



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ESTRÉS ABIÓTICO EN CLIMA NEOTROPICAL INFLUENCIA LA PRODUCCIÓN DE PIGMENTOS, CAPACIDAD ANTIOXIDANTE Y EXPRESIÓN DE DESÓRDENES FISIOLÓGICOS EN MANZANAS

Ing. Agr. *Magister* Vivian Severino

Doctora en Ciencias Agrarias

Opción Ciencias Vegetales

Marzo 2022

Tesis aprobada con mención por el tribunal integrado por el Ing. Agr. Dr. Gerardo Echeverría, el Lic. Biología PhD. José Mirás-Avalos, y la Ing. Agr. PhD. Georgina García Inza, el 4 de marzo de 2022.

Autora: Ing. Agr. *Magister* Vivian Severino

Director Ing. Agr. PhD. Santiago Dogliotti,

Codirector Ing. Agr. Dr. José Antonio Yuri.

"Porque cada hombre tiene su propio tiempo
y solo mientras siga siendo suyo se mantiene vivo."

Michael Ende

Dedico este trabajo a los que tantos tiempos y orejas
me han prestado en este tramo del camino.

AGRADECIMIENTOS

A esta red compleja que, con encuentros y desencuentros, acuerdos y desacuerdos se ha ido tejiendo, firme y fuerte.... Mi familia, toda, que siempre está ahí, la de todos los días (Guille, Alin, Basti, Eti, Nati, Carlopa, Lu y Los Viejos) y la de los domingos. Amigos, colegas y compañeros, con los que compartimos el día a día, el campo y el sol; y cargamos cajones y micropipetas... con quienes compartimos pasiones; la fruticultura y algunas otras pasiones que hacen "rodar" la vida. Al equipo de tutores, comité de seguimiento y coautores de los trabajos, por su tiempo y sus valiosas colaboraciones; los detalles, las ideas nuevas, las de dentro y fuera de "la caja". A las instituciones y su gente que facilitaron los medios, Frutisur, Afrupi, INIA, CSIC, CAP, ANII. En fin, a quienes siendo parte de uno o varios de los hilos de esta red han estado allí, sosteniendo.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN.....	VII
SUMMARY.....	IX
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	1
1.1. EL CULTIVO DE MANZANA Y EL CONTEXTO FRUTÍCOLA EN URUGUAY.....	1
1.2. ESTRESSES ABIÓTICOS EN EL CONTEXTO PRODUCTIVO.....	2
1.3. ADAPTACIÓN ECOFISIOLÓGICA DEL MANZANO.....	3
1.3.1. <u>Factores predisponentes de desórdenes fisiológicos</u>.....	5
1.3.1.1. Radiación.....	5
1.3.1.2. Temperatura.....	6
1.3.1.3. Estrés hídrico.....	7
1.3.2. <u>Manejos</u>	8
1.3.2.1. Malla sombra.....	8
1.3.2.2. Enfriamiento evaporativo.....	9
1.3.2.3. Protectores solares.....	9
1.3.2.4. Manejo del vigor.....	9
1.3.2.5. Otros manejos.....	10
1.3.3. <u>Predicción</u>.....	10

1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA GENERAL DE LA TESIS.....	12
1.4.1. <u>Preguntas de investigación</u>.....	12
1.4.2. <u>Hipótesis</u>.....	13
1.4.3. <u>Objetivos</u>.....	13
1.4.4. <u>Esquema general de la tesis</u>.....	14
2. <u>PARÁMETROS CLIMÁTICOS Y FISIOLÓGICOS RELACIONADOS A LA EVOLUCIÓN Y PREDICCIÓN DE DAÑO POR SOL EN MANZANA EN CLIMA NEOTROPICAL / CLIMATIC AND PHYSIOLOGICAL PARAMETERS RELATED TO THE PROGRESS AND PREDICTION OF APPLE SUNBURN DAMAGE IN A NEOTROPICAL CLIMATE</u>.....	16
3. <u>RELACIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO Y DE FRUTO CON LA EVOLUCIÓN DEL DAÑO POR SOL EN MANZANAS....</u>	28
3.1. INTRODUCCIÓN.....	28
3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31

3.3.	RESULTADOS.....	34
3.4.	DISCUSIÓN.....	37
3.5.	CONCLUSIONES.....	40
3.6.	BIBLIOGRAFÍA.....	40
4.	<u>MANEJO PRE Y POSCOSECHA DEL DAÑO DE SOL EN MANZANAS GRANNY SMITH (MALUS × DOMESTICA BORKH) BAJO CONDICIONES DE CLIMA NEOTROPICAL / PRE- AND POSTHARVEST MANAGEMENT OF SUNBURN IN 'GRANNY SMITH' APPLES (MALUS × DOMESTICA BORKH) UNDER NEOTROPICAL CLIMATE CONDITIONS.....</u>	45
5.	<u>CONCLUSIONES GENERALES.....</u>	65
5.1.	CONDICIONES PREDISPONENTES.....	66
5.2.	CARACTERIZACIÓN DE FRUTOS Y PREDICCIÓN.....	67
5.3.	MANEJOS.....	68
5.3.1.	<u>Modificación de los factores predisponentes.....</u>	68
5.3.2.	<u>Manifestación de síntomas.....</u>	69
5.4.	PERSPECTIVAS DE FUTURO.....	70
6.	<u>BIBLIOGRAFÍA.....</u>	72

RESUMEN

El cultivo de manzana, de altos requerimientos de mano de obra y relevante en términos de soberanía alimentaria, experimenta una disminución del número de productores. La fruta, de reconocida calidad organoléptica, suele presentar desórdenes fisiológicos como daños de sol, escaldado, lenticelosis y bitter pit. Estos daños están asociados a estreses abióticos y se expresan en campo o poscosecha, reduciendo la sostenibilidad económica del cultivo en clima neotropical. El presente trabajo tuvo como objetivos: a) determinar factores del clima que son limitantes de adaptación en condiciones de clima neotropical, b) evaluar respuestas fisiológicas mediante espectroradiometría y analizar su potencial de predicción de desórdenes, y c) evaluar estrategias de manejo capaces de mitigar el daño por estrés abiótico. Nuestros resultados registraron una alta variabilidad de las condiciones predisponentes, así como del desarrollo de daños, siendo la disponibilidad de agua en el suelo la condición más relacionada con el daño por sol. De los tratamientos realizados en campo, la malla negra 50 % fue el que redujo en mayor medida los niveles de daño, reduciendo la temperatura de aire y de fruto y presentando el potencial de xilema menos restrictivo ($-0,54\text{MPa}$), sin afectar parámetros de crecimiento. Los tratamientos bajo malla presentaron siempre menores expresiones de sunscald. Respecto de la predicción de daños, las diferencias de potencial hídrico entre las caras del fruto, la concentración de prolina (indicadores destructivos) y el índice de espectroradiometría PSRI480 (indicador no destructivo) presentan las mejores características.

Palabras clave: daño de sol, sunscald, Granny Smith, espectroradiometría, potencial hídrico

SUMMARY

Abiotic Stress In Neotropical Climate Influences Pigment Production, Antioxidant Capacity And Expression Of Physiological Disorders In Apples.

Apple cultivation, which is labour-intensive and relevant in terms of food sovereignty, is experiencing a decrease in the number of producers. The fruit, of recognised organoleptic quality, often shows physiological disorders such as sun damage, scald, lenticellosis and bitter pit. These damages are associated with abiotic stresses and are expressed in the field or postharvest, reducing the economic sustainability of the crop in the neotropical climate. The objectives of the present work were: a) to determine climate factors that are limiting for adaptation under neotropical climate conditions, b) to evaluate physiological responses using spectroradiometry and analyse their potential for predicting disorders, and c) to evaluate management strategies capable of mitigating abiotic stress damage. Our results showed a high variability of predisposing conditions and damage development, with soil water availability being the condition most related to sun damage. Of the field treatments, 50 % black netting was the one that reduced damage levels the most, reducing air and fruit temperature and presenting the least restrictive xylem potential (-0.54MPa), without affecting growth parameters. The treatments under netting always showed lower expressions of sunscald. Regarding damage prediction, water potential differences between fruit faces, proline concentration (destructive indicators) and PSRI480 spectroradiometry index (non-destructive indicator) showed the best characteristics.

Keywords: sun damage, sunscald, Granny Smith, spectroradiometry, water potential

1. INTRODUCCIÓN

1.1. EL CULTIVO DE MANZANA Y EL CONTEXTO FRUTÍCOLA EN URUGUAY

La fruticultura es un rubro relevante en la producción agropecuaria en el Uruguay, fundamentalmente debido a lo intensivo de la producción, la alta ocupación de mano de obra y su aporte a la soberanía alimentaria. Mientras que la producción agropecuaria promedio genera 0,5 millones de dólares corrientes cada 1000 ha, la fruticultura produce 9 millones (índices elaborados con base en MGAP-DIEA (2014). La mano de obra empleada en el cultivo es de 165 trabajadores y 32.953 jornales cada 1000 ha, en tanto, en el promedio del agro estos valores alcanzan a 7 trabajadores y 1.468 jornales cada 1000 ha.

Se ha registrado una reducción de un 41 % del número de productores entre 2005 y 2016, la mayoría de ellos menores a 10 ha (Gazzano et al., 2021), y estamos asistiendo a un proceso de pérdida de capacidades en el sector empresarial (Caputi y Canessa, 2012). A pesar de su importancia social y económica, la producción nacional de frutas y hortalizas es el 50 % de la necesaria para satisfacer el consumo recomendado para la población (Gazzano et al., 2021) y el rubro no es ajeno al proceso de falta de sostenibilidad de las producciones intensivas del sur del Uruguay (Dogliotti et al., 2014).

Dentro de la fruticultura de hoja caduca en Uruguay, la manzana es la especie de mayor importancia (DIEA, 2016) y su principal destino comercial es el consumo interno en fresco (aproximadamente 90 %). En cuanto a la exportación, la especie representa el tercer rubro frutícola de Uruguay y su calidad es reconocida en el mercado internacional (Proexport 2013; XXI Uruguay 2016) por sus características organolépticas (Feippe et al., 2007),

aunque han sido citados problemas de calidad asociados a la falta de sobrecoloración y el desarrollo de algunos desórdenes fisiológicos como ser: daños de sol, lenticelosis y bitter pit (Feippe 1995; Feippe et al., 2011).

1.2. ESTRESSES ABIÓTICOS EN EL CONTEXTO PRODUCTIVO

Los problemas de calidad asociados a estreses abióticos (desórdenes fisiológicos) están presentes en todas las zonas productoras y su magnitud es muy variable entre sitios de producción, ciclos productivos y variedades. Esta variabilidad, tanto a nivel global como en Uruguay, determina que, aunque son citados reiteradamente como una causa de pérdida de fruta, está poco reportada la cuantificación de los daños. Solo en referencia a los daños por sol se han reportado pérdidas que van desde el 10 al 50 % de la producción (Reig et al., 2019).

En el ámbito productivo la mayoría de los desórdenes fisiológicos que afectan negativamente la calidad de fruta (Jaeger et al., 2016) son reconocidos como problemas poscosecha, aunque no siempre requieren condiciones de guarda para expresarse, estando relacionados con el desarrollo del fruto y su madurez en el campo (Ferguson et al., 1999).

Dentro de los desórdenes fisiológicos reportados en el cultivo del manzano se encuentran daños por sol, lenticelosis, bitter pit, escaldadura superficial, escaldadura senescente, escaldadura blanda y pardeamiento interno.

La calidad de la fruta, es dependiente de características morfológicas, organolépticas (Dan et al., 2015), nutritivas y de seguridad alimentaria (López Camelo, 2003). Es un rasgo complejo que se encuentra vinculado a las

condiciones de crecimiento del fruto y, por tanto, determina la adaptación ecofisiológica de un cultivo.

1.3. ADAPTACIÓN ECOFISIOLÓGICA DEL MANZANO

Los factores edafoclimáticos influyen el comportamiento fisiológico y agronómico de los cultivos, definiendo la potencialidad productiva y el desarrollo de las características de calidad que tipifican un cultivar determinado (Gariglio et al., 2007).

La producción de manzana en Uruguay se encuentra comprendida entre los paralelos 34 y 35 de latitud S, en la zona más austral de una región de extensos pastizales de la ecorregión de la sabana uruguaya, también conocida como campos, y que representan un ecotono regional entre los bosques subtropicales y tropicales y los pastizales templados de Sudamérica (Bernardi et al, 2016). El clima de la región ha sido tradicionalmente clasificado como templado, usando la clasificación de Köppen-Geige, y es actualmente clasificado como templado cálido o neotropical (Bernardi et al., 2016). Esta zona de producción presenta factores climáticos que se consideran limitantes y según relevan estos autores, la evolución durante el último siglo la ha vuelto más húmeda y cálida, una tendencia que se espera que continúe con el alza de la temperatura. Dentro de los aspectos limitantes, la falta de frío invernal, la ocurrencia de heladas, el exceso de agua en el suelo, la sequía, el granizo y el daño por sol son los más recurrentes (FAO MGAP 2013). Por su parte, y de acuerdo a estudios realizados por Giménez y Lanfranco (2012), las situaciones de estrés del cultivo en Uruguay podrían incrementarse debido a un aumento muy generalizado de la variabilidad, mientras que también son citadas

evidencias de cambio en la relación de eventos de temperaturas extremas (Renom et al., 2011).

La capacidad de adaptación del manzano en cultivo llega incluso a registrarse en climas tropicales (Ramírez y Kallarackal, 2014) y el efecto del estrés sobre la calidad de la fruta a cosecha y en poscosecha sigue siendo complejo y variable (Kowitcharoen et al., 2018). Por ello, el estudio de la adaptación ecofisiológica del cultivo en el más variado rango de condiciones climáticas aporta tanto a su manejo en las condiciones locales, como a la generación de información relevante para futuros escenarios.

Los mecanismos de adaptación suponen el desarrollo de varias estrategias morfológicas, bioquímicas y moleculares que generan mecanismos de evitación y tolerancia (Tripathi DK, 2020). Algunos de estos mecanismos son la disipación de la energía; los cambios en la pigmentación (Merzlyak et al., 2003) con disminución de la clorofila (Ballester et al., 2013) e incremento de flavonoides y carotenoides (Grandón et al., 2019); el aumento de solutos de bajo peso molecular (Kanayama y Kochetov 2015) con su efecto en la mantención de la presión de turgencia, el volumen celular y la concentración de electrolitos (Roberts 2005); y la generación de ROS (especies reactivas del oxígeno) (Tripathi DK, 2020). Estos mecanismos de adaptación se vinculan a los desórdenes fisiológicos que se expresan como consecuencia de las condiciones de crecimiento del fruto.

1.3.1. Factores predisponentes de desórdenes fisiológicos

El conocimiento de factores de precosecha que pueden determinar trastornos fisiológicos que condicionen el almacenamiento es importante en la obtención de fruta de calidad (Ferguson et al., 1999). Las situaciones de crecimiento de fruto citadas como inductoras de desórdenes fisiológicos de la piel son la exposición excesiva a la luz solar, la alta temperatura (Glenn y Yuri, 2013) y estrés hídrico en los tejidos del fruto (Torres et al., 2013; Mupambi, 2017). Todos estos factores presentan una alta interrelación tanto en el ambiente como en la respuesta de las plantas, lo que genera dificultades para la determinación de los umbrales de daño (Glenn and Yuri 2013).

El abordaje más tradicional de los desórdenes fisiológicos de la piel de manzana está centrado en que frutos con excesiva exposición a la radiación solar y altas temperaturas, experimentan condiciones de estrés fotooxidativo e incrementos en la temperatura de su superficie (Schrader et al., 2008; Lin-Wang et al., 2011; Torres et al., 2016a). También se ha reportado la expresión de desórdenes fisiológicos inducidos por condiciones de estrés hídrico en los tejidos del fruto y vinculados a los equilibrios nutricionales (Monge et al., 1994; Lötze y Theron, 2007). La detección visual del daño y la comprensión de las condiciones ambientales que se dan en el momento o inmediatamente antes de los síntomas visuales no revelan necesariamente el factor o factores subyacentes que inician los procesos metabólicos o degenerativos que conducen al daño (Glenn y Yuri, 2013).

1.3.1.1. Radiación

Los efectos de la radiación solar como factor predisponente de desórdenes han sido abordados en distintos rangos del espectro y vinculados al daño provocado en el fotosistema II (PSII). Estudios desarrollados por Glenn

et al. (2008) y Glenn y Yuri (2013) han abordado el efecto de la radiación ultravioleta (UV) en el daño por sol. En sus primeros trabajos concluyen que la exposición de frutos no adaptados a la radiación UV produce daños en el PSII, aunque no se presentó una correlación significativa con los pigmentos por ellos evaluados, sugiriendo que habría otros mecanismos que interactúan con el contenido de pigmentos en la respuesta de la piel a la radiación UV (Glenn et al., 2008). Trabajos posteriores indican que existe un daño acumulativo en la manzana y que no hay umbrales simples para los valores que inicien el daño del PSII y que potencialmente conduzcan al daño por sol (Glenn y Yuri, 2013). En estudios realizados en manzanas de distintos cultivares y diferentes estados de madurez, el estrés por UV-B no causó fotoinhibición a ninguno de los cultivares durante el crecimiento del fruto. Sin embargo, el estrés UV-B sí causó fotoinhibición en los frutos maduros de Granny Smith y Fuji previamente sombreados (Hengari et al., 2014). Naschitz et al., (2015) expresan que la quemadura solar fotooxidativa se desarrolla bajo radiación fotosintéticamente activa (PAR) y no es sensible a la radiación de onda corta en el espectro UV.

1.3.1.2. Temperatura

Hay consenso respecto al efecto de la temperatura como factor predisponente para el daño de sol y los valores de temperatura de superficie de fruto que inducen los distintos tipos de daño en campo. Es así que, aunque con algunas variaciones atribuidas a los cultivares, valores sobre 46 °C son citados como promotores de daños caracterizados como pardeamiento y valores sobre 51 °C provocan necrosis (Schrader et al., 2003; Racsko and Schrader 2012; Glenn and Yuri 2013; Hengari et al., 2014; Morales-Quintana et al., 2020).

Las diferencias entre la temperatura del aire y de la superficie de la fruta han sido abordadas por distintos grupos y se citan aumentos de entre 5 y 17 °C respecto de la temperatura del aire en función de la exposición del fruto y otros factores climáticos como la humedad relativa y la velocidad del viento (Schrader et al., 2003; Piskolczi et al., 2004; Racsko y Schrader 2012; Darbyshire et al., 2015). Por su parte, manejos que reducen la temperatura de fruta como la colocación de mallas, han mostrado ser efectivos sobre el quemado de sol (Manja y Aoun, 2019), aunque hay poca información sobre la incidencia de desórdenes fisiológicos de poscosecha como el sunscald.

1.3.1.3. Estrés hídrico

Los estudios enfocados en el estrés hídrico como factor predisponente para el daño por sol son más recientes. Algunos trabajos han demostrado que los tejidos dañados tienen un potencial hídrico más negativo que aquellos sanos (Torres et al., 2013). También ha sido establecida la vinculación entre el estrés osmótico del fruto y el estrés fotooxidativo y térmico en el campo, proponiéndose un índice de estrés hídrico del cultivo como indicador temprano de daño solar en la fruta sin síntomas visibles (Torres et al., 2013, 2016b).

