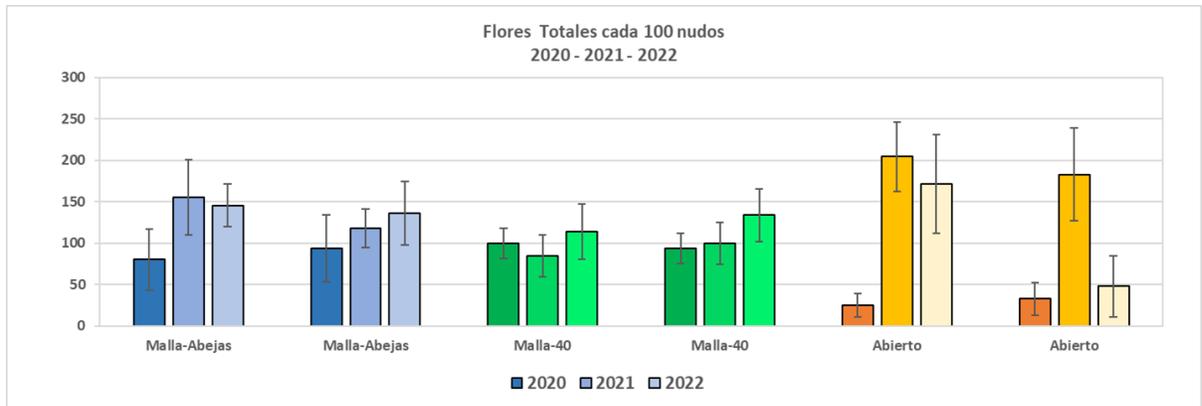


Figura 10. Intensidad de la floración (número de flores totales cada 100 nudos) en cada parcela durante las floración 2020-2021 y 2023. Las barras de error en las medias representan los desvíos estándar de las plantas muestreadas.

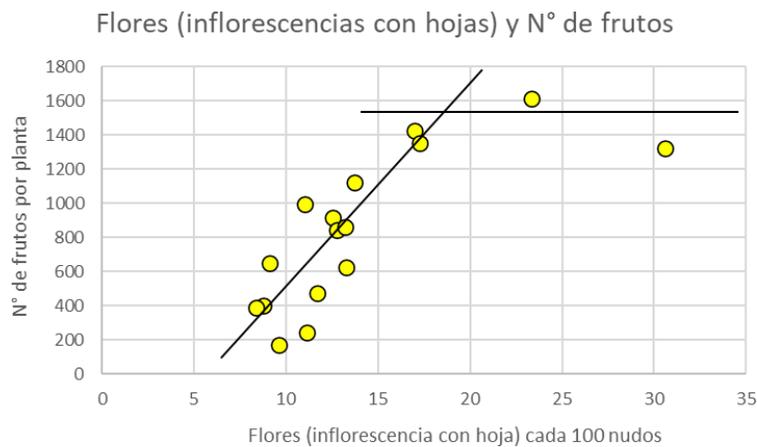


Figura 11. Relación entre el número de frutos en la planta y el número de flores provenientes de brotes florales con hojas.

3) Fotosíntesis de las hojas.

Evaluamos la fotosíntesis de la hoja a través de la fluorescencia del fotosistema II (PSII) y del intercambio gaseoso entre la hoja y la atmósfera. La fluorescencia del PSII de las hojas, evaluada a través de la eficiencia cuántica del fotosistema II (Φ_{PSII}) en los diferentes ambientes es distinta si mide en hojas expuestas directamente a la radiación solar de aquellas hojas que no están directamente expuestas al sol (Tabla 3). Con alta incidencia de luz la Φ_{PSII} se reduce significativamente en los tres ambientes, aunque en el ambiente bajo mallas de 40 mesh (Diaphorina) la eficiencia cuántica es significativamente mayor que, en los otros dos ambientes, asociado a una menor radiación PAR incidente. Por otro lado, en las hojas no expuestas al sol, adaptadas a un ambiente con menor radiación PAR, la eficiencia cuántica fue mayor y no hubo diferencias significativas entre ellas en las hojas de los árboles en los tres ambientes (Tabla 3). Este fenómeno de reducción de la eficiencia cuántica debido a un exceso de luz se puede atribuir a la fotoinhibición de la hoja,

característica de las hojas en la capa externa -expuesta directamente al sol- de los árboles cítricos durante el mediodía.

Tabla 3. Características de la fluorescencia del fotosistema II en hojas expuestas y no expuestas directamente a la luz solar en los distintos ambientes.