La relación entre quemado y estrés hídrico motivó la realización de estudios con aplicación exógena de ácido abscísico (ABA), regulador del crecimiento que participa en la señalización y la regulación de las respuestas de las plantas al estrés hídrico. El ABA se produce en las raíces y se transporta a los brotes a través del xilema, donde regula el cierre estomático en las hojas y los frutos, controlando así la pérdida de agua por transpiración. Sin embargo,

estudios realizados con aplicaciones de ABA en Sudáfrica y Japón no han tenido resultados consistentes (Mupambi et al., 2018b).

1.3.2. Manejos

Con el objetivo de reducir los daños por desórdenes fisiológicos, han sido propuestos manejos del microclima en lo referente a los factores cantidad y calidad de luz, temperatura y estatus hídrico. Entre los más estudiados y utilizados en forma comercial se encuentran: la colocación de mallas sombra, el riego evaporativo, el uso de protectores solares y el manejo del vigor de los árboles (Yuri, 2010; Szabó et al., 2021).

1.3.2.1. Malla sombra

El uso de mallas ha sido intensamente adoptado en el cultivo del manzano para protección frente a granizo, radiación solar, pájaros, viento e insectos. Existe una amplia disponibilidad de materiales y su elección (tipo de hilo, color y porosidad) hace a los distintos materiales más o menos apropiados para un determinado objetivo (Manja y Aoun 2019).

Una exhaustiva revisión del uso de mallas en el cultivo del manzano concluye que el impacto de la malla sombra es mucho mayor que las diferencias entre las opciones de color disponibles (Mupambi et al., 2018a). También debe considerarse que las características del material cambian con el tiempo debido a la degradación de los pigmentos y a la suciedad que van acumulando (Blanke 2009).

Las respuestas fisiológicas reportadas en ensayos de campo en una diversidad de condiciones presentan inconsistencias, por lo que en el análisis

de las respuestas deben ser considerados el clima, el material utilizado, el cultivar y aspectos de manejo como el estado fenológico.

1.3.2.2. Enfriamiento evaporativo

El enfriamiento evaporativo, realizado mediante aspersión de agua sobre la copa de los árboles ha sido utilizado para bajar la temperatura de la fruta reduciendo el daño por sol y mejorando su coloración (Gindaba y Wand, 2005).

A pesar de los beneficios en la mejora del sobrecolor y quemado de sol, este sistema presenta limitaciones, tales como su elevado costo de instalación y funcionamiento, su alto requerimiento de agua y la atención permanente que requiere, que complejizan su utilización comercial (Racsko y Schrader, 2012).

1.3.2.3. Protectores solares

Una variedad de productos ha sido propuesta para reducir el quemado de sol. Racsko y Schrader (2012) distinguen dos tipos: partículas inorgánicas que bloquean, reflejan y dispersan la radiación solar; y productos que contienen agentes químicos orgánicos absorbentes, además de los componentes inorgánicos.

La efectividad de estos productos ha mostrado diversos resultados y parte de la explicación está dada por el bajo depósito de producto que se logra tras una aplicación foliar (sólo el 2 % del total asperjado alcanza a la fruta) y la necesidad de reiteración de las aplicaciones (Yuri 2010).

1.3.2.4. Manejo del vigor

El equilibrio entre la exposición de la fruta a la luz para el buen desarrollo del sobrecolor y el riesgo de quemadura de sol parece ser un punto difícil de determinar (Yuri 2010). La tendencia a la implantación de cultivos en alta

densidad es beneficioso respecto de la eficiencia productiva y varios aspectos de calidad de la fruta (Musacchi y Serra, 2018), pero presentan mayor susceptibilidad al daño por sol por mayor exposición de la fruta (Morales-Quintana et al., 2020).

1.3.2.5. Otros manejos

La ubicación del cultivo y la orientación de las filas afectan la incidencia de luz sobre él, por lo que deben tenerse en cuenta al momento de la plantación. No obstante, en general son otros los aspectos jerarquizados para la toma de estas decisiones.

Aplicaciones de ácido ascórbico, tocoferoles y ABA han sido probadas con variada efectividad y altos costos (Racsko and Schrader 2012). Otro manejo que reduce el quemado de sol es el embolsado individual de la fruta, manejo que puede justificarse en casos de variedades como Fuji, destinadas a mercados de muy alto precio, debido a su mayor costo de producción (Yuri et al., 2020).

1.3.3. Predicción

Cuando la aparición de desórdenes no puede ser manejada, se deben detectar y eliminar los frutos dañados previo al almacenaje (Tartachnyk et al., 2012). Apoyadas en la evidencia de la existencia de procesos de aclimatación con efecto acumulativo, relacionados con la expresión de pigmentos y otras manifestaciones de estrés en los tejidos, se han desarrollado diversas técnicas para su detección temprana. Los modelos de predicción de desórdenes más extendidos pueden clasificarse en cuatro grupos: 1. los que relacionan variables climáticas con el riesgo de aparición, 2. los vinculados a los

contenidos mineralógicos de la fruta, 3. los que provocan la expresión temprana de síntomas, y 4. los vinculados a aspectos fisiológicos del fruto.

El uso de espectroradiometría ha sido planteado como promisorio para la predicción de desórdenes fisiológicos en campo y en poscosecha (Solovchenko et al., 2010; Tartachnyk et al., 2012; Torres et al., 2016a). La composición y localización de pigmentos de la epidermis, así como las propiedades ópticas de los tejidos subyacentes, son posibles de caracterizar por reflectancia espectral en el rango visible e IR cercano (Solovchenko et al., 2010; Braun et al., 2013). Otra herramienta de diagnóstico propuesta en trabajos que relacionan el daño por sol debido a la radiación solar y temperatura excesivas, así como con los déficits hídricos, es la fluorescencia de la clorofila (Glenn y Yuri, 2013). Más recientemente, se ha propuesto el uso de imágenes hiperespectrales, aunque su desarrollo es aún incipiente (Solovchenko et al., 2021).

1.4. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y ESTRUCTURA GENERAL DE LA TESIS

1.4.1. Preguntas de investigación

La adaptación del cultivo de manzana en el ecotono regional entre los bosques subtropicales y tropicales y los pastizales templados de Sudamérica tiene relevancia a nivel local, regional y global. En el ámbito local, es relevante la importancia social y económica de la fruticultura y dentro de ella del cultivo de manzana, en términos de soberanía alimentaria y capacidad exportadora. Esta condición determina un contexto en el que es relevante contribuir a la comprensión de la adaptación del cultivo. En términos de un contexto regional o global, cobra relevancia el estudio del comportamiento y adaptación de las especies a la mayor variedad de climas. De este modo se contribuye a predecir el comportamiento del cultivo del manzano en la realidad de clima cambiante que están transitando las zonas tradicionales de producción. El presente trabajo aborda la adaptación del cultivo del manzano centrada en los problemas de calidad de fruta vinculados a factores abióticos, siendo el primer estudio realizado en condiciones de clima neotropical. En este contexto han surgido y abordamos las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cuáles son los factores del clima que resultan limitantes de adaptación del cultivo de manzana en condiciones de clima neotropical respecto de aspectos de calidad de fruta vinculados a estreses abióticos?
2. ¿Podríamos basarnos en la medición de respuestas fisiológicas a condiciones de estrés abiótico mediante espectroradiometría, para desarrollar una herramienta de predicción de desórdenes fisiológicos para el ámbito productivo y contribuir a reducir las pérdidas poscosecha?

3. ¿Existen estrategias de manejo capaces de mitigar el daño por estrés abiótico en condiciones de cultivo en clima neotropical?

1.4.2. Hipótesis

1. El cultivo de manzana desarrollado en clima neotropical presenta condiciones de estrés abiótico que determinan la aparición de desórdenes fisiológicos.
2. Existe correlación entre parámetros fisiológicos (potencial hídrico de tejido, concentración de sustancias reactivas al oxígeno, pigmentos y prolina) y la caracterización de los frutos mediante espectroradiometría durante el período de crecimiento.
3. La espectroradiometría permite mejorar la toma de decisiones y reducir los volúmenes de pérdida de calidad de fruta en poscosecha al evaluar el nivel de estrés y estimar el riesgo de la aparición de daños asociados a estrés ambiental como el daño de sol.
4. Existen estrategias de manejo capaces de reducir la pérdida de calidad por desórdenes fisiológicos.

1.4.3. Objetivos

Objetivo general:

Contribuir a la comprensión de la adaptación del cultivo de manzana a las condiciones de clima neotropical, analizando las estrategias de manejo que permitan superar las principales limitantes.

Objetivos específicos:

- Analizar el desarrollo de desórdenes fisiológicos (principalmente daños por sol) y establecer su relación con parámetros climáticos y fisiológicos que permitan su predicción en clima neotropical.
- Evaluar la espectralradiometría como herramienta de predicción de daños.
- Evaluar estrategias de manejo que reduzcan la aparición de desórdenes fisiológicos vinculados a la piel del fruto de manzana.

1.4.4. Esquema general de la tesis

La tesis consta de 5 capítulos organizados de acuerdo al siguiente esquema.

Capítulo 1. Incluye la contextualización del trabajo, en donde se establece la relevancia local y global de las temáticas abordadas. Este capítulo presenta una justificación de los abordajes realizados en el marco del conocimiento existente y, por último, presenta las hipótesis de trabajo y los objetivos propuestos.

Capítulo 2. Este capítulo se centra en las relaciones existentes entre el daño por sol (establecido como el desorden fisiológico de mayor importancia) y parámetros climáticos y fisiológicos. En un período marcado por una alta variabilidad climática interanual y centrados en Granny Smith como modelo, se evalúan también herramientas de predicción con el fin de contribuir al manejo pre y poscosecha.

Capítulo 3. El capítulo 3 profundiza en las relaciones del daño por sol y los aspectos vinculados a la condición hídrica de planta y fruto. En él, se amplía el análisis a un grupo de 3 cultivares (Brasil Gala, Granny Smith y Cripps pink) y medidas de manejo realizadas sobre Granny Smith para reducir el daño por sol.

Capítulo 4. Este capítulo se centra en el análisis de la adaptación de las medidas de manejo propuestas en otras zonas de producción a las condiciones de clima neotropical. El análisis vuelve a considerar a Granny Smith como modelo y aborda los daños de sol detectables en campo y la manifestación de daños en poscosecha.

Capítulo 5. El capítulo 5 comprende un análisis conjunto de la información presentada y discutida en los capítulos previos. Se establecen los avances alcanzados en la comprensión de la adaptación del cultivo de manzana a las condiciones de clima neotropical y el manejo tendiente a reducir las pérdidas de fruta vinculadas a los desórdenes fisiológicos.

2. PARÁMETROS CLIMÁTICOS Y FISIOLÓGICOS RELACIONADOS A LA EVOLUCIÓN Y PREDICCIÓN DE DAÑO POR SOL EN MANZANA EN CLIMA NEOTROPICAL

CLIMATIC AND PHYSIOLOGICAL PARAMETERS RELATED TO THE PROGRESS AND PREDICTION OF APPLE SUNBURN DAMAGE IN A NEOTROPICAL CLIMATE

Vivian Severino¹, Mercedes Arias-Sibillotte¹, Santiago Dogliotti¹, Erna Frins², Jaime González-Talice¹, José A. Yuri³.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Udelar), Garzón 780, CP 12900. Montevideo, Uruguay.

² Facultad de Ingeniería, Udelar, Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300. Montevideo, Uruguay.

³ Centro de Pomáceas, Universidad de Talca, 1 Poniente 1141, Talca, Chile.

Palabras clave: *Malus domestica*; potencial hídrico; prolina; espectroradiometría; índices de reflectancia.

La producción de manzanas en clima neotropical se ve afectada por el quemado de sol, y la alta variabilidad interanual de las condiciones meteorológicas dificulta la predicción y gestión de los daños. Los métodos no destructivos asociados a las variables fisiológicas son claves para el monitoreo, pero su desarrollo es aún incipiente. En nuestro trabajo se monitorizaron la

ocurrencia de quemado de sol, las condiciones meteorológicas y los parámetros fisiológicos a lo largo de cuatro ciclos de cultivo. Se realizó una evaluación visual del fruto y medidas de reflectancia en campo, así como, pigmentos, prolina y potencial hídrico en laboratorio. Los resultados muestran que la disponibilidad de agua en el suelo estuvo más relacionada con la evolución del quemado de sol que la temperatura del aire. El índice de reflectancia de senescencia de la planta (predictor no destructivo) discriminó entre frutos sanos y dañados. El potencial hídrico del fruto y el contenido de prolina fueron buenos indicadores del quemado de sol, aunque dichas variables se determinan cuando el daño ya se ha producido. Nuestros resultados sugieren centrar la investigación futura en el balance hídrico del sistema y en los indicadores fisiológicos del estrés osmótico como forma de predecir los daños.



Climatic and physiological parameters related to the progress and prediction of apple sunburn damage in a neotropical climate

V. Severino ^{1(*)}, M. Arias-Sibillotte ¹, S. Dogliotti ¹, E. Frins ², J. Gonzalez-Talice ¹, J.A. Yuri ³

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDEAR), Garzón 780, CP 12900 Montevideo, Uruguay.

² Facultad de Ingeniería, UDEAR, Julio Herrera y Reissig 565, CP 11300 Montevideo, Uruguay.

³ Centro de Pomáceas, Universidad de Talca, 1 Poniente 1141, Talca, Chile.



Key words: hydric potential, *Malus domestica*, proline, spectroradiometry, reflectance indices.

(*) Corresponding author:
vseverin@fagro.edu.uy

Citation:
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. - Adv. Hort. Sci., 34(4): 431-440

Copyright:
© 2020 Severino V., Arias-Sibillotte M., Dogliotti S., Frins E., Gonzalez-Talice J., Yuri J.A. This is an open access, peer reviewed article published by Firenze University Press (<http://www.fupress.net/index.php/ahs/>) and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement:
All relevant data are within the paper and its Supporting Information files.

Competing Interests:
The authors declare no competing interests.

Received for publication 18 September 2020
Accepted for publication 30 November 2020

Abstract: Apple production in neotropical climate is affected by sunburn and the high interannual variability in meteorological conditions makes prediction and management of damage difficult. Non-destructive methods associated with physiological variables are keys to monitoring but their development is still incipient. In our study occurrence of sunburn, meteorological conditions and physiological parameters was monitored throughout four crop cycles. Fruit visual assessment and reflectance measures in field, as well as, pigments, proline and hydric potential in laboratory, were accomplished. The results show that the availability of water in the soil was more related to the evolution of sunburn than air temperature. Plant Senescence Reflectance Index (non-destructive predictor) discriminated between healthy and damaged fruits and fruit hydric potential and proline content were good indicators of sunburn, although such variables are determined when damage has already occurred. Our results suggest focusing future research on the water balance of the system and on the physiological indicators of osmotic stress as a way to predict damage.

1. Introduction

Fruit sunburn has been reported since 1870, and although several studies have touched upon the matter since the early 20th century (Racsko and Schrader, 2012), it is still a cause of significant economic loss in apple production (Reig *et al.*, 2019). Although some expressions of damage may be easily perceived in the field, on occasions the symptoms of sunscald are imperceptible and only appear after months of cold storage (usually after three months), which makes the damage difficult to control (Yuri *et al.*, 2000). Symptoms appear as brown stains on the fruits'

exterior, being Granny Smith the most susceptible reported cultivar (Felicetti and Schrader 2008; Hernandez *et al.*, 2014).

There is consensus that sunburn is related to the combination of high temperature and irradiance (UV-B range is thought to be essential) during the fruit growth period (Yuri *et al.*, 2000, 2010; Racsko and Schrader, 2012; Torres *et al.*, 2013; Darbyshire *et al.*, 2015; Torres *et al.*, 2016 a, b), however, there is a limited understanding of the physiological aspects of the changes in the fruit's internal quality (Racsko and Schrader, 2012) and generation of sun-related physiological disorders in fruit. This problem requires further research into the environmental and physiological processes that occur prior to and during sun injury development and more importantly, biochemical changes that may contribute to resistance to environmental conditions that cause sun-related disorders in fruit (Morales-Quintana *et al.*, 2020).

Stress adaptation mechanisms of plants, such as chlorophyll reduction (Ballester *et al.*, 2017), dissipation of excitation energy, increase of solutes of low molecular weight (Wen and Moriguchi, 2015) and changes in pigmentation (Merzlyak *et al.*, 2003) have been previously studied in relation to sunburn in apple fruit. Based on these results, in the last decade, work has been done on the development of non-destructive methods to predict and detect sun damage based on the composition and location of skin pigments as well as the optical properties of the underlying fruit tissue (Solovchenko *et al.*, 2010; Torres *et al.*, 2016 a, b). In this direction, sunburn has been related to: fruit reflectance values in the visible and near-infrared (NIR) spectra (Solovchenko *et al.*, 2010; Torres *et al.*, 2016 a), crop water stress index and chlorophyll fluorescence (Torres *et al.*, 2013, 2016 b).

About temperature effect, it has been reported that increases in fruit temperature above a certain limit may cause enzymes denaturation and protein coagulation, leading to tissue damage (Yuri *et al.*, 2010). Studies performed in cv. Fuji fruits showed a highly susceptible caused by excessive heat and did not sustain damage when exposed to UV radiation only (Yuri *et al.*, 2000). Air temperatures of 38-42°C increases the heat-shock proteins induction (Woolf and Ferguson, 2000) and sunburn symptomatology appear with fruit temperature of 46°C and higher (Racsko and Schrader, 2012).

The water status of the plant and fruit has also been related to sunburn, although fewer studies

have focused attention on this aspect. Recent work in Chile analyses the association of acclimation events with fruit water relations and osmoregulation occurring in sun-exposed fruit tissue (Torres *et al.*, 2013). Studies in Japan and South Africa discuss the effect of foliar ABA on antioxidant levels and the incidence of sunburn with variable results (Mupambi *et al.*, 2018). Antioxidant system plays a crucial part in the elimination of free radicals under stress conditions (Chen and Murata, 2002). Compatible solutes such as proline, betaine and polyols are accumulated in response to abiotic stress (Suzuki, 2015). These solutes affect the osmotic balance and the membrane stability and have been proven to maintain turgor pressure, cellular volume and electrolyte concentration (Roberts, 2005). Proline is known to be a stabilizer of sub-cellular structures (Kautz *et al.*, 2015) and although many studies have established a connection between proline and antioxidant activity in apple plant leaves and xylem under abiotic stress (Šircelj *et al.*, 2005; Nemeskéri *et al.*, 2015; Afonso *et al.*, 2017) no relationship between proline and sunburn has yet been reported.

Most of the existing research has been carried out in latitudes similar to that of the present study but in more arid climates such as, Chile, Australia, and South Africa (southern hemisphere) or Spain, Turkey, and Washington State (north hemisphere), however, few studies have addressed sunburn in humid growth-season conditions like in Eastern New York State (Reig *et al.*, 2019). The region where the study was conducted, defined as neo-tropical (Bernardi *et al.*, 2016), has been considered restrictive for apple quality in relation to sunburn aspects (FAO-MGAP, 2013) due to the occurrence of high temperatures during the fruit growth period. Changes in El Niño evolution after 1976 may have played a role in altering the relationship between temperature extreme events in Uruguay and the atmospheric circulation (Renom *et al.*, 2011). The average maximum temperatures of the summer period show a high inter-annual variability (71-86%) and lower variability in the medium (10 years) or long-term (>30 years) components, 23% and 6% respectively (Tiscornia *et al.*, 2016), so it is expected that the climate in the region will continue to be favorable to the occurrence of burning. The aims of this work were to study apple sunburn progress and its relation to meteorological variables in a neo-tropical climate, and to establish correlations between fruit physiological parameters and reflectance index.

2. Materials and Methods

Plant material

The experiment was conducted during the 2012/2013 to 2015/2016 crop cycles (hereinafter, cycles 1 to 4), on a Granny Smith/M7 plantation established in 2003. The crop is located in Uruguay (southeastern of South America) with the coordinates of 34°38'18" S and 56°40'06" W and 45 meters above sea level. The climate of this regional ecotone is classified by Bernardi *et al.* (2016) as neo-tropical. Crop had planting distance of 4x1.5 m, rows arranged from N to S and trained in central leader system. The soil types are mainly Argiudolls and Hapluderts and a drip irrigation system with a maximum daily watering capacity of 4.5 mm is installed.

Three fruits per tree from ten trees per row, in a total of five rows were selected between 40 and 50 days after full bloom (DAFB) in the four evaluated cycles. Trees and rows were randomly marked, and 150 fruits exposed to radiation were classified by visual assessment of different external initial conditions: A) 50 fruits with no visible sunburn (HF=healthy fruits); B) 50 fruits with red color (RF=red fruits); C) 50 fruits with an early degree of sunburn (SBF=sunburn fruits) [sunburn browning, according to the classification of Racsko and Schrader (2012)] as indicated in figure 1. The flowering dates for cycles 1 to 4 were, September 27 (cycle 1), October 28, 3 and 14, to cycles 2, 3 and 4 respectively.

The exposed side of each fruit was defined as the one directly exposed to sunlight, facing the space between rows, and the internal side as the one facing the trunk, with no direct exposition to solar radiation.

Field tests

The sunburn progress in each marked fruit was assessed by observation. Its frequency varied between 1 week and 1 month, with weekly observa-

tions predominating. In each observation, fruits were reclassified according to the categories mentioned above (HF, RF, SBF). Reflectance measurements of the exposed side of ten fruits of each condition were recorded with an ILT 950 spectroradiometer (International Light Technologies, USA) at 91, 99 and 154 DAFB in cycle 4. Percent reflectance was calculated based on a dark spectrum and a reference spectrum from a white reference standard. The content of Chlorophyll (CHL), Anthocyanins (ANT), Carotenoids (CAR), Flavonoids (FLA) and Senescence indexes were calculated based on the reflectance measurements. Chlorophyll was calculated according to the following indexes: CHL1, CHL2 (Mullan, 2013) RARSa, RARSb, PSSRa, MSR, CL1, CL2 (Solovchenko *et al.*, 2010) and Anthocyanins, according to the Anthocyanin Reflectance Index (ARI) (Solovchenko *et al.*, 2010). Carotenoids were calculated according to the following indexes: RARSc (Mullan, 2013), CRI1 and CRI2 (Solovchenko *et al.*, 2010) and Flavonoids according to the Flavonoid Reflectance Index (FRI) (Solovchenko *et al.*, 2010). The Normalized Phaeophytization Index (NPQI), the Pigment Simple Ratio (PSR), the Normalized Difference Pigment Index (NDPI), the Structural Independent Pigment Index (SIPI) (Solovchenko *et al.*, 2010) and the Plant Senescence Reflectance Indexes (PSRI480 PSRI500) (Mullan, 2013) were also calculated (Table 1). An automated meteorology station located 1900 m from the crop recorded the maximum temperature (Tmax) (°C) and rainfall (RF) (mm) variables in the fruit's growth period. The soil water balance (SWB) for each growth cycle was calculated. Plot characteristics and local and regional meteorology stations were used. Local variables used were irrigation (mm), daily rainfall (mm), root deep (m), phenological stages (days) and soil texture. The ETo (reference evapotranspiration) (mm) was recorded at the meteorology station of INIA Las Brujas using Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Crop coefficient (Kc) was adjusted to reflect the wetting frequency of soil surface and local climatic conditions according to Allen *et al.* (2006):

$$K_{c_{int}} = K_{c_{ini}} + \frac{(1-10)}{(40-10)} [K_{c_{int}^{(n+1)}} - K_{c_{int}^{(n)}}]$$

$$K_{c_{mid}} = K_{c_{mid}}(Tab) + [0.04 (u_2 - 2) - 0.004 (RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3}$$

Where:

$K_{c_{ini}}^{(n)}$: value for Kc ini from figure 29 in Allen *et al.* (2006).

$K_{c_{ini}}^{(n+1)}$: value for Kc ini from figure 30 in Allen *et al.*

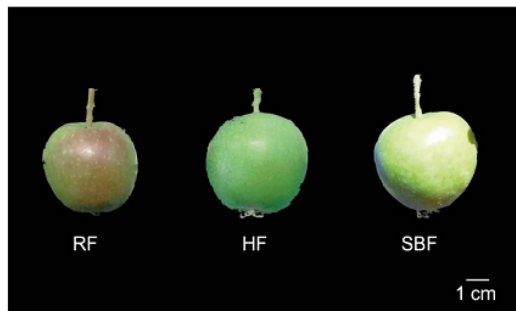


Fig. 1 - Examples of fruit categories. RF=red fruits, HF=healthy fruits, SBF=sunburn fruits.

(2006).

I: average infiltration depth (mm).

$K_{c\ mid}$ (Tab): value for K_c mid taken from Table 12 in Allen *et al.* (2006) apples, cherries and pears crops with active ground cover without frosts.

u_2 : mean value for daily wind speed at 2 m height over grass during the mid-season growth stage ($m\ s^{-1}$), for $1\ m\ s^{-1} < u_2 < 6\ m\ s^{-1}$.

RHmin: mean value for daily minimum relative humidity during the mid-season growth stage (%), for $20\% < RHmin < 80\%$.

h: mean plant height during the mid-season stage (m) for $0.1\ m < h < 10\ m$.

Laboratory

Five fruits of each damage category were sampled on the same dates on which the reflectance measurements were carried out (91, 99 and 154 DAFB) and in addition to the 112, 142 and 170 DAFB of cycle 4 for laboratory evaluations. Hydric potential of the fruits' tissue (ΨF) was determinate with Wp4c dew-point potentiometer (Decagon Devices, USA) on the exposed side (ΨFE) and the internal side (ΨFI). Each measurement was made on $3\ cm^2$ of epidermis with 1 mm of sub-epidermal tissue. To determine CHL, CAR and Proline content (PRO), 0.5 g of epidermis without sub-epidermal tissue was removed. The sample was macerated with 0.5 ml of a methanol-chloroform-water compound (MCW, 12:5:1), producing

two phases. In phase 1, pigments CHLa, CHLb and CAR were determined, recording absorbances at 665.6, 647.6 and 480 nm, respectively (Wellburn, 1994). In phase 2, after reacting to a one-hour immersion at $90^\circ C$ with acid ninhydrin and the addition of toluene, PRO was determined with spectrophotometry, recording absorbance at 515 nm (Troll and Lindsley, 1955; Charest and Phan, 1990). To determine ANT, 0.2 g tissue was incubated in methanol-acid for 48 h, recording absorbance values at 530 and 657 nm (Wellburn, 1994).

Statistical analysis

The contrastive analysis of the three fruit conditions regarding pigment quantification and assessment, PRO, ΨF and senescence indexes were done with non-parametric methods, using the Kruskal-Wallis test to compare medians and the Kruskal Nemenyi post-hoc test for the multiple comparisons of pairs, with the R statistical software. Differences were assessed at $p \leq 0.05$. Pearson's correlation coefficient was determined for the proportion of sun-damaged fruits and the climatic variables, maximum temperature (Tmax) and soil water balance (SWB). The same analysis was performed for the pigment content tested in the laboratory and those estimated by spectroradiometry in the field, as well as for PRO and ΨF . Best fit regressions for variables with higher correlation coefficients were estimated.

Table 1 - Indexes calculated by reflectance in the field

Name	Index	Index calculation	Parameter	Source
Reflectance Ratio	CHL1	R_{750}/R_{550}	Chlorophyll	Braun and Payne, 2013
	CHL2	R_{750}/R_{700}		Braun and Payne, 2013
Ratio Analysis of Reflectance Spectrum (Chla)	RARSa	R_{675}/R_{700}	Chlorophyll a	Braun and Payne, 2013
Ratio Analysis of Reflectance Spectrum (Chlb)	RARSb	$R_{675}/(R_{650} * R_{700})$	Chlorophyll b	Braun and Payne, 2013
Ratio Analysis of Reflectance Spectrum (Carotenoids)	RARSc	R_{760}/R_{500}	Carotenoids	Braun and Payne, 2013
Pigment-Specific Simple Ratio	PSSRa	R_{800}/R_{675}	Chlorophyll a	Braun and Payne, 2013
Normalized Phaeophytization Index	NPQI	$(R_{415} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Chlorophyll degradation	Braun and Payne, 2013
Modified Spectral Ratio	MSR	$(R_{750} - R_{445}) / (R_{705} - R_{445})$	Chlorophyll concentration	Braun and Payne, 2013
Pigment Simple Ratio	PSR	R_{430}/R_{680}	Carotenoid-Chlorophyll ratio	Braun and Payne, 2013
Normalized Difference of Pigment Ratio	NDPI	$(R_{680} - R_{430}) / (R_{680} + R_{430})$	Carotenoid-Chlorophyll ratio	Braun and Payne, 2013
Structural Independent Pigment Index	SIPI	$(R_{800} - R_{435}) / (R_{415} + R_{435})$	Carotenoid-Chlorophyll ratio	Braun and Payne, 2013
Chlorophyll Index	CL1	$(R_{700}^{-1} - R_{800}^{-1}) * R_{800}$	Chlorophyll	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
	CL2	$(R_{640}^{-1} - R_{800}^{-1}) * R_{800}$	Chlorophyll	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
Anthocyanin Reflectance Index	ARI	$(R_{550}^{-1} - R_{700}^{-1}) * R_{800}$	Anthocyanin	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
Plant Senescence Reflectance Index	PSRI ₄₈₀	$PSRI480 = (R_{678} - R_{480}) * R_{1800}$	Carotenoid-Chlorophyll ratio	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
	PSRI ₅₀₀	$PSRI500 = (R_{678} - R_{500}) * R_{1800}$	Carotenoid-Chlorophyll ratio	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
Flavonoid Reflectance Index	FRI	$(R_{410}^{-1} - R_{460}^{-1}) * R_{800}$	Flavonoids	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
Carotenoid Reflectance Index	CRI ₁	$(R_{520}^{-1} - R_{700}^{-1}) * R_{800}$	Carotenoids	(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)
	CRI ₂	$(R_{520}^{-1} - R_{550}^{-1}) * R_{800}$		(Solovchenko <i>et al.</i> , 2010)

3. Results

Sunburn progress in the four crop cycles showed a high inter annual variability, with differences in the incidence values (% of damaged fruits) and the moment when the maximum occurs. Maximum values of 70% and 62% of sunburnt fruits were recorded in late December and early January for cycles 2 and 3 respectively (approximately 12 and 14 weeks after full bloom). For cycles 1 and 4, maximum values under 45% were recorded between mid-February and early March, at 19 and 22 weeks after full bloom (Fig. 2).

From the analysis of the meteorological records of the four cycles, it can be highlighted that, in cycle 2, 11 days were recorded with maximum temperatures above 35°C, starting at 68 DAFB and reaching a maximum of 38.9°C at 77 DAFB. Cycles 1 and 3 respectively recorded 1 and 0 days with maximum temperatures above 35°C. In cycle 4, 5 days had a maximum higher than 35°C with only 1 peak above 38°C (Fig. 3).

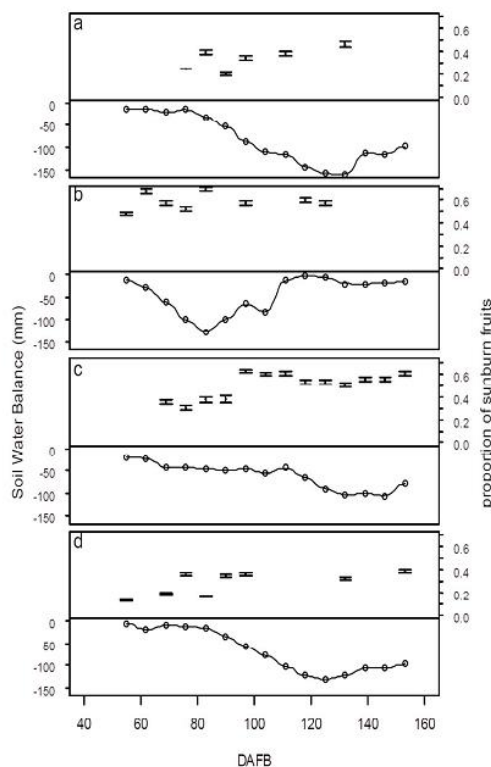


Fig. 2 - Proportion of sunburn fruits and soil water balance (SWB) by number of days after full bloom (DAFB) for four production cycles. a. cycle 1; b. cycle 2; c. cycle 3; d. cycle 4. The error bars represent standard deviation.

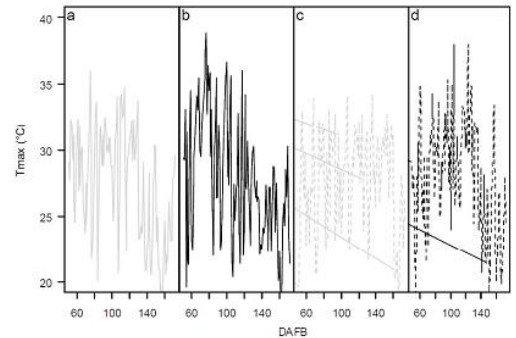


Fig. 3 - Air maximum temperature (Tmax) by days after full bloom (DAFB) for four production cycles. a. cycle 1; b. cycle 2; c. cycle 3; d. cycle 4.

Lowest values of SWB during the first 80 DAFB (about 11 weeks), in the period when damage appears, were recorded in cycles 2 and 3 showing minimum values of -123 and -46 mm respectively. On the other hand, in cycles 1 and 4, SWB decreases from week 12 (Fig. 2). Pearson's correlation coefficient between the proportion of sun-damaged fruits and the soil water balance (SWB) was -0.41, with variations between -0.37 and -0.7 depending on the cycle. The correlation with maximum temperature was 0.28, with a variation of between -0.1 and 0.51 for the different cycles (Fig. 4).

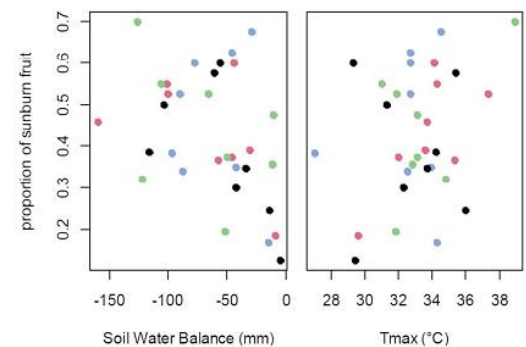


Fig. 4 - Correlations between proportion of sunburn fruits and climatic variables. a. Soil Water Balance (SWB); b. Air maximum temperature (Tmax). Colors represent each cycle: black for cycle 1, red for cycle 2, green for cycle 3.

Variables such as CHL, CAR, ANT, PRO, Ψ F and Stress Index, showed significant differences for at least one of the three kinds of fruit (HF, SBF, RF) when measured in the laboratory and/or when estimated in the field, except for Ψ FI and CHLb content measured by spectrophotometry (RARSb). ANT concentration, measured in laboratory, and MSR (field

CHL estimate), differed significantly between the three types of fruit. Ψ_{FE} was significantly different between SBF and the other two conditions (RF and HF). Remaining variables differed significantly between HF and RF or SBF, but not between RF and SBF. Higher PRO concentrations were measured in RF and SBF than HF fruits (Fig. 5, Table 2).

Pearson correlation coefficients calculated for the different variables assessed reached a maximum of -0.75 between Ψ_{FE} and PRO. CHL concentration measured in the laboratory had negative correlations of 0.42 with Ψ_{FE} and 0.57 with PRO (Fig. 6). The relationship between Ψ_{FE} and PRO, CHLa and Ψ_{FE} , NDPI and PSRI480, 860900 and CHLa, and NDPI and CHLa have the best fit with a 2nd degree polynomial regression (Fig. 7) and a maximum r^2 of 0.60.

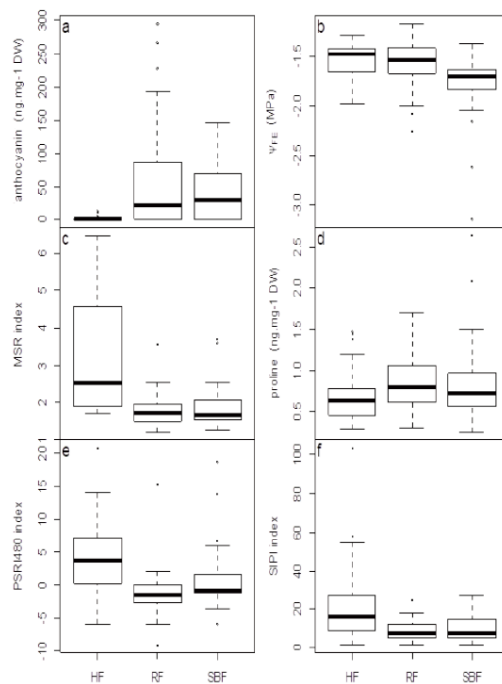


Fig. 5 - Boxplot of variables with greater discrimination capacity for the three types of fruit (HF= healthy fruit; SBF= sunburnt fruit; RF= red fruit). a) anthocyanin concentration; b) hydric potential of the exposed side of the fruit; c) MSR (modified spectral ratio, chlorophyll concentration estimate by reflectance); d) proline concentration; e) PSRI480 (Plant Senescence Reflectance Index); f. SIPI (Structural Independent Pigment Index).