Hojas expuestas a la radiación solar directa				
Ambiente	PAR	T	ΦPSII	ETR
Sin Mallas	1135.5 a	32.5 a	0.29 b	126.9 a
Malla anti-abejas	883.1 b	33.0 a	0.32 b	113.3 a
Malla 40 mesh (Diaphorina)	477.3 c	30.4 b	0.47 a	82.6 b
Hojas no expuestas a la radiación solar directa				
Ambiente	PAR	T	ΦPSII	ETR
Sin Mallas	22.6 b	31.6 ab	0.78 a	7.3 b
Malla anti-abejas	28.3 ab	32.2 a	0.78 a	9.1 ab
Malla 40 mesh (Diaphorina)	35.8 a	30.0 b	0.76 a	11.5 a

PAR: radiación fotosintéticamente activa ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); T: temperatura ($^{\circ}\text{C}$); ΦPSII: rendimiento cuántico del fotosistema II; ETR: tasa de transporte de electrones. Los valores son medias de 12 árboles por ambiente y corresponden a abril de 2021. Letras diferentes en las columnas muestran diferencias significativas ($p < 0.05$, prueba de Bonferroni).

El intercambio gaseoso de la hoja también fue afectado por el momento de medida de la fotosíntesis (Tabla 4 y 5). A mitad de la mañana, cuando el efecto del déficit de presión de vapor no es alto, la asimilación neta de CO_2 (ACO_2) de la hoja es máxima con valores que no se diferencian entre los ambientes, tampoco hay diferencias entre los ambientes en la conductancia estomática de la hoja (G_s), manteniendo todo el aparato fotosintético en plena actividad en la mitad de la mañana.

Al mediodía, podemos encontrar diferencias entre los tres ambientes de crecimiento en la fotosíntesis de la hoja. La radiación PAR es significativamente más alta en el ambiente sin mallas, también con un déficit de presión de vapor (DPV) y temperatura de la hoja (TH) más elevado, como resultado la ACO_2 y G_s disminuyen significativamente. Por otro lado, en las hojas de las plantas bajo malla de 40 mesh, que en ese momento tenían menor PAR, menor DPV y menor TH, la ACO_2 y G_s fueron mayores que las hojas de la plantas creciendo sin malla. La relación carbono interno/carbono del aire (Ci/Ca) de las hojas en ambos momentos de medición y entre los tres ambientes no mostraron diferencias significativas evidenciando que la limitante de la fotosíntesis está asociada a factores estomáticos de la hoja, como ser la G_s , posiblemente causada por la variación del DPV, TH y PAR; que al mediodía el efecto de las mallas es máximo.

Tabla 4. Intercambio de gases de las hojas expuestas al sol a mitad de la mañana (9:00 a 10:30 h) al mediodía (12: 00 a 13:30 h) según el ambiente. Los valores representan el promedio por planta ($n=12$), con 3 hojas medidas en cada planta en febrero de 2021.

Mañana								
Ambiente	PAR _i	TH	DPV	E	g _s	A _{CO2}	C _i /C _a	EUA (A _{CO2} /E)
Sin Mallas	1100.3 a	31.7 a	2.9 a	4.2 a	155.5 a	10.5 a	0.63 a	2.5 b
Malla anti-abejas	1000.1 b	31.9 a	2.8 a	3.8 a	149.9 a	9.7 a	0.64 a	2.6 ab
Malla 40 mesh (Diaphorina)	1000.4 b	32.6 a	2.9 a	3.8 a	139.4 a	10.8 a	0.59 a	2.9 a
Mediodía								
Ambiente	PAR _i	TH	DPV	E	g _s	A _{CO2}	C _i /C _a	EUA (A _{CO2} /E)
Sin Mallas	1600.2 a	35.6 a	4.1 a	2.9 b	71.8 c	5.9 b	0.63 a	2.1 b
Malla anti-abejas	1083.4 b	33.1 b	3.2 b	3.9 a	128.2 b	10.4 a	0.58 a	2.6 a
Malla 40 mesh (Diaphorina)	1000.3 c	32.4 b	2.9 b	4.6 a	178.7 a	11.8 a	0.57 a	2.6 a

PAR_i: radiación fotosintéticamente activa incidente ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). TH: temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$). DPV: déficit de presión de vapor de agua (kPa). E: transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$). g_s: conductancia estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). ACO₂: Tasa de asimilación neta de carbono o fotosíntesis neta ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). WUE: Eficiencia en el uso del agua ($\text{mmol CO}_2 \text{mol}^{-1} \text{H}_2\text{O}$). Medias en las columnas seguidas de igual letra son significativamente distintas. Test Bonferroni ($p < 0.05$).