Table 2 - Median of anthocyanins (ANT), Chlorophyll (CHL), Carotenoids (CAR) and proline (PRO) concentration, hydric potential of the exposed side of the fruit (Ψ_{FE}), Reflectance Ratio (CHL2), Chlorophyll concentration estimate by reflectance (MSR, Modified Spectral Ratio), Structural Independent Pigment Index (SIPI) and Plant Senescence Reflectance Index (PSRI480), for the three types of fruit (healthy fruit, sunburnt fruit, and red fruit)

	Sunburnt fruit	Red fruit	Healthy fruit
ANT (ng.mg ⁻¹ DW)	29.871 b	23.438 a	0 c
CHL (μg.mg ⁻¹ DW)	0.034 b	0.041 ab	0.045 a
CAR (μg.mg ⁻¹ DW)	0.009 b	0.011 ab	0.012 a
PRO (ng.mg ⁻¹ DW)	0.724 a	0.788 a	0.64 b
Ψ_{FE} (MPa)	-1.705 a	-1.54 b	-1.475 b
CHL2	1.808 b	1.785 b	2.658 a
MSR	1.660 a	1.716 b	2.504 c
SIPI	8.239 b	8.052 b	16.012 a
PSRI480	-0.843 b	-1.534 b	3.65 a

Different letters in rows indicate significant difference between types of fruit

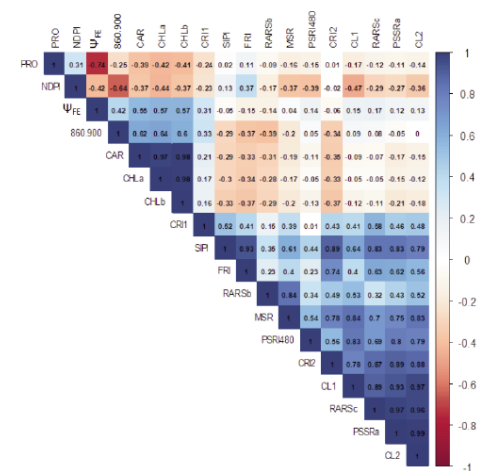


Fig. 6 - Correlations between variables with greater discrimination capacity for the different fruit conditions [Proline (PRO), Carotenoids (CAR), Chlorophylls (CHL)] measured by spectrophotometry in the laboratory, NDPI, 860-900, CRI1, SIPI, FRI, RARSb, MSR, PSRI480, CRI2, CL1, RARSa, PSSRa and CHL2, calculated based on reflectance measurements in the field.

4. Discussion and Conclusions

Sun damage incidence values reported in our trial reached a maximum of 70%. This was higher than reported by Racsco and Schrader (2012) in warmer climates of Australia, South Africa, Spain, Turkey and

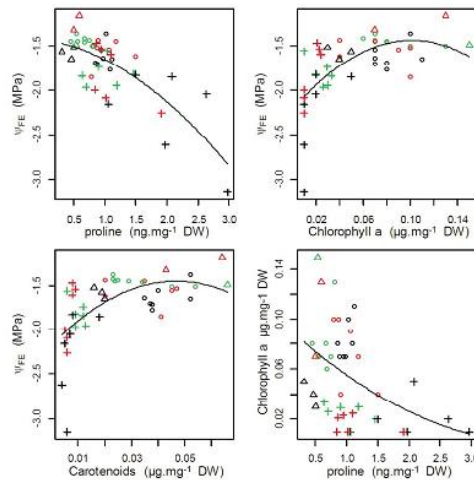


Fig. 7 - Regressions between laboratory variables. Colors represent condition of fruit: green for healthy fruit (HF), red for red fruit (RF), and black for sunburnt fruit (SBF). Symbols represent days after full bloom (DAFB): o for 91; Δ for 99; + for 154.

Chile, and higher than the 40% reported by Yuri and Bailey (2015) for Chilean crops. Similar sunburn values were reported during a heat wave in southeast Australia in 2009 (Darbyshire *et al.*, 2015). All cycles differed, both in how the damage progressed and at the time when the maximum damage occurred. These differences can be clarified by analysing the meteorological variables, which, as expected, were also highly variable (Tiscornia *et al.*, 2016). The correlation of sun damage with SWB was moderate to strong (0.37 to 0.7 depending on the cycle) and higher than that presented with maximum temperatures (Fig. 4). In cycle 2, 11 days with maximum temperatures above 35°C along with the SWB progress, could explain the occurrence of sunburn. However, in cycle 3, only the early decrease in SWB seems to be the explanatory variable of a high damage incidence (Figs. 2 and 3).

In four cycles studied, sunburn reached maximum values at 19, 12, 14 and 22 weeks after full bloom (Fig. 2). In all cases, minimum fruit diameter reported as necessary to absorb enough solar radiation to increase the temperature and result in damage (45 mm 7 weeks) (Racsko and Schrader, 2012) had reached. Fruit surface temperatures between 46 and 49°C, depending on the cultivar, cause browning, while temperatures over 52°C cause necrosis

(Schrader *et al.*, 2001). This is in accordance with fruit temperatures recorded by Darbyshire *et al.* (2015) for Australia, as well as other reports suggesting that the temperature of the exposed side of the fruit may be 12 to 15°C higher than air temperature (Woolf and Ferguson, 2000). Fruit temperatures over 52°C were recorded in our trials with thermal camera. On days with average air temperatures above 38°C (in cycle 2) were reached fruit temperatures up to 62°C (data not shown).

Variations in ΨF and pigment concentration (laboratory measurements or estimates with reflectance in the field), measured in three types of fruit (HF, RF, SBF) (Fig. 5), have been reported in previous works by Solovchenko *et al.* (2010) and Torres *et al.* (2016 a, b). Symptoms of sun damage were associated with increase in CAR and reduction in CHL and ΨF , as reported by Felicetti and Schrader (2009), Torres *et al.* (2013, 2016 b) and Yuri *et al.* (2000). CHLb estimated by reflectance did not decrease.

ΨFE was the only discriminating variable in SBF vs HF and RF (Fig. 5), in accordance with Torres *et al.* (2013). Increase of 860-900 nm reflectance, reported as a consequence of structural differences between damaged and undamaged tissue (Torres *et al.*, 2016 a), could not be confirmed by spectroradiometry in our work. A 0.42 correlation between ΨFE and reflectance values in the 860-900 nm range were obtained (Fig. 6).

Although it has been widely reported that the content of PRO in vegetables tissues is an indicator of stress (Suzuki, 2015), correlations between PRO, CHL and ΨF (Fig. 6) in apples have not been reported. Research on apple trees under hydric stress conducted by Šircelj *et al.* (2005) does not report consistent patterns of change of individual free amino acids. These authors, however, mention the lack of agreement between those results and their own previous studies, as well as those by Chandel and Chauhan in 1991, which report significant increases in Pro foliar, Glu, Orn, Arg and total free amino acids under stress, evidencing active osmoregulation (Šircelj *et al.*, 1999). Our results showed an increase in PRO content in sunburn fruits. More studies should be carried out to evaluate the possibility of using this amino acid as an early indicator of sun damage. Total amino acid content and its variations should be analyzed to elucidate between de novo PRO synthesis and simple proteolysis (Šircelj *et al.*, 2005; Arias-Sibillotte *et al.*, 2019).

In accordance with the results of Felicetti and

Schrader (2009), the correlations found between CHL and CAR concentrations were significant and negative, whereas the correlation between the values of pigments measured in the laboratory and those estimated by reflectance reached a maximum of 0.25 (Fig. 6). Plant senescence index PSRI480 was the spectroradiometry indicator with the best capacity to discriminate between fruit types (Fig. 5). Correlation between PSRI480 and the best-performing laboratory indicators (PRO y ΨF) was 0.15 (Fig. 6). Pigment concentration expressed on the basis of surface area were lower than range cited by Solovchenko *et al.* (2010) in a 1/50 ratio, but similar to those recorded by Yuri *et al.* (2010), expressed as dry weight concentration. This difference could explain the weak correlation between the laboratory tests of pigments and field estimates in our trials.

High inter-annual variability of sunburn in apple fruit was observed in terms of magnitude and moment of occurrence. The inter-annual variability of rainfall combined with insufficient irrigation to meet crop water demand was more associated with sunburn during the period studied than the maximum temperature. Regarding non-destructive prediction, the PSRI480 senescence reflectance index was the best discriminator between undamaged and damaged fruits, however, like other recent studies, we were unable to devise a method of non-destructive prediction that could be used for commercial production. ΨF is the main variable that discriminates the degree of damage to the fruits, so it could be the consequence of the effects of high irradiance and temperature. The association between low hydric potential and PRO contents in sunburn fruits suggests the possibility of using this amino acid as an early indicator of this damage in apples; however, more information is necessary to establish a cause and effect relationship.

Acknowledgements

We would like to thank Frutisur and ANII (Agencia Nacional de Investigación e Innovación) for their contribution to the funding of this work; and Frutisur and INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) for allowing us to use their crops and facilities to carry out our research.

We also thank Marcia García, Sebastián Galiger and José Luis Álvarez for their contribution to field and laboratory work and Federico Kerber for revising

the translation.

References

- AFONSO S., RIBEIRO C., BACELAR E., FERREIRA H., OLIVEIRA I., SILVA A.P., GONÇALVES B., 2017 - *Influence of training system on physiological performance, biochemical composition and antioxidant parameters in apple tree (Malus domestica Borkh.)*. - Sci. Hortic., 225: 394-398.
- ALLEN G.R., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 2006 - *Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. - FAO Estud. Riego y Dren., 56: 297.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998 - *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. - FAO Irrig. Drain Pap., 56: 1-15.
- ARIAS-SIBILLOTTE M., BORGES A., DÍAZ P., FERENCZI A., SEVERINO V., 2019 - *Leaf proline content and its relation to fruit load and flowering in citrus under field conditions*. - Rev. Bras. Frutic. Jaboticabal., 41:e-087.
- BALLESTER C., ZARCO-TEJADA P.J., NICOLÁS E., ALARCÓN J.J., FERERES E., INTRIGLIOLO D.S., GONZALEZ-DUGOET V., 2017 - *Evaluating the performance of xanthophyll, chlorophyll and structure-sensitive spectral indices to detect water stress in five fruit tree species*. - Prec. Agric., pp. 1-16.
- BERNARDI R.E., HOLMGREN M., ARIM M., SCHEFFER M., 2016 - *Why are forests so scarce in subtropical South America? The shaping roles of climate, fire and livestock*. - For. Ecol. Manage., 363: 212-217.
- BRAUN H-J., PAYNE T., 2013 - *Fitomejoramiento en megambientes*, pp. 6-17. - In: REYNOLDS M., A. PASK, D. MULLAN, and P. CHÁVEZ (eds.) *Fitomejoramiento Fisiológico I: Enfoques Interdisciplinarios para Mejorar la Adaptación del Cultivo*. CIMMYT, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y el Trigo, México, pp. 174.
- CHANDEL J.S., CHAUHAN J.S., 1991 - *Accumulation of proline, ABA and carbohydrate contents in starking delicious apple on clonal rootstocks and their correlation with drought resistance*. - Prog. Hortic., 23: 5-11.
- CHAREST C., PHAN C.T., 1990 - *Cold acclimation of wheat (Triticum aestivum): Properties of enzymes involved in proline metabolism*. - Physiol. Plant., 80: 159-168.
- CHEN T.H.H., MURATA N., 2002 - *Enhancement of tolerance of abiotic stress by metabolic engineering of betaines and other compatible solutes*. - Curr. Opin. Plant Biol., 5: 250-257.
- DARBYSHIRE R., MCCLYMONT L., GOODWIN I., 2015 - *Sun damage risk of Royal Gala apple in fruit-growing districts in Australia*. - New Zealand J. Crop. Hortic. Sci., 43: 222-232.
- FAO-MGAP, 2013 - *Clima de cambios. Nuevos desafíos de adaptación en Uruguay*. - FAO, <http://www.fao.org/>

- americas/publicaciones-audio-video/clima-de-cambios/en.
- FELICETTI D.A., SCHRADER L.E., 2008 - *Photooxidative sunburn of apples. Characterization of a third type of apple sunburn*. - Int. J. Fruit Sci., 8: 160-172.
- FELICETTI D.A., SCHRADER L.E., 2009 - *Changes in pigment concentrations associated with sunburn browning of five apple cultivars. I. Chlorophylls and carotenoids*. - Plant Sci., 176(1): 78-83.
- HERNANDEZ O., TORRES C.A., MOYA-LEÓN M.A., OPAZO M.C., RAZMILIC I., 2014 - *Roles of the ascorbate-glutathione cycle, pigments and phenolics in postharvest 'Granny Smith' apples (Malus domestica Borkh.)*. - Postharvest Biol. Technol., 87: 79-87.
- KAUTZ B., NOGA G., HUNSCHE M., 2015 - *PEG and drought cause distinct changes in biochemical, physiological and morphological parameters of apple seedlings*. - Acta Physiol. Plant., 37: 1-6.
- MERZLYAK M.N., GITELSON A.A., CHIVKUNOVA O.B., SOLOVCHENKO A.E., POGOSYAN S.I., 2003 - *Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments*. - Russian J. Plant Physiol., 50: 785-792.
- MORALES-QUINTANA L., WAITE J.M., KALCSITS L., TORRES C.A., RAMOS P., 2020 - *Sun injury on apple fruit: Physiological, biochemical and molecular advances, and future challenges*. - Sci. Hortic., 260: 1-8.
- MULLAN D., 2013 - *Radiometría espectral*, pp. 69-80. - In: REYNOLDS M., A. PASK, D. MULLAN, and P. CHÁVEZ (Eds.) *Fitomejoramiento fisiológico I. Enfoces interdisciplinarios para mejorar la adaptación del cultivo*. CIMMYT. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo, México, pp. 174.
- MUPAMBI G., SCHMEISSER M., DZIKITI S., REYNOLDS S., STEYN W.J., 2018 - *Ineffectiveness of foliar S-ABA application as an apple sunburn suppressant explained through effects on peel biochemistry and leaf ecophysiology*. - Sci. Hortic., 232: 256-263.
- NEMESKÉRI E., KOVÁCS-NAGY E., NYÉKI J., SÁRDI É., 2015 - *Responses of apple tree cultivars to drought: Carbohydrate composition in the leaves*. - Turkish J. Agric. For., 39: 949-957.
- RACSKO J., SCHRADER L.E., 2012 - *Sunburn of apple fruit: Historical background, recent advances and future perspectives*. - CRC Crit. Rev. Plant Sci., 31: 455-504.
- REIG G., DONAHUE D.J., JENTSCH P., 2019 - *The efficacy of four sunburn mitigation strategies and their effects on yield, fruit quality, and economic performance of Honeycrisp cv. Apples under Eastern New York (USA) Climatic Conditions*. - Int. J. Fruit Sci., pp. 1-21.
- RENOM M., RUSTICUCCI M., BARREIRO M., 2011 - *Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation*. - Clim. Dyn., 37: 2471-2480.
- ROBERTS M.F., 2005 - *Organic compatible solutes of halotolerant and halophilic microorganisms*. - Saline Systems, pp. 1-5.
- SCHRADER L.E., ZHANG J., DUPLAGA W.K., 2001 - *Two types of sunburn in apple caused by high fruit surface (peel) temperature*. - Plant Health Progress, 2(1): 3.
- ŠIRCELJ H., BATIČ F., ŠTAMPAR F., 1999 - *Effects of drought stress on pigment, ascorbic acid and free amino acids content in leaves of two apple tree cultivars*. - Phytol. Ann. Rei Bot., 39: 97-100.
- ŠIRCELJ H., TAUSZ M., GRILL D., BATIČ F., 2005 - *Biochemical responses in leaves of two apple tree cultivars subjected to progressing drought*. - J. Plant Physiol., 162: 1308-1318.
- SOLOVCHENKO A.E., CHIVKUNOVA O.B., GITELSON A.A., MERZLYAK M.N., 2010 - *Non-destructive estimation pigment content, ripening, quality and damage in apple fruit with spectral reflectance in the visible range*. - Fresh Prod., 4: 91-102.
- SUZUKI Y., 2015 - *Polyol metabolism and stress tolerance in horticultural plants*, pp. 59-73. - In: KANAYAMA Y., and A. KOCHETOV (eds.) *Abiotic stress biology in horticultural plants*. Springer, Tokyo, Japan, pp. 220.
- TISCORNIA G., CAL A., GIMÉNEZ A., 2016 - *Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay*. - RIA Rev. Investig. Agropecu., 42: 66-71.
- TORRES C.A., LEÓN L., SÁNCHEZ-CONTRERAS J., 2016 a - *Spectral fingerprints during sun injury development on the tree in Granny Smith apples: A potential non-destructive prediction tool during the growing season*. - Sci. Hortic., 209: 165-172.
- TORRES C.A., SEPULVEDA A., GONZALEZ-TALICE J., YURI J.A., RAZMILIC I., 2013 - *Fruit water relations and osmoregulation on apples (Malus domestica Borkh.) with different sun exposures and sun-injury levels on the tree*. - Sci. Hortic., pp. 161: 143-152.
- TORRES C.A., SEPULVEDA A., LEON L., YURI J.A., 2016 b - *Early detection of sun injury on apples (Malus domestica Borkh.) through the use of crop water stress index and chlorophyll fluorescence*. - Sci. Hortic., 211: 336-342.
- TROLL W., LINDSLEY J., 1955 - *A photometric method for the determination of proline*. - J. Biol. Chem., 215: 655-660.
- WELLBURN A.R., 1994 - *The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution*. - J. Plant Physiol., 144: 307-313.
- WEN X., MORIGUCHI T., 2015 - *Role of polyamines in stress response in horticultural crops*, pp. 35-45. - KANAYAMA Y., and A. KOCHETOV (eds.) *Abiotic stress biology in horticultural plants*. Springer, Tokyo, Japan, pp. 220.
- WOOLF A.B., FERGUSON I.B., 2000 - *Postharvest responses to high fruit temperatures in the field*. - Postharvest Biol. Technol., 21: 7-20.
- YURI J.A., BAILEY B., 2015 - *Sunburn in apples: A hot problem*. - Good Fruit Grower, pp. 1: 26-27.
- YURI J.A., NEIRA A., QUILDRAN A., RAZMILIC I., MOTO-

Adv. Hort. Sci., 2020 34(4): 431-440

MURA Y., TORRES C., PALOMO I., 2010 - *Sunburn on apples is associated with increases in phenolic compounds and antioxidant activity as a function of the cultivar and areas of the fruit.* - J. Food. Agric. Environ., 8:

920-925.

YURI J.A., TORRES C., BASTÍAS R., NEIRA A., 2000 - *Golpe de Sol En Manzanas. II. Factores inductores y respuestas bioquímicas.* - Agro-Ciencia, 16: 23-32.

3. RELACIÓN DEL POTENCIAL HÍDRICO XILEMÁTICO Y DE FRUTO CON LA EVOLUCIÓN DEL DAÑO POR SOL EN MANZANAS

3.1. INTRODUCCIÓN

La pérdida de calidad debido a desórdenes fisiológicos en la producción de manzana en Uruguay no está debidamente cuantificada. La alta variabilidad en los factores climáticos predisponentes y la estructura productiva y comercial generan dificultades para la sistematización de la información. Según un análisis de las pérdidas y sus causas en cadenas de suministro de manzanas realizado por FAO (2021), los desórdenes fisiológicos junto a los golpes son considerados como los defectos más comunes de descarte de fruta en las líneas de empaque. En Granny Smith la ocurrencia de desórdenes fisiológicos en campo y luego del almacenamiento refrigerado ha alcanzado valores superiores al 50 % (Severino et al., 2020). Estos daños (desórdenes fisiológicos) visibles durante la maduración y el almacenamiento de la fruta dependen de una serie de factores previos a la cosecha. Entre los factores citados se encuentran las temperaturas a la que son sometidos, la radiación directa y aspectos nutricionales y de balance hídrico del fruto, entre otros, y son determinados por las condiciones climáticas y la ubicación del fruto en el árbol (Ferguson et al., 1999)

La zona de producción en la que ha sido desarrollado el presente estudio se encuentra entre los paralelos 34 y 35 de latitud sur en una región de extensos pastizales de la ecorregión de la sabana uruguaya, también conocida como campos. Es un ecotono regional entre los bosques subtropicales y tropicales y los pastizales templados de Sudamérica, clasificado actualmente como templado cálido o neotropical (Bernardi et al., 2016). Es un área

caracterizada por presentar una radiación solar diaria promedio de 577 cal/cm², temperaturas medias promedio de 22 °C, máxima promedio de 29 °C y máximas de 39 °C, para los meses de diciembre y enero en el período 1972-2001 (INIA, 2021).

En condiciones de clima neotropical, los daños de quemado de sol se presentan en algunas temporadas como uno de los principales defectos de calidad de la manzana previo a la cosecha (Severino et al., 2020) y el estudio de las medidas de manejo para su mitigación es reciente (Severino et al., 2021). La variabilidad climática de la región (Tiscornia et al., 2016) y la vinculación de los daños con los factores del clima, determinan una gran variabilidad anual de los daños, tanto en magnitud como en el momento en el que se desarrollan (Severino et al., 2020).

Los desórdenes fisiológicos en manzanas y especialmente el quemado de sol han sido relacionados históricamente con altos valores de radiación y temperatura (Racsko y Schrader, 2012) y más recientemente con el estado hídrico de los tejidos del fruto y del árbol (Makeredza et al., 2013; Torres et al., 2016; Severino et al., 2020). El efecto de los factores en forma individual y las interrelaciones existentes entre ellos determinan un alto grado de complejidad en las condiciones que desencadenan los desórdenes fisiológicos. También ha sido citado que el efecto de los factores del clima que determinan la aparición de quemado de sol depende del tamaño del fruto. Racsko y Schrader (2012) reportan el inicio de los daños cuando los frutos alcanzan 45 mm de diámetro (7 u 8 semanas después de plena floración) y estudios locales establecen el inicio de los daños a las 6 semanas después de plena flor (Severino et al., 2020).

Entre las medidas de manejo utilizadas con el fin de mitigar los daños causados por estos desórdenes se encuentran distintas modificaciones de los factores climáticos predisponentes. Sistemas de riego para la reducción del estrés hídrico, colocación de mallas de sombreamiento y aplicación de protectores solares son de las técnicas más habituales. Las modificaciones del microclima del cultivo realizado con la colocación de mallas, ya sea en la reducción de la exposición de los frutos a altas temperaturas o a la radiación directa del sol, depende del tipo de material, color y porcentaje de trama, (Mupambi et al., 2018a). Los mecanismos involucrados no están completamente descritos y los resultados son muy variables dependiendo del clima de la localidad, del cultivar y su manejo (Mupambi et al., 2018a; Manja y Aoun, 2019). Como consecuencia de las modificaciones del microclima provocadas por el uso de mallas, ha sido citado también un efecto sobre la evaporación potencial (McCaskill et al., 2016, Reig et al., 2019) y, por tanto, en el estatus hídrico de plantas y frutos (López et al., 2018). Este efecto es mencionado en un importante número de trabajos, aunque son pocos los estudios que relacionan la modificación del estatus hídrico y sus efectos sobre el desarrollo de daño por sol. El potencial hídrico de xilema al mediodía es considerado un buen indicador de estrés hídrico (Naor, 2000) y se ha evaluado en trabajos de respuesta a mallas. Específicamente en el cultivo de manzana, recientes trabajos establecen la importancia del estado hídrico del cultivo sobre la calidad de la fruta y estudian distintos regímenes de manejo hídrico y tipos de mallas (Boini et al., 2021). Boini et al. (2021), en concordancia con Severino et al. (2020), concluyen que la calidad de fruta fue más sensible al estatus hídrico que a la radiación.

La vinculación de los desórdenes fisiológicos ha sido establecida tanto con el estatus hídrico de la planta (Boii et al., 2021) como del fruto, constatándose variaciones en el potencial hídrico de este en relación al nivel de exposición de los tejidos (Torres et al 2016, Severino et al., 2020). En los tejidos de frutos que presentan daños por sol ha sido citada también la acumulación de sustancias con capacidad antioxidante como fenoles y flavonoides (D'Abrosca et al, 2007) y la acumulación de solutos compatibles como prolina y azúcares solubles que juegan un rol central en el ajuste osmótico previniendo la reducción de la turgencia (Kanayama y Kochetov 2015, Severino et al, 2020).

Considerando los estudios previos que vinculan el daño por sol y el estatus hídrico y el hecho de que los estudios del efecto del cambio climático sobre la producción de frutas y verduras indican que un aumento de la temperatura, unido al estrés hídrico, provocará una reducción de la calidad en términos de vitaminas, antioxidantes y minerales (Shivashankara 2013), el presente estudio tiene como objetivo evaluar la relación del daño por sol con la condición hídrica de tejidos de fruta en Brasil Gala, Granny Smith y Cripps Pink así como el efecto de los tratamientos tendientes a reducir el daño por sol sobre el potencial hídrico xilemático en Granny Smith.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS.

El presente ensayo fue realizado en la temporada 2015/2016 en una plantación comercial de Brasil Gala, Granny Smith y Cripps Pink ubicada en San José, Uruguay (34°38'18" S; 56°40'06" W, 28 m.s.n.m). Para los tres cultivares fue evaluado el potencial hídrico del tejido del fruto durante el período de su crecimiento en las siguientes condiciones: (1) fruto expuesto verde, (2) fruto

expuesto y con coloración roja (en adelante fruto rojo), (3) fruto expuesto y con daño incipiente de sol, definido como bronceado según Racsko y Schrader (2012) y (4) fruto interno verde. Se define fruto expuesto a los frutos que se encuentran en la periferia de la canopia y reciben radiación directa, mientras que los frutos internos se ubican en zonas internas del árbol y no reciben radiación directa. En cada fruto fue definida la cara externa como la zona del fruto dirigida hacia la zona externa del árbol (con exposición a la radiación incidente en el caso de los frutos expuestos y sin exposición a la radiación incidente en los frutos internos) y la cara interna como la zona del fruto dirigida hacia la zona interna del árbol y que no recibe radiación directa en ninguno de los dos tipos de fruto. Para cada condición se muestrearon 5 frutos para la determinación de potencial hídrico del tejido Ψ_F con potenciómetro de punto de rocío Wp4c (Decagon Devices, USA). Los muestreos se realizaron a intervalos de aproximadamente 15 días desde los 68 días después de plena floración (DDPF) y hasta cosecha de cada cultivar. Las fechas de muestreo 68, 82, 96 y 111 DDPF fueron realizadas en los tres cultivares. Las fechas 141 y 153 DDPF fueron realizadas en Granny Smith y Cripps Pink mientras que en Cripps Pink fue realizada una última fecha de evaluación a los 168 DDPF.

De cada fruto fueron extraídos 3 cm² de epidermis con tejido subepidérmico de 1 mm de espesor de las caras externa e interna para la determinación del potencial hídrico (Ψ_{FE} y Ψ_{FI} respectivamente).

En la evaluación de Granny Smith previa a la cosecha (150 DDPF) se midió el potencial hídrico de xilema a plantas con distintos manejos para la reducción del daño por sol. El ensayo de reducción de daños sobre el que se realizaron las mediciones contó con tratamientos de mallas y aplicación de protectores solares en un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones. Las

mallas utilizadas fueron en todos los casos mallas monofilamento con las siguientes características: malla blanca traslúcida 20 % (MB) y malla negra 50 % (MN50). El protector solar (PRO) fue caolina (Surround WP®, 50 K/ha), aplicado en 5 ocasiones durante la temporada para mantener los frutos cubiertos. Todos los tratamientos se instalaron a las 7 semanas después de plena floración, a mediados del mes de diciembre y se mantuvieron hasta la cosecha. Las aplicaciones de protector fueron reiterados cada vez que fue necesario, en función de las precipitaciones (luego de la acumulación de 10 mm) y/o el nivel de cubrimiento de los frutos. Se contó además con un tratamiento control (CON). En dos hojas sanas por repetición fueron realizadas mediciones de potencial hídrico de tallo de mediodía. Las mediciones fueron realizadas en el horario de mayor demanda hídrica (13 a 15 h), en hojas ubicadas en el tercio medio del árbol, totalizando 6 hojas por tratamiento. Las hojas fueron cubiertas con papel aluminio y envueltas en bolsa de polietileno con cierre tipo ziploc entre 1 y 1,5 h antes de la medición en cámara de presión (PMS Instrument Corp®, Corvallis, OR, USA).

Análisis estadístico.

Los análisis fueron realizados en R versión 4.1.0 (2021). Las pruebas de normalidad (Shapiro.test) realizadas a ambas variables de respuesta, potencial hídrico de tallo y de fruto, no fueron superadas en función de lo cual los datos fueron analizados mediante el procedimiento Kruskal.test. Para la representación gráfica de la evolución del potencial hídrico de fruto, se utilizó el procedimiento geom_smooth de ggplot, con un IC = 95 %.

3.3. RESULTADOS

En los tres cultivares evaluados, Brasil Gala, Granny Smith y Cripps Pink, el potencial hídrico de fruto disminuyó durante el ciclo de crecimiento. Los cultivares de ciclo de crecimiento más largo alcanzaron los menores valores. Cripps Pink mantuvo el potencial hídrico a partir de los 111 DDPF y Granny Smith presentó una leve alza en la última evaluación (Tabla 1).

Tabla 1. Evolución del potencial hídrico de fruto (MPa) por cultivar.

DDPF	Brasil Gala	Cripps Pink	Granny Smith
68	-1,435 a	-1,480 a	-1,330 a
82	sd	-1,605 b	-1,530 b
96	-1,670 b	-1,795 c	-1,475 b
111	-1,845 c	-1,870 d	-1,725 c
141	---	-1,960 d	-2,095 d
153	---	sd	-1,810 c
168	---	-1,910 d	---

Letras diferentes dentro de cada cultivar indican diferencias ($\alpha=0,05$).

El potencial hídrico evaluado en forma conjunta para los tres cultivares y los cuatro tipos de fruto (verde externo, rojo, quemado y verde interno) fue menor en la cara externa en las mediciones entre los 98 y 153 DDPF. En el análisis de cada una de las condiciones (fruto y cultivar) puede observarse que, frutos verdes (externos e internos) no presentaron diferencias de potencial hídrico entre ambas caras para ningún cultivar y en ninguna de las fechas de evaluación. Para Cripps Pink las diferencias entre las caras se presentaron en los frutos quemados en la evaluación de mitad y en la de fin de ciclo, con una media de la diferencia de 0,5 MPa, mientras que los frutos rojos no presentaron

diferencia entre las caras. Granny Smith mostró un potencial hídrico menor en la cara externa en las dos últimas fechas en frutos quemados y rojos, siendo el promedio de las diferencias entre caras de 0,45 MPa y 0,27 MPa, respectivamente. Brasil Gala no presentó diferencias entre caras en ninguna condición (Figura 1).

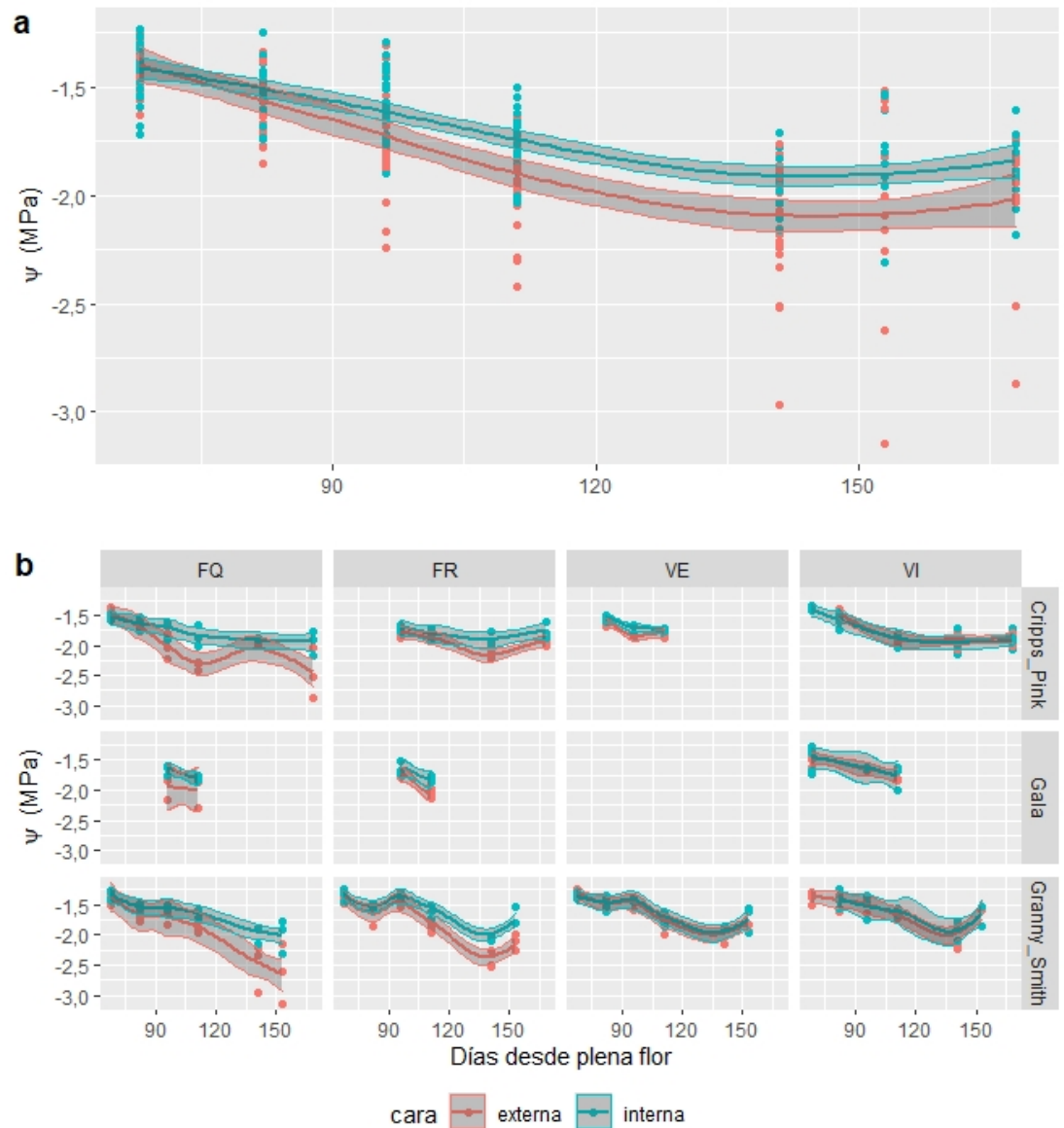


Figura 1. Evolución de potencial hídrico de fruto en las caras externa e interna a) Valores promedio de Brasil Gala, Cripps Pink y Granny Smith. b) Valores por cultivar (Brasil Gala, Granny Smith y Cripps Pink) y tipo de fruto (fruto quemado (FQ), fruto rojo (FR), fruto sano, verde externo (VE) y verde interno (VI)). Las líneas y los intervalos de confianza de 0,95 (indicados de color gris) se calcularon según la función geom-smooth (método loess en R).

El potencial hídrico de xilema evaluado en los distintos manejos realizados sobre Granny Smith mostró diferencias entre los tratamientos (Figura 2). Los valores más negativos son presentados por malla blanca 20 % (MB) (0,825 MPa), alcanzando diferencias significativas con aplicación de protector solar (PRO) y la malla negra 50 % (MN50), pero no con el control (CON). El tratamiento de malla negra 50 % (MN50) fue el que presentó los valores más cercanos a cero que difieren del tratamiento control y de los otros dos tratamientos (-0,54 MPa) (Figura 2).

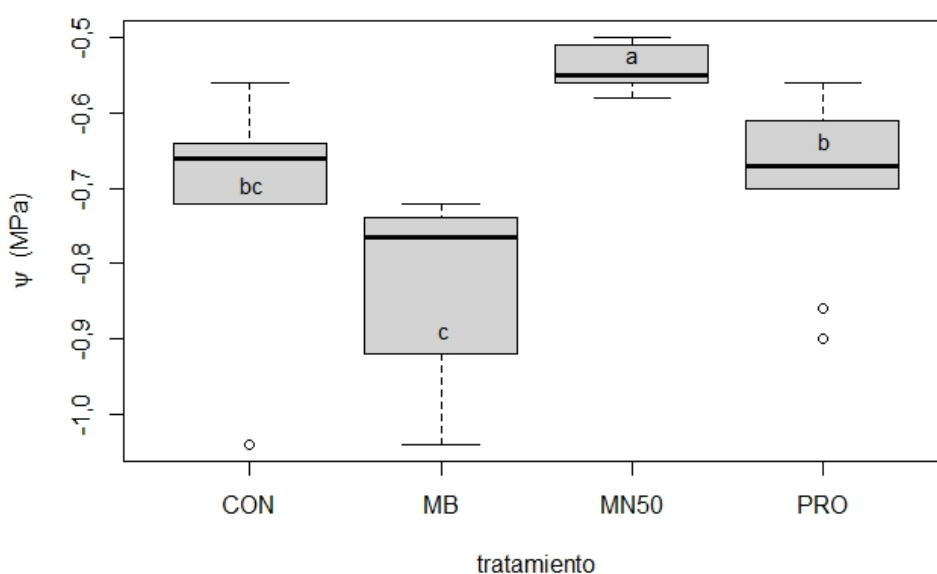


Figura 2. Potencial hídrico xilemático según tratamiento de campo en Granny Smith. (CON: control, MB: malla blanca translúcida 20 %, MN50: malla negra 50 %, PRO: protector solar).

3.4. DISCUSIÓN

El potencial hídrico de los tejidos del fruto varió en función del cultivar, del nivel de daño y de la exposición en concordancia con trabajos previos. El

potencial decreció con el desarrollo del fruto y fue significativamente más negativo en tejidos dañados por el sol que en aquellos sanos no expuestos, de forma similar a lo presentado por Torres et al., (2013). También en coincidencia con dichos autores, no se constataron diferencias en los valores de potencial hídrico de los tejidos externos e internos en etapas tempranas del desarrollo del fruto. Este período fue de 80 días para el citado trabajo y de 96 días en nuestras condiciones. Los aspectos que podrían estar determinando el momento en el que comienzan las diferencias de potencial entre caras expuestas y no expuestas son varios. Por una parte, la superficie expuesta en frutos pequeños no es suficiente para absorber la radiación solar (Racsko y Schrader, 2012); por otra parte, las condiciones predisponentes, temperatura de aire y déficit de vapor del aire, empeoran conforme avanza la temporada (Torres et al., 2013). Ambos aspectos se presentaron en el presente ensayo durante los primeros 96 días desde plena floración.

Resultados previos indican que los tejidos expuestos al sol, a través de potenciales hídricos más negativos, activan una cascada de respuesta al estrés abiótico, tal vez mediada por los azúcares y el etileno, para hacer frente al estrés ambiental causado por la alta irradiación y el calor, cuyas consecuencias son rasgos peculiares de la calidad del fruto como cambios en la forma, incrementos en la dureza y aumento del contenido de sorbitol (Torres et al., 2013). Las diferencias de potencial entre tejidos sanos y dañados concuerdan con lo reportado, presentando valores cercanos a 0,5 MPa.