Tabla 5. Intercambio de gases de las hojas expuestas al sol mediodía (12:00 a 13:30 h) según el ambiente. Los valores representan el promedio por planta (n=12), con 3 hojas medidas en cada planta en noviembre de 2022.

	Radiación Solar $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	Temperatura de la hoja $^{\circ}\text{C}$	CO ₂ Interno $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	A _{CO2} $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	Conductancia Estomática $\text{mmol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Sin Malla	1626.1 a	40.3 a	259.5 a	2.9 b	56.0 b
Malla anti-abeja	1346.6 b	38.9 b	233.3 b	6.8 a	102.3 a
Malla 40 mesh (Diaphorina)	962.7 c	39.9 ab	231.7 b	6.7 a	96.1 a

Medias en las columnas seguidas de igual letra son significativamente distintas. Test Bonferroni ($p < 0.05$).

Discusión

Cambios en el ambiente climático.

La mallas incidieron en las condiciones microclimáticas generando diferentes ambientes de crecimiento de las plantas de cítricos durante estos tres años de evaluación. La radiación solar y la velocidad del viento fueron menores bajo las mallas (anti-abeja y 40 mesh), mientras que la temperatura, la humedad relativa del aire fueron superiores. Estas condiciones causaron que la demanda atmosférica de agua (ET) fuera significativamente menor bajo las mallas, especialmente bajo la malla anti-abeja. Estas diferencias en la ET en estos ambientes van a generar diferencias en el balance hídrico del suelo y en consecuencias en la gestión del agua de riego; si bien en todos los ambientes el riego suplementario aplicado fue muy bueno como para lograr rendimiento muy altos (ver más adelante en componente 2).

También más adelante en el componente 3, ésta diferencia en la temperatura y humedad en los ambientes bajo malla y en particular el ambiente 40 mesh, ocasionarán diferencias significativas en el desarrollo de las plagas, acortando los ciclos fenológicos de las mismas, pero sin encontrar diferencias en la incidencia de enfermedades.

Dinámica del agua y nutrientes.

Se presentaron dos situaciones diferentes, un ciclo (2020-2021) de condiciones de precipitación promedio de la zona (870 mm) y un ciclo (2022-2023) donde la precipitación del verano fue menor (568 mm). En ambos casos en la primavera, el contenido de agua en el suelo de las plantas en el ambiente sin mallas se redujo más rápidamente que en los ambientes bajo mallas, siendo el ambiente de malla anti-abeja el que presentó el mayor contenido de agua, asociado a una menor ET de ese ambiente. Este mayor contenido de agua del suelo les permitió a las plantas alcanzar crecimientos mayores en altura y en volumen del árbol, así como un mejor estado hídrico evidenciado por la mayor fotosíntesis. Estas condiciones permitirán posteriormente lograr mejores rendimientos y más estables entre años consecutivos (reducción de la alternancia), muy característico de esta variedad de cítricos.

En el año de condiciones promedio de precipitación en la región (2020-2021) el ahorro de agua fue de un 24% y en un 29% de ahorro en las horas de riego, que significan un 29% menos de energía eléctrica de bombeo. Esto también podría haberse dado en el ciclo con un 35% menos de precipitación (2022-2023) sin embargo, por disposiciones del productor no se cambió el régimen de riego de la malla 40 mesh donde podría haber sido menor el tiempo de riego y en consecuencia mayor el ahorro de agua y energía.

El plan de fertilización estuvo adecuado a los niveles de producción esperados, quizás a excepción de K que estuvo por encima de lo necesario. El nivel de fertilización aplicado y el contenido de nutrientes en el suelo, especialmente de N, evidencia que todo el N fue absorbido por las raíces, en su forma de nitrato, quedando un mayor remanente de amonio como consecuencia de la mayor fuente amoniacal aplicada en los fertilizantes.

No hubo diferencia significativa entre los tres ambientes en relación a los nutrientes.

Variables fisiológicas y productivas

Las mejores condiciones de agua en el suelo, así como las ambientales favorecieron una mejor tasa de fotosíntesis en la capa externa de las hojas de las plantas bajo las mallas, donde la reducción de la radiación y del DPV jugaron un papel significativo, especialmente en las horas de mayor radiación solar y mayor déficit de presión de vapor cercanas el mediodía, lo que habitualmente se llama la depresión del mediodía.

Estas mejores condiciones de fotosíntesis fueron las causantes de un mayor crecimiento de las plantas evaluadas a través de su altura, y de su volumen a lo largo de todo el experimento. Estas características van posteriormente a condicionar el alto valor de productividad de las mismas y una reducción mayor en la alternancia productiva, aunque esta última también está asociada a la intensidad de la floración.