La evaluación del potencial hídrico de tallo al mediodía en los distintos tratamientos presentó un rango de variación cercano a 0,5 MPa, con valores entre -0,5 y -1 MPa (Figura 2). La variación de 0,5 MPa es similar a la presentada por los valores de potencial hídrico de los tejidos del fruto y son menores a los

reportados por otros autores. Boini et al., (2021) consideran que -1 MPa no representa limitantes y establecen un rango de entre -1,5 a -2 MPa para los daños. De forma similar, un estudio del efecto del potencial hídrico del tallo relacionado al quemado de sol en Cripps pink indica que con valores de potencial hídrico de entre -1,6, -2,0 y -2,5 MPa fue posible detectar diferencias en la temperatura superficial del fruto, el porcentaje y la severidad del daño de quemado de sol (Makredza et al., 2013). Sin embargo, en nuestras condiciones los valores estuvieron siempre entre -0,5 (en las condiciones bajo malla sin estrés) y -1 MPa (en las condiciones de mayor estrés).

Las mallas antigranizo han presentado efectos favorables en el balance hídrico y el contenido de pigmentos de hojas, a través de la modificación de las condiciones microclimáticas, reduciendo parcialmente los efectos causados por el excesivo calor y la sequía de la temporada estival (Szabó et al, 2021). Según Mupambi et al., (2018a), el impacto de la presencia de malla sombra en comparación con la ausencia de ella es mucho mayor que las diferencias relativamente pequeñas entre los materiales. Sin embargo, evaluaciones de temperatura en situaciones de cultivo bajo malla mostraron diferencias entre mallas blancas y negras. Varios autores han demostrado el aumento de temperatura del aire bajo MB y la reducción en tratamientos con mallas negras (Tanny et al., 2009; Hunsche et al., 2010; Mupambi et al., 2018b, c; Severino et al., 2021; Szabó et al., 2021). Aunque el citado aumento de la temperatura del aire no siempre se expresa en mayor temperatura de la superficie de fruto, los aumentos en la temperatura del aire y la menor reducción de radiación en el infrarrojo cercano (datos no mostrados) concuerdan con la peor condición hídrica del cultivo bajo malla blanca. El incremento de radiación infrarroja (>740 nm) es de gran aporte calórico (Yuri 2010) y podría estar relacionado a

los aumentos de temperatura del aire registrados en este tratamiento. Las mallas negras, por su parte, reducen la temperatura del aire (Tanny et al., 2009; Hunsche et al., 2010; Mupambi et al., 2018b, Severino et al., 2021; Szabó et al., 2021) y la temperatura de la superficie del fruto (Gindaba y Wand, 2005; Severino et al., 2021), lo que apoya los resultados de mejora de la condición hídrica del cultivo aquí detectados.

3.5. CONCLUSIONES

El potencial hídrico del fruto varió con la condición del tejido. De forma general, para todos los cultivares, tipo de fruto y exposición, fueron constatadas disminuciones a lo largo del ciclo de crecimiento.

Las caras expuestas de los frutos presentaron valores menores de potencial hídrico de fruto que las caras no expuestas, y la diferencia entre caras no fue constatada en el caso de los frutos ubicados en el interior del árbol y que no recibieron radiación directa.

El efecto de los tratamientos para el quemado de sol sobre el potencial hídrico del cultivo solo pudo constatararse en el caso de la malla negra 50 %.

3.6. BIBLIOGRAFÍA

Bernardi RE, Holmgren M, Arim M, Scheffer M. 2016. Why are forests so scarce in subtropical South America? The shaping roles of climate, fire and livestock. *Forest Ecology and Management*. 363:212–217. doi: 10.1016/j.foreco.2015.12.032

Boini A, Manfrini L, Morandi B, Corelli Grappadelli L, Predieri S, Daniele G.M., López G. 2021. High Levels of Shading as a Sustainable Application for Mitigating Drought, in *Modern Apple Production*. *Agronomy* 11, 422.

<https://doi.org/10.3390/agronomy11030422>

- D'Abrosca B, Pacifico S, Cefarelli G, Mastellone C, Fiorentino A. 2007. 'Limoncella' Apple, an Italian Apple Cultivar: Phenolic and Flavonoid Contents and Antioxidant Activity. *Food Chemistry*. 104, no. 4:1333–37. doi:10.1016/j.foodchem.2007.01.073.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2021. Identificación de acciones y hoja de ruta para la reducción de pérdidas y desperdicios de alimentos en Uruguay 2020/2030. Equipo de trabajo Phd. Patricia Lema, Dr. Sofía Barrios, Ms Patricia Burzacco, Gabriel Camaño, Ec. María Noel Ackerman, Ec. Angela Cortelezzi, Ec. Natalia Barbosa, Ing. Agr. MSc. Vivian Severino.
- Ferguson I, Volz R, Woolf A. 1999. Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. *Postharvest Biology and Technology* 15:255–262. doi: 10.1016/S0925-5214(98)00089-1
- Hunsche M, Blanke MM, Noga G. 2010. Does the microclimate under hail nets influence micromorphological characteristics of apple leaves and cuticles? *Journal of Plant Physiology* 167:974–80. doi: 10.1016/j.jplph.2010.02.007
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2021. Unidad de Agro-clima y Sistemas de información (GRAS) Montevideo. s.p. Consultado 04/03/2021. 2021. Disponible en <http://www.inia.uy/gras>
- Kanayama Y, Kochetov A. 2015. *Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants*. Springer Japan. 220p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55251-2>
- López G, Boini A, Manfrini L, Torres-Ruiz J M, Pierpaoli E, Zibordi M, Losciale P, Morandi B, Corelli-Grappadelli L. 2018. Effect of shading and water stress on light interception, physiology and yield of apple trees. *Agricultural*

- Water Management 210 (January), 140–148.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.08.015>
- Makeredza B, Schmeisser M, Lötze E, Steyn W. J. 2013. Water Stress Increases Sunburn in “Cripps” Pink’ Apple. *Horticultural Science* 48(4), 444–447.
- Manja K, y Aoun M. 2019. The use of nets for tree fruit crops and their impact on the production: A review. *Scientia Horticulturae* 246 (June 2018), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.050>
- McCaskill M R, McClymont L, Goodwin I, Green S, Partington D L. 2016. How hail netting reduces apple fruit surface temperature: A microclimate and modelling study. *Agricultural and Forest Meteorology* 226–227, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.017>
- Mupambi G, Anthony B M, Layne D R, Musacchi S, Serra S, Schmidt T, Kalcsits L A. 2018a. The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple : A review. *Scientia Horticulturae* 236 (September 2017), 60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>
- Mupambi G, Musacchi S, Serra S, Kalcsits L A, Layne D R, Schmidt T. 2018b. Protective netting improves leaf-level photosynthetic light use efficiency in ‘honeycrisp’ apple under heat stress. *HortScience* 53(10), 1416–1422. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13096-18>
- Naor A. 2000. Midday Stem Water Potential As a Plant Water Stress Indicator for Irrigation Scheduling in Fruit Trees. *Methods* 537, 447–454.
- Racsko J, Schrader LE. 2012. Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. *CRC Critical Reviews in Plant Sciences* 31:455–504. doi: 10.1080/07352689.2012.696453

- Reig G, Donahue DJ, Jentsch P. 2019. The Efficacy of Four Sunburn Mitigation Strategies and Their Effects on Yield , Fruit Quality , and Economic Performance of Honeycrisp Cv . Apples under Eastern New York (USA) Climatic Conditions. *International Journal of Fruit Science* 0:1–21. doi: 10.1080/15538362.2019.1605558
- Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, Yuri J. A, González-Talice J. 2021. Pre- and Postharvest Management of Sunburn in 'Granny Smith' Apples (*Malus × domestica* Borkh) under Neotropical Climate Conditions. *Agronomy*, 11(8), 1618. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081618>
- Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, Yuri J. A, González-Talice J. 2020. Climatic and physiological parameters related to the progress and prediction of apple sunburn damage in a neotropical climate. *Advances in Horticultural Science* 34:431–440. doi: 10.13128/ahsc
- Szabó A, Tamás J, Nagy A. 2021 The influence of hail net on the water balance and leaf pigment content of apple orchards. *Scientia Horticulturae* 283:. doi: 10.1016/j.scienta.2021.110112
- Tanny J, Cohen S, Grava A, Naor A, Lukyanov V. 2009. The effect of shading screens on microclimate of apple orchards. *Acta Horticulturae* 807:103–108. doi: 10.17660/ActaHortic.2009.807.11
- Tiscornia G, Cal A, Giménez A. 2016. Análisis y caracterización de la variabilidad climática en algunas regiones de Uruguay. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 42(1), 66–71.
- Torres CA, Sepúlveda A, Leon L, Yuri JA. 2016. Early detection of sun injury on apples (*Malus domestica* Borkh.) through the use of crop water stress index and chlorophyll fluorescence. *Scientia Horticulturae* 211:336–342.

doi: 10.1016/j.scienta.2016.09.022

Torres CA, Sepúlveda A, González-Talice J, Yuri JA, Razmilic I. 2013. Fruit water relations and osmoregulation on apples (*Malus domestica* Borkh.) with different sun exposures and sun-injury levels on the tree. *Scientia Horticulturae* 161:143–152. doi: 10.1016/j.scienta.2013.06.035

**4. MANEJO PRE Y POSCOSECHA DEL DAÑO DE SOL EN MANZANAS
GRANNY SMITH (MALUS × DOMESTICA BORKH) BAJO CONDICIONES
DE CLIMA NEOTROPICAL**

**PRE- AND POSTHARVEST MANAGEMENT OF SUNBURN IN
'GRANNY SMITH' APPLES (MALUS × DOMESTICA BORKH) UNDER
NEOTROPICAL CLIMATE CONDITIONS**

Vivian Severino¹, Mercedes Arias¹, Santiago Dogliotti¹, Erna Frins², José A. Yuri³, Jaime González-Talice¹.

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República (Udelar), Garzón 780 CP 12900, Montevideo, Uruguay, vseverin@fagro.edu.uy (autor para correspondencia), marias@fagro.edu.uy, sandog@fagro.edu.uy, jaimetalice@gmail.com;

²Facultad de Ingeniería, Udelar, Julio Herrera y Reissig 565, CP 11.300, Montevideo, Uruguay, efrins@fing.edu.uy;

³ Centro de Pomáceas, Universidad de Talca, 1 Poniente 1141, Talca, Chile; ayuri@utalca.cl

Resumen

El daño de sol en manzanas se atribuye a la ocurrencia de altas temperaturas, la radiación incidente y los parámetros hídricos del fruto y de la planta, todo ello dependiente de las condiciones climáticas y del manejo. El desarrollo de nuevas zonas de producción y el cambio climático aumentan el interés por estudiar el comportamiento de la fruta en diferentes condiciones.

Se evaluó el efecto de tres mallas y dos protectores químicos sobre el daño de sol en un cultivo comercial de Granny Smith en clima neotropical durante las temporadas 2012-2016. Se registró la evolución, incidencia y severidad del quemado y escaldado por el sol. También se registró la temperatura de la superficie del fruto, el tamaño del fruto, la brotación y el retorno a la floración. La radiación incidente y la temperatura del aire se consideraron para la evaluación del microclima del cultivo. La transmitancia en longitud de onda PAR y la variación de la temperatura del aire en los tratamientos de malla alcanzaron 0,4 y 9°C, respectivamente. La temperatura de la superficie del fruto en los tratamientos con malla blanca y malla negra 50 % fue siempre inferior a 46°C. En cuanto a los frutos con quemado de sol, el tratamiento con malla negra 50 % mostró la mayor proporción de frutos ligeramente quemados (94 %) y la menor proporción de daños graves, con un índice de quemado de sol igual o inferior a 2 (en una escala de 1-4) en todas las condiciones ensayadas. En un clima neotropical, las aplicaciones de protectores no redujeron la incidencia del quemado de sol, pero con el uso de mallas fue posible reducir tanto el quemado como el escaldado por sol sin afectar a los procesos de crecimiento dependientes de la asimilación neta.

Article

Pre- and Postharvest Management of Sunburn in ‘Granny Smith’ Apples (*Malus × domestica* Borkh) under Neotropical Climate Conditions

Vivian Severino ^{1,*}, Mercedes Arias-Sibillotte ¹, Santiago Dogliotti ¹, Erna Frins ², José Antonio Yuri ³ and Jaime González-Talice ¹

¹ Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR), Garzón 780, Montevideo CP 12900, Uruguay; marias@fagro.edu.uy (M.A.-S.); sandog@fagro.edu.uy (S.D.); jgonzalez@fagro.edu.uy (J.G.-T.)

² Facultad de Ingeniería, Universidad de la República (UDELAR), Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo CP 11300, Uruguay; efrins@fing.edu.uy

³ Centro de Pomáceas, Universidad de Talca, 1 Poniente 1141, Talca CP 3460000, Chile; ayuri@utalca.cl

* Correspondence: vseverin@fagro.edu.uy; Tel.: +598-99168635



Citation: Severino, V.; Arias-Sibillotte, M.; Dogliotti, S.; Frins, E.; Yuri, J.A.; González-Talice, J. Pre- and Postharvest Management of Sunburn in ‘Granny Smith’ Apples (*Malus × domestica* Borkh) under Neotropical Climate Conditions. *Agronomy* **2021**, *11*, 1618. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081618>

Academic Editor: Santiago Signorelli

Received: 14 July 2021

Accepted: 11 August 2021

Published: 14 August 2021

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



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

Abstract: Sun damage on apples is attributed to the occurrence of high temperatures, incident radiation, and fruit and plant water parameters, all dependent on climatic conditions and management. The development of new production areas and climate changes increase the interest in studying the behavior of the fruit under different conditions. The effect on sun damage of three nets and two chemical protectants was evaluated in a commercial orchard of ‘Granny Smith’ in a neotropical climate during the 2012–2016 seasons. We recorded the evolution, incidence and severity of sunburn and sunscald. Fruit surface temperature, fruit size, sprouting and return to flowering was also recorded. Incident radiation and air temperature were considered for the assessment of the crop’s microclimate. The transmittance in PAR wavelength and the air temperature variation on netting treatments reached 0.4 and 9 °C, respectively. The fruit surface temperature for the White-Net and Black-Net-50% treatments was always lower than 46 °C. For the sun damaged fruits, the Black-Net-50% treatment showed the highest proportion of slightly sunburned fruits (94%) and the lowest proportion of heavy damages, with a sunscald index equal to or less than 2 (on a scale of 1–4) in all the tested conditions. In a neotropical climate, protectant applications did not reduce the incidence of sunburn, but with the use of nets it was possible to reduce both sunburn and sunscald without affecting growth processes dependent on leaf net assimilation.

Keywords: nets; sun chemical protectants; sunscald; climate changes

1. Introduction

Sunburn damage originates during fruit growth and may or may not be visible at this stage. At harvest and packing, fruits showing an irregular, yellow-to-brown spot on the sunburned side are rejected. Damage without apparent symptoms at harvest and/or packing manifests itself after cold storage (*sunscald*) [1–3]. These colorations result from the synthesis of polyphenols and β-carotenoids in the affected portion of the skin as a potential protective mechanism against oxidative stress due to sun exposure [4–6]. Severe damage is characterized by dark-brown to black coloration due to necrosis of the epidermis and subepidermis [3]. The fruit skin’s physicochemical properties in each variety, such as homogeneity, thickness and composition of the epicuticular wax, and pigment concentration, modify the refraction of incident light and determine the sensitivity to sunburn [4], being ‘Granny Smith’ the most sensitive cultivar [7].

High solar incident radiation and high air temperature cause photo-oxidative stress conditions and increase fruit temperature. These are considered the environmental factors that determine sunburn [3,4,8]. Schrader et al. [1] propose a base fruit temperature of 46 to

49 °C for slight damage, and 52 °C for the occurrence of necrosis, the latter irrespective of incident radiation. Considering that the fruit temperature in the side exposed to the sun can be 18 °C higher than the air temperature and 9 °C higher than in the unexposed side [9], the air temperature values at which fruit damage occurs should be higher than 28–32 °C [3]. Although there is consensus on the predisposing environmental conditions for the occurrence of sunburn, recent works have focused on studying the role of the water status of the fruit and the tree. The location of the fruit in the canopy and its degree of acclimatization are associated with the severity of sun damage. Orchard characteristics, such as tree vigor, the presence of windbreaks and row direction, affect the incident radiation and the sensible heat of the fruit. Finally, crop water status plays a role due to its ability to cool the tissues and, therefore, reduce fruit temperature [2,10–13].

Quality losses due to sun damage have led to the development of cultivation practices to mitigate them [14], such as water spraying on foliage and fruits to lower fruit temperature [15], the use of shade nets [16], chemical formulations that reflect or filter UV radiation [17], antitranspirants [18], and canopy management [2]. Although the reduction in sunburn incidence using different types of netting, structures and cover is widely reported, the mechanisms involved are not fully described and results are highly variable depending on local climate, cultivar and management [16,19]. The nets reduce the total incident radiation, altering the crop's microclimate and modifying the gaseous exchange between plant and atmosphere [20,21]. As a result, many of the plant's physiological processes are modified, producing changes in both water use efficiency and net assimilation [22]. The effect of the netting on the crop's photosynthetic capacity depends on the total incident photosynthetically active radiation (PAR) at each location and for each time of the year. When the decrease in radiation due to the nets maintains PAR levels above the canopy PAR saturation, no problems in carbohydrate production are expected [23,24]. Reduced assimilation rates are associated with smaller fruit size and lower new-shoot growth [25].

The decrease in air temperature under the net, coupled with a decrease in wind speed, affects air temperature, relative humidity, and water vapor-pressure deficit. These environmental variables modify the photosynthetic efficiency, in addition to the water status of the plants and, therefore, the cooling capacity of the foliage and the fruit, thus altering the fruit's sensitivity to sun damage. The approaches linked to photosynthetic efficiency and conducted on recently harvested fruits show a decrease from 0.71 to 0 in the F_v/F_m ratio of fruit skin between 39 and 42 °C. Authors who subscribe to these approaches conclude that sunscald is an expression of photo-oxidative stress in the fruit's skin, which is promoted by peel temperatures above 40 °C. Short-term field tolerance is acquired by insolation at sub-injurious temperatures, but this tolerance is rather weak and does not abide the atmospheric conditions that prevail in the Israeli summer [26]. McCaskill et al. [22] point out that reductions of up to 2 °C in fruit temperature can be obtained under nets, which reduce the intensity of the solar beam by interception and scattering while allowing sufficient air flow to enable the transfer of heat from the fruit's surface to the air. On the other hand, nets can modify the quality of incident light, affecting photomorphogenic processes and other developmental processes such as bud differentiation and the return to flowering in the following spring [27,28].

Another reported management is the application of inorganic physical blockers, i.e., particles that block, reflect and scatter solar radiation [18]. These particles have been used in various crops since the 1970s with varied results. Gindaba and Wand [17] report a decrease in fruit temperature and sun damage in apple trees with the application of chemical protectants. The main drawbacks of this practice include the need for several applications to maintain constant coverage and the difficulty for the removal of the applied products at the packing lines [29].

Most of the research related to sunburn has been conducted in arid or semi-arid climates, with just a few studies performed in humid regions or addressing the differences in sensitivity to sunburn between fruits from different growing environments [30]. Research

on crop physiology under netting has been carried out in climates with high incidence of hail, related to altitudes and/or latitudes higher than those of our experiment [31], where solar radiation is not always excessive and therefore the risk of sunburn is lower [23]. Changes in the climate of traditional growing areas increase the interest in understanding the response of temperate fruit trees to neotropical climatic conditions, such as those of our study [32].

The objective of this work is to quantify sunburn damage on apples in a neo-tropical climate and to evaluate the effect of black and white netting, as well as the application of sunburn protectants, on sprouting and growth parameters, and on sunburn damage at harvest and after cold storage.

2. Materials and Methods

The experiment was carried out during the 2012/2013 to 2015/2016 seasons (hereafter, seasons 1 to 4) in an apple orchard (*Malus × domestica* Borkh) of ‘Granny Smith’/M7 pollinized with ‘Gala’, located in the department of San José, in southern Uruguay (34°38′18″ S; 56°40′06″ W, 28 masl). The orchard was established in 2003 with north–south row orientation and a planting frame of 4 m × 1.5 m. The climate of this regional ecotone is classified by Bernardi et al. (2016) as neotropical. The soil types are mainly Argiudolls and Hapluderts and a drip irrigation system setup with a maximum daily watering capacity of 4.5 mm.

Treatments consisted of netting and sunburn protectant (PRO) applications. Netting was evaluated throughout all 4 seasons, whereas PROs were applied in seasons 2 and 3. The nets used in all cases were monofilament nets with the following characteristics: translucent white net 20% (WN) (only in seasons 3 and 4); black net 35% (BN35); and black net 50% (BN50). The PROs used were kaolin (Surround WP®, 50 K/ha, Tessenderlo Kerley, Inc., Phoenix, AZ, USA) and CaCO₃ (Purshade®, 30 l/ha, Tessenderlo Kerley, Inc., Phoenix, AZ, USA), applied 4 and 5 times for seasons 2 and 3, respectively. All treatments were applied each season in mid-December, coinciding with weeks 6 and 9 after full bloom (WAFB), and were maintained until harvest. The flowering dates for cycles 1 to 4 were the following: 27 September (cycle 1), and 28 October, 3 and 14 (cycles 2, 3 and 4, respectively). The PRO treatments were repeated whenever necessary, depending on rainfall levels (after an accumulation of 10 mm) and/or fruit cover levels.

2.1. Experimental Design

2.1.1. Field Experiment

The experimental design consisted of randomized complete blocks with 3 replicates per treatment. The net treatments covered a surface of 600 m² (12 × 50 m), including three rows and its inter-rows, whereas PRO and Control treatments each consisted of one row of 15 m. In all cases, measurements were made in the three central trees.

Four fruits were marked in each replicate between 40 and 50 days after full bloom (DAFB) and after fruit drop by carbohydrate balance [33–35], one in each of the following conditions: (a) exposed green fruit with no visible sun damage (GEF); (b) exposed fruit with red coloration (RF); (c) exposed fruit with incipient sunburn (SBF) or sunburn browning, according to Racsko and Schrader [18]; (d) internal green fruit with no visible sun damage (GIF) (Figure 1). Those fruits were marked at a height between 1.5 and 2 m in the internal and external part of the canopy.

At harvest, fruits were visually classified according to the degree of sunburn into the following categories proposed by Torres et al. [33]: HF, healthy fruit; Mild, slight discoloration on the skin or mild sunburned symptoms on less than 25% of the surface; Mod, moderate sunburned fruit with yellowing and browning on 25 to 50% of the skin surface; and Sev, severe sunburned fruit with more than 50% sunburn or dark brown patches over light browning. These categories consider both symptom type and quantification of the surface, with symptoms described by Racsko and Schrader [18] and Torres et al. [36], as

a way of following a standard evaluation procedure to reduce the difficulties of visual grading.

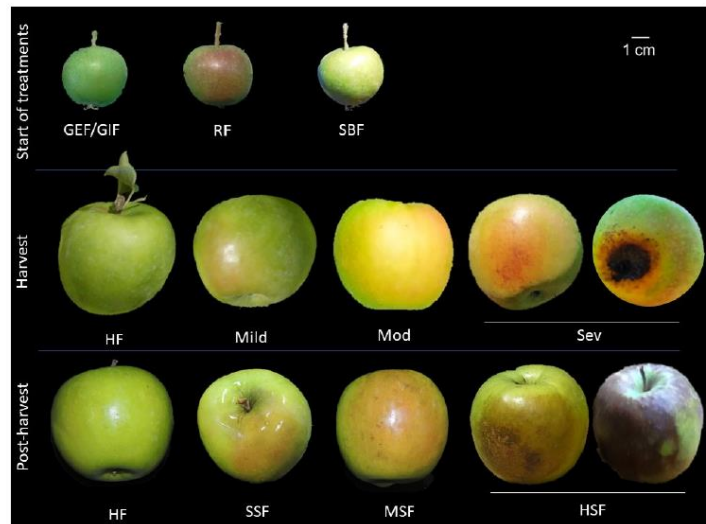


Figure 1. Examples of fruit categories at three stages of damage development. At the beginning of treatments (6 WAFB = weeks after full bloom): RF = red fruit, GEF = green external fruit, GIF = green internal fruit, and SBF = sunburned fruit. At harvest: HF = healthy fruit, Mild = slightly sunburned fruit, Mod = moderately sunburned fruit, Sev = heavily sunburned fruit; and Post-harvest: HF = healthy fruit, SSF = slightly sunscalded fruit, MSF = moderately sunscalded fruit, HSF = heavily sunscalded fruit.

2.1.2. Postharvest Experiment

Postharvest experiment was evaluated in seasons 2 and 3, using a randomized $5 \times 2 \times 2$ factorial design in each season. We applied five levels for field treatments, two levels for fruit condition at harvest (HF and Mild) and two levels for antiscaldant application to prevent superficial scald (with or without product application). The experimental unit consisted of a box with an average of 78 fruits, which was replicated 3 times. Each replicate was palletized and stored in commercial cold storage at a temperature of 0–1 °C and 95% RH. Diphenylamine (DPA) treatment was performed in season 2 at 2000 ppm for 1 min at 22 °C. In season 3, 75 mg m⁻³ of 1-MCP was applied in a commercial storage at room temperature.

2.2. Evaluations

2.2.1. Microclimate

The effect of the nets on the radiation affecting the crop was evaluated with an Ocean Optics spectrometer, model S2000, ~1 nm resolution, which covers a wavelength range from 250 to 800 nm. The spectra were evaluated twice in the tested period, on cloudless days and between 12:00 and 15:00 h (local time = GMT – 3 h).

During the 15/JAN-27/FEB period of season 4, the air temperature (AT) of each treatment was recorded every half hour using i-button sensors located inside the canopy of the trees and protected from direct solar radiation.

The maximum fruit surface temperature (FST) was recorded using an IR camera (FLIR E50) on three days at 12 WAFB of seasons 2 and 3, between 13:00 and 16:00 h, with maximum AT (ATmax) between 33 and 35 °C.

2.2.2. Sunburn

From 6 WAFB onwards, the evaluation of sun damage was recorded weekly by visual determination on the marked fruits.

At harvest, the fruits from each treatment were manually sorted into the four above-mentioned categories: HF, Mild, Mod and Sev (Figure 1). Fruits classified as HF and Mild were retained for postharvest evaluation.

2.2.3. Fruit Growth and Sprouting

From 6 WAFB onwards, fruit size development was measured weekly on a random sample of 15 fruits per tree. After harvest, we counted the number of shoots and spurs on one branch per tree and measured the length of the shoots. In the blooms corresponding to seasons 2, 3 and 4 for each treatment, we evaluated the return to flowering on the same branch.

2.2.4. Post-Harvest

The incidence and severity of scald was evaluated three times during each conservation season. In season 2, evaluations were made at 60, 120 and 210 days of cold storage, while in season 3 evaluations were made at 82, 133 and 245 days. Incidence was expressed as the presence or absence of alterations, and severity was classified on a 4-point scale, in which 1 corresponds to healthy fruits (HF), 2 to slightly scalded fruits (SSE, 25% of the fruit's surface), 3 to moderately scalded fruits (MSF, 25–50% of the surface), and 4 to heavily scalded fruits (HSF, greater than 50%) (Figure 1).

2.3. Statistical Analysis

Statistical analyses were performed using the R statistical software. The interpretation of binary data (0/1) was performed with generalized linear models (GLM) and binomial distribution. For continuous variables, normality and homogeneity of variances were tested prior to the analysis using Shapiro and Levene tests, respectively ($p > 0.05$). An analysis of variance (ANOVA) was performed when the assumptions of normality and homogeneity of variances were met, and a non-parametric Kruskal–Wallis test was applied when the ANOVA was not appropriate. The analysis of ordinal variables such as the level of sunburn or scald was performed with a Cumulative Link Model (CLM) and a Type II ANOVA test to establish the significance of the model effects. When required, Tukey or Mann–Whitney–Wilcoxon tests ($p < 0.05$) were performed.

3. Results

3.1. Changes in Microclimate

Incident Radiation and Air and Fruit Temperature

The nets mainly modified the maximum temperatures depending on their color. Daily ATmax showed the greatest differences among treatments, reaching a 9 °C maximum variation in the studied period. The Control treatment presented an ATmax of 43 °C, while the WN treatment reached 47 °C in the evaluated period. The lowest ATmax values were recorded in black net treatments: 39 °C and 38 °C for BN50 and BN35, respectively (Figure 2). Daily ATmed ranged from 23 °C to 25 °C, and ATmin from 9 °C to 10 °C (data not shown).

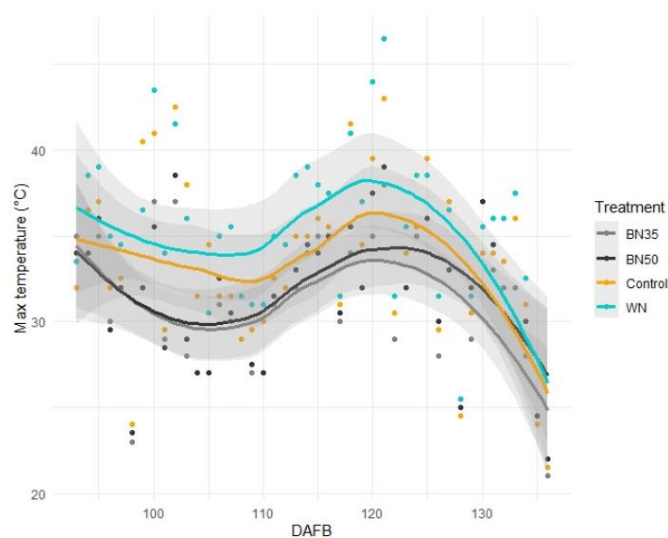


Figure 2. Evaluation of the maximum air temperature in the treatments under netting (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net) and the Control treatment. DAFB = days after full bloom in season 4. Dots represent the maximum daily temperature. Lines and 0.95 confidence intervals were calculated according to the `geom_smooth` function (loess method in R).

FST showed differences in relation to treatment and fruit type (SBF, RF, GEF, GIF) (Figures 3 and 4). The highest FST were recorded in the PRO and Control treatments, with 35 and 43% of measurements above 46 °C, respectively. BN35 had 14% of the FST measurements above 46 °C, while WN and BN50 did not present temperatures above this threshold. SBF showed the highest dispersion, with a mean FST of 43 °C, higher than RF and GIF (41 °C) (Figure 3). The distribution of the intrafruit surface varied among treatments (data not shown). The standard deviation of temperature values was 3.1 for the Control treatment to 1.9 for BN50, an example of which is shown in Figure 4.

The transmittance of BN50 and WN in the PAR wavelength range was 0.40 (± 0.03) and 0.70 (± 0.03), respectively. In the near IR (between 700 and 800 nm), the behavior of both materials varied. The transmittance of WN increased to values close to 100%, whereas in the case of BN50 the transmittance decreased to values of around 0.35 (Figure 5).

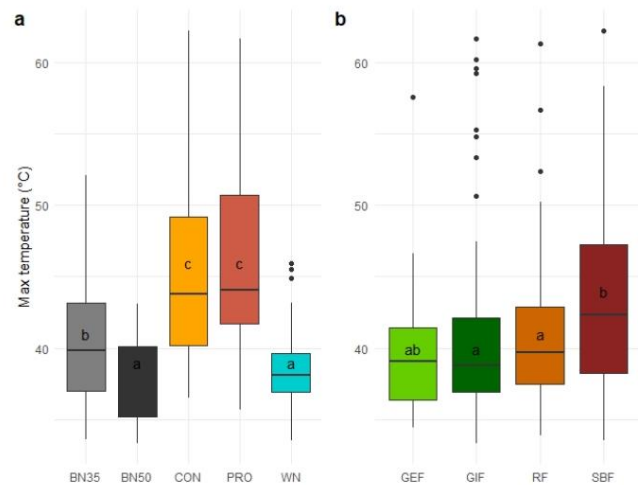


Figure 3. Maximum fruit surface temperature (FST) according to: (a). treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants), and (b). fruit condition (RF = red fruit, GEF = green external fruit, GIF = green internal fruit, and SBF = sunburned fruit). The box represents interquartile range (IQR); the upper (Q3) and lower (Q1) quartiles are the ends. The line in the box is the median and the whiskers are the range of the data, excluding outliers. Outliers are values higher than $Q3 + 1.5 \text{ IQR}$ or smaller than $Q1 - 1.5 \text{ IQR}$. Boxes with different letters indicate significant differences ($\alpha = 0.05$).

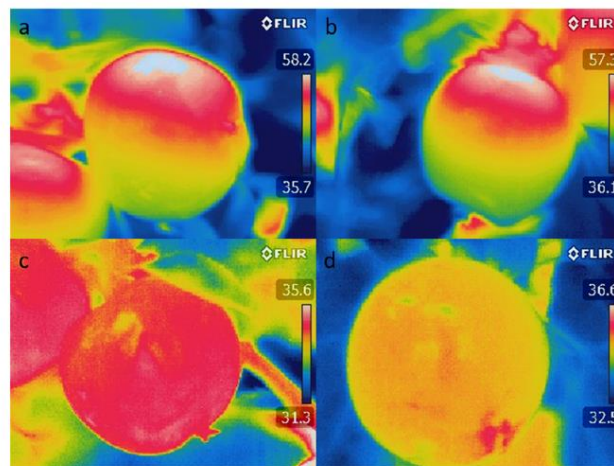


Figure 4. Examples of fruit temperature evaluated with an IR camera (FLIR E50). The scale represents the temperature (°C) in each image. (a,b) are fruits in the Control treatment (CON), while (c,d) are fruits in BN50 (Black net 50%).

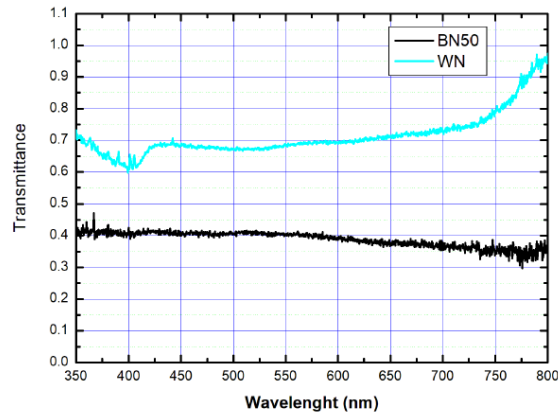


Figure 5. Transmitted radiation proportion between 350 to 800 nm for BN50 and WN treatments (Black Net 50% and White Net, respectively).

3.2. Sunburn

3.2.1. Sunburn Changes during the Season

The incidence of sunburn showed a different evolution according to the season, the initial condition of the fruit, and the protection treatment. In green internal fruits, the percentage of sunburn did not exceed 20%, while in sunburned fruits the final sunburn percentages ranged between 50 and 100% under all treatments in seasons 2 and 3 and under non-mesh treatments in seasons 1 and 4. Under netting treatments, the incidence of sunburn decreased drastically in seasons 1 and 4 in the first weeks of measurement and remained at low values as the season progressed. In green external fruits and red fruits, progressive increases were recorded during the evaluation period, with variations in the evolution between treatments and seasons. For red fruit, the maximum values of sunburn under netting (BN35, BN50, WN) were 75%. Values close to 100% were recorded for the PRO and Control treatments in season 2. For green external fruits, sunburn damage also increased as the season progressed, with results similar to those recorded for red fruits (Figure 6).

The incidence of final sunburn on marked fruits was significant for all the analyzed sources of variation (Figure 7). In the analysis according to season, seasons 2 and 3 showed the highest percentages of sunburned fruits, without reaching statistical differences with season 1 but doing so with season 4 (Figure 7a). In the analysis according to fruit type, Green internal fruits showed a median equal to 0% and lower than all other fruit types. Sunburned fruits and red fruits showed final sunburn values higher than 60% (65 and 62%, respectively) that did not differ statistically from those of green external fruits (Figure 7b). The treatments with the highest values of sunburned fruits were PRO and Control (64 and 50%, respectively), although pairwise comparisons did not reach significant differences (Figure 7c).

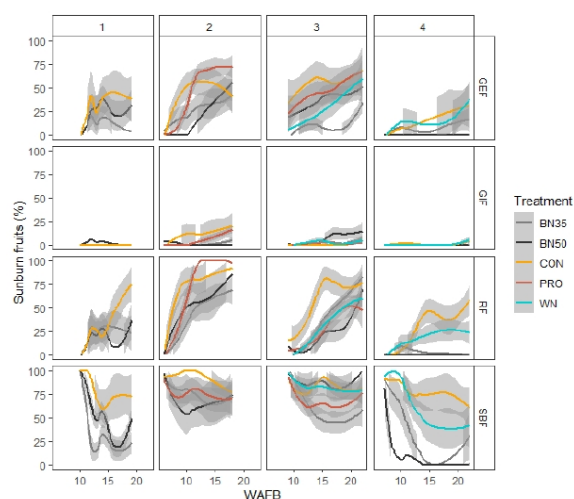


Figure 6. Evolution of the percentage of sunburned fruits by treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants) according to weeks after full bloom (WAFB), fruit condition (RF = red fruit, GEF = green external fruit, GIF = green internal fruit, and SBF = sunburned fruit) and season (1 to 4). Lines and 0.95 confidence intervals were calculated according to `geom_smooth` function (loess method in R).

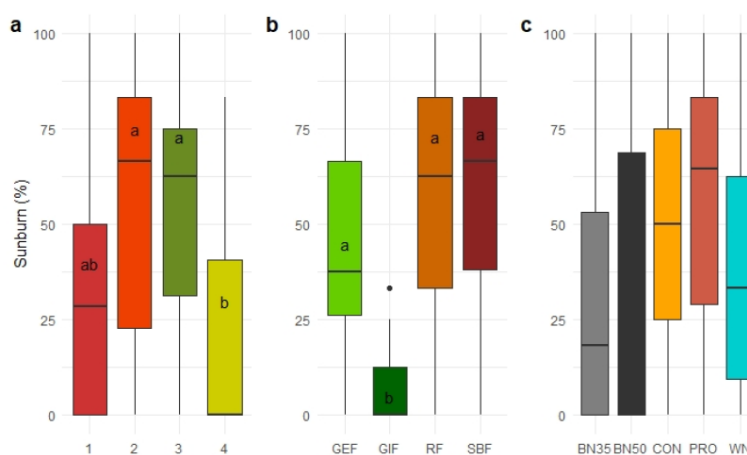


Figure 7. Incidence of final sunburn in evaluated fruits, according to: (a). season (1 to 4), (b). fruit condition (RF = red fruit, GEF = green external fruit, GIF = green internal fruit, and SBF = sunburned fruit), and (c). treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants). The box represents interquartile range (IQR); the upper (Q3) and lower (Q1) quartiles are the ends. The line in the box is the median and the whiskers are the range of the data, excluding outliers. Outliers are values higher than $Q3 + 1.5 \text{ IQR}$ or smaller than $Q1 - 1.5 \text{ IQR}$. Boxes with different letters indicate significant differences ($\alpha = 0.05$); the absence of letters indicate non-significant differences.

3.2.2. Sunburn at Harvest

The percentage of sunburned fruits out of the total harvested fruits showed differences between treatments, seasons, and their interaction (Figure 8a). The distribution between sunburn levels was significant only within treatments. The BN50 treatment showed the highest proportion of Mild and the lowest proportion of Mod + Sev, whereas PRO showed the highest proportion of Sev (Figure 8b).

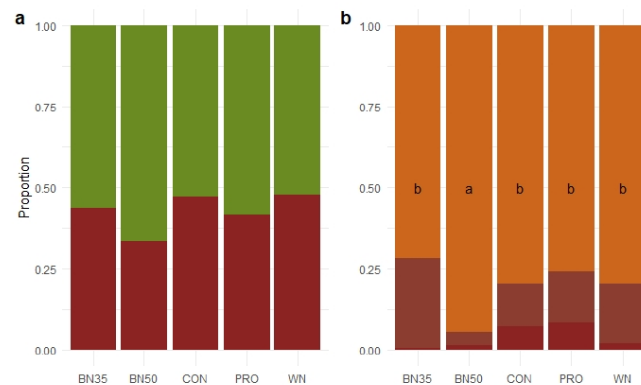


Figure 8. (a). Incidence of sunburn at harvest according to treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants) SBF = sunburned fruit (brown) HF = healthy fruit (green); (b). severity of sunburn at harvest according to treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants), the intensity of the color brown represents the intensity of the sunburn: Mild = slightly sunburned fruit (orange), Mod = moderately sunburned fruit (light brown), Sev = heavily sunburned fruit (brown). Bars with different letters indicate significant differences ($\alpha = 0.05$), absence of letters indicate non-significant differences.

3.3. Fruit Growth and Sprouting

The effect of the treatments on final fruit size depended on the seasons. The largest difference found between the largest and smallest fruits was very small, being 2.5 mm in Control and WN fruits in season 4 (Table 1). The mean final fruit diameter was 61, 71, 68 and 66 mm for seasons 1 to 4, respectively (data not shown).

Table 1. Fruit size difference between smallest and largest size at harvest by season and treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants).

	Size of Last Date Evaluated before Harvest			
	Largest Size Treatment	Smallest Size Treatment	Maximum Difference	
Season 1	BN35	CON	1.4 mm	*
Season 2	PRO	MN50	1.0 mm	Ns
Season 3	WN	BN50	1.5 mm	Ns
Season 4	CON	WN	2.5 mm	*

* Indicates significant difference ($\alpha = 0.05$) between indicated treatments in the row, ns = not significant.

The seasons showed differences for all sprouting variables (length of shoots, percentage of reproductive shoots and percentage of spurs). The treatment effect was only significant for the length of shoots variable, whereas the interaction was not significant (Table 2). The range of variation for the percentage of reproductive shoots was between 24 and 77% in seasons 2 and 3, respectively. The growth of shoots in seasons 2 and 3 (15 and 17 cm, respectively) was 30% lower than in season 1. Average sprouting percentages of 48 and 57% were recorded for spurs and reproductive shoots, respectively, for all treatments.

Table 2. Effect of season (1, 2 and 3) and treatments (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net and CON = control) on shoot length, percentage of reproductive structures (%reproductive), and percentage of short internode structures (%spurs) at next sprouting.

Shoot Length			%Reproductive *		%Spurs *	
Season						
1	22.30	a	61.99	b	35.02	b
2	15.21	b	24.36	c	55.31	a
3	16.89	b	77.62	a	49.79	a
Treatment						
WN	17.65	b	55.75		50.35	
BN35	15.14	c	59.05		44.64	
BN50	22.01	a	65.56		49.29	
CON	19.11	a	48.76		45.98	

* Evaluated the following spring. Different letters next to values in each group indicate significant differences ($\alpha = 0.05$).

3.4. Postharvest Evaluation

3.4.1. Scald Damage

Since the antiscauldant treatment varied for seasons 2 and 3 (DPA and 1-MCP, respectively), the results of the postharvest evaluation were analyzed independently (Figures 9 and 10). In both seasons, the model was significant for field treatments (Control, PRO, BN35, BN50, and WN), fruit condition when entering cold storage (HF and Mild), storage time and postharvest treatment, as well as their interactions. Successive evaluations of all conditions recorded an increase in damage, both in incidence and severity. Fruits without evidence of sunburn (HF) before cold storage had higher proportions of fruits without scald (HF) during storage. Both antiscauldants had similar effects by increasing the proportion of HF and reducing moderate and heavily scalded fruits (MSF and HSF) (Figures 9 and 10).

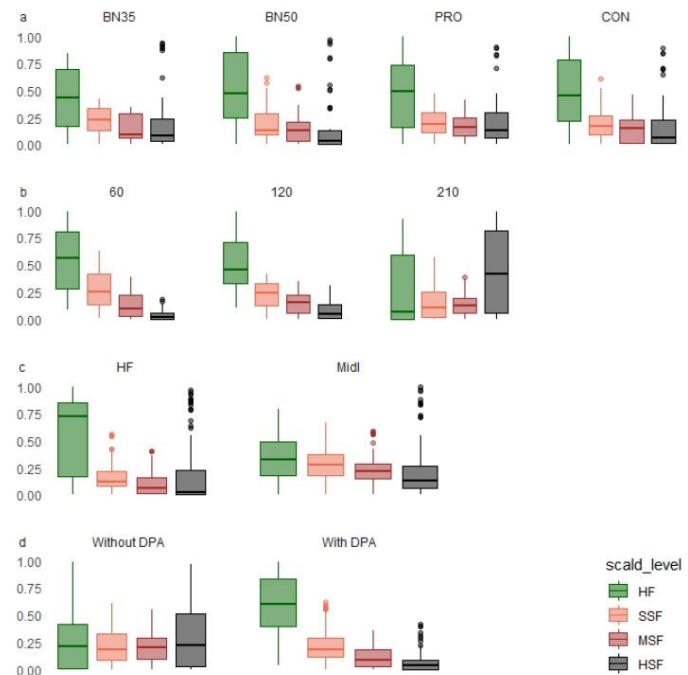


Figure 9. Proportion of fruits at each level of scald (HF healthy fruit, SSF = slightly scalded fruit, MSF = moderately scalded fruit, HSF = heavily scalded fruit) for season 2, according to: (a). field treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, CON = control and PRO = protectants), (b). days of storage, (c). sun damage at harvest (HF, healthy fruit; Mild, light sunburn), and (d). post-harvest treatment (without DPA or with DPA). The box represents interquartile range (IQR); the upper (Q3) and lower (Q1) quartiles are the ends. The line in the box is the median and the whiskers are the range of the data, excluding outliers. Outliers are values higher than $Q3 + 1.5 \text{ IQR}$ or smaller than $Q1 - 1.5 \text{ IQR}$.

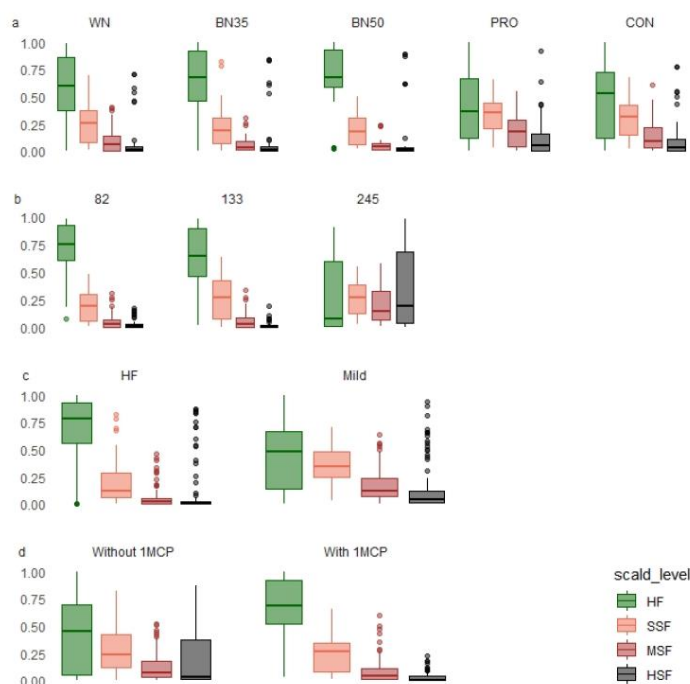


Figure 10. Proportion of fruits at each level of scald (HF healthy fruit, SSF = slightly scalded fruit, MSF = moderately scalded fruit, HSF = heavily scalded fruit) for season 3, according to: (a). field treatment (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants), (b). days of storage, (c). sun damage at harvest (HF healthy fruit, SIS light sunburn), and (d). post-harvest treatment (without 1-MCP or with 1-MCP). The box represents interquartile range (IQR); the upper (Q3) and lower (Q1) quartiles are the ends. The line in the box is the median and the whiskers are the range of the data, excluding outliers. Outliers are values higher than $Q3 + 1.5 \text{ IQR}$ or smaller than $Q1 - 1.5 \text{ IQR}$.

3.4.2. Sunscald Damage

An analysis of the interaction between field treatment and sunburn level on the evolution of scald was carried out on fruits treated with antiscaledants. In both seasons, HF had lower scald values than Mild, considering both the proportion of damaged fruits and the index of scalding. BN50 had the lowest scald values in 55% of the generated conditions, defined by evaluation method, season, fruit condition and field treatment. PRO had the lowest values in 66% of the conditions in both seasons (Table 3).

Table 3. Sunscald index (1 to 4) and proportion of sunscald according to season, sun damage condition at harvest (HF = healthy fruit, Mild = slightly sunburned fruit), field treatments (BN35 = Black net 35, BN50 = Black net 50, WN = White net, CON = control and PRO = protectants), and days of storage.

Season	Harvest Sun Damage	Field Treatment	Sunscald Index						Proportion of Sunscald					
						Days of Storage								
			60		120		210		60		120		210	
2	Mild	BN35	1.62	b	1.80	b	2.16	a	0.37	ns	0.47	ns	0.63	ns
		BN50	1.64	b	2.00	b	1.67	b	0.41		0.54		0.46	
		PRO	1.90	a	2.20	a	2.22	a	0.49		0.58		0.57	
	HF	CON	1.81	ab	1.86	b	1.92	ab	0.49		0.50		0.55	
		BN35	1.37	ns	1.39	a	1.40	ns	0.28	a	0.29	a	0.26	ns
		BN50	1.00		1.17	bc	1.20		0.00	d	0.14	b	0.14	
		PRO	1.30		1.30	ab	1.30		0.17	b	0.15	b	0.19	
		CON	1.14		1.10	c	1.30		0.10	c	0.06	c	0.20	
			82		133		245		82		133		245	
3	Mild	WN	1.47	b	1.74	b	1.79	c	0.36	b	0.54	c	0.55	c
		BN35	1.22	c	1.16	d	1.48	d	0.17	c	0.16	e	0.40	d
		BN50	1.48	b	1.48	c	1.63	cd	0.39	b	0.41	d	0.46	d
		PRO	1.93	a	2.26	a	2.39	a	0.61	a	0.87	a	0.87	a
		CON	1.58	b	1.80	b	2.07	b	0.40	b	0.67	b	0.71	b
	HF	WN	1.04	b	1.07	b	1.47	ab	0.04	b	0.07	b	0.28	b
		BN35	1.06	b	1.08	b	1.63	a	0.04	b	0.08	b	0.44	a
		BN50	1.02	b	1.11	b	1.36	b	0.02	b	0.10	b	0.32	b
		PRO	1.13	a	1.32	a	1.52	ab	0.14	a	0.29	a	0.42	a
		CON	1.06	b	1.24	a	1.40	ab	0.06	b	0.23	a	0.37	a

Different letters next to values in each group indicate significant differences ($\alpha = 0.05$). ns = not significant.

4. Discussion

4.1. Microclimate and Sun Damage

In the neotropical climatic conditions of our study, the increase and decrease in air temperature (AT) under WN and BN treatments, respectively, are in agreement with the values reported by other authors. The use of netting and its study differs as the climate of the region changes. In arid, semi-arid or Mediterranean climates (e.g., Washington State, main producing areas of Chile, Israel, South Africa), sunburn is a main objective, while in higher-latitude European conditions netting is mainly used as a protection against hail [11,21,37–39]. Climates with hot and humid summers, on the other hand, are not widely studied. The maximum AT exceeded 35 °C in all treatments, with WN and Control reaching 43 °C. These temperatures required homeostatic control mechanisms of cell metabolism, while also affecting fruit growth and pre- and postharvest quality [26,40,41]. Studies have shown that, under heat stress conditions, trees under photosensitive nets had greater leaf-level photosynthetic light-use efficiency compared to the Control [19]. Photoinhibition at the peel chloroplasts and the consequent generation of oxygen free radicals seems to explain sunburn to a large extent [26]. As it has been reported, fruit temperature can be 17 °C higher than air temperature [18]; therefore, damage could even occur at an AT above 29 °C. In the recorded period, the WN treatment presented 2% more days with AT > 29 °C than the Control treatment, while the BN35 and BN50 treatments had 25 and 15% less days with that condition, respectively.

The effect of treatments on fruit surface temperature (FST) varied in relation to the observed effect on AT (Figures 3 and 4). All treatments under netting (WN, BN35 and BN50) reduced fruit temperature compared to treatments without netting (Control and PRO). The BN50 treatment had the highest homogeneity in FST, whereas the Control treatment had the lowest. The AT values recorded for BN35 and BN50 and their relationship with FST are in line with Gindaba and Wand [17], who report that the FST of apples under 20% black shade netting was between 5.4 and 9.7 °C lower on days with AT between 34 and 37 °C, while the average decrease in FST with AT between 30 and 32 °C was 5.6 °C.

Regarding the decrease in radiation in the netting treatments (Figure 5), the results are in accordance with those reported by Bastías and Corelli-Grappadelli [27], who state that black or white nets are generally neutral and reduce a similar radiation profile in the different wavelengths of the PAR range. The transmittance of the BN50 treatment in the 350 to 800 nm wavelength range showed a decrease in radiation values similar to those obtained by Dussi et al. [42] with a 55% black net for PAR. The WN treatment presented transmittance values 20% lower than those presented by Blanke [23] and similar to those presented by Bastías and Corelli-Grappadelli [27] for the PAR range. The behavior of WN in the 350 to 425 nm range differs from that recorded for BN50. The increases in transmittance observed in the values between 700 and 800 nm also differ from those recorded for BN50. The increase in infrared radiation (>740 nm) has a significant caloric contribution [43] and could be related to the increases in air temperature recorded in this treatment. Another element to consider in regard to the changes in radiation is the increase in diffuse radiation transmission, which can increase up to 170%, thus improving light penetration both vertically and horizontally in the canopy [38].

The onset of symptoms in the trial (Figure 1) started at 6 WAFB, when fruits had an average size of 40.5 mm, two weeks earlier than reported by Racsko and Schrader [18]. Between 10 and 15 WAFB, when the maximum rate of damage occurs in treatments without nets, fruit size was 42 to 62 mm (data not shown) (Figure 6). These data are in agreement with those reported by Racsko and Schrader [18], which shows that the occurrence of damage depends on the coupling of predisposing environmental conditions and a certain level of susceptibility with diameters of 45 mm at 7 to 8 WAFB. Although the most widely reported predisposing conditions are high temperatures and radiation [18], Severino et al. [10], for the same seasons and site, associate damage more with water availability than high temperatures.

Season has a significant effect on the incidence of sunburn, both in the assessments of marked fruits and in the harvest assessment (Figures 6–8). Our results show that two of the four studied seasons presented high percentages of sunburn (seasons 2 and 3), while seasons 1 and 4 presented less favorable climatic conditions for sun damage. These data confirm the high interannual variability in the region where the study was conducted [32]. The severity of damage also evidenced the variation among treatments, with the BN50 treatment showing the highest percentage of fruits without damage (without reaching statistical significance) and, among the damaged fruits, the highest percentage of Mild (Figure 8).

Sunburn protectant applications did not reduce neither the incidence (Figure 7) nor the severity of sunburn (Figure 8). The difficulties in achieving a permanent coverage with the product result in periods of time in which unacclimatized tissues, exposed to high FST and radiation conditions, suffer photooxidative stress that can lead to sun damage [44].

4.2. Fruit Growth and Sprouting

The effect of the treatments on fruit growth was of low magnitude and did not modify the commercial category (1.4 to 2.5 mm depending on the season). Similar effects are reported in apple crops under netting in a diverse range of climates [45] and in heat stress studies with temperatures of 29 °C and higher when nets are applied since 4 WAFB (the period of treatment application in this trial) [41]. In turn, all sprouting variables evaluated in the netting and Control treatments (shoot length, percentage of reproductive shoots and percentage of spurs) showed differences related to season. The effect of treatments was only significant for the shoot length variable (Table 2). Apparently, the reductions recorded in the total incident radiation of the treatments under nets did not constitute a limiting factor for net assimilation. Studies conducted in Brazil, with irradiance values similar to those recorded in Uruguay [46], conclude that nets seem to promote the optimization of light interception and carbohydrate partitioning [31]. The average irradiance for the 2006–2015 period in the three months of highest incidence of sun damage [46] is 55% higher in the location of our study and of the works of Bosco et al. [31], compared to the areas where

adverse effects of the use of nets are recorded [23]. Changes in the incident light spectrum under netting were not significant enough to modify floral differentiation processes during the summer, nor did they affect bud break in the following season, in accordance with reports by Bastias and Corelli-Grappadelli [27].

4.3. Post-Harvest

Postharvest physiological disorders are determined by many factors, including maturity, nutrition, location of the fruit on the tree, and temperature to which it has been exposed [47]. The factors considered in our study (fruit condition when entering cold storage, field treatments, antiscaldant treatment and storage time) were significant in the model, both individually and for their interactions.

Both antiscaldant products significantly reduced scald damage, as reported in other studies [48]. Fruits entering cold storage without visible damage (HF) showed a lower range of damage than fruit with mild sun damage (Mild). The field treatments (Control, PRO, WN, BN35 and BN50) showed differences in scald and sunscald development for both classifications (HF and Mild) when entering cold storage (Figures 9 and 10).

In fruits with antiscaldant application (mainly expressing sunscald), the performance of treatments varied between seasons, with MN50 showing the best performance and PRO showing the worst (Table 3). Based on the assumption that the existing sun damage at harvest is neither reversible nor controllable, with the postharvest application of antiscaldant products [7,18,49] the results would indicate a different level of damage at harvest and a different sensitivity to sunscald expression depending on the field treatments. This difference in sensitivity could be explained by the variation produced by the nets in the composition and the antioxidant capacity of the fruit's skin [50]. The biochemical modifications triggered in the exposed and acclimatized fruits to withstand the high solar irradiance and high temperatures in the field [7], as well as the photoinhibition in the chloroplasts of the peels and the subsequent generation of oxygen free radicals [26], could induce the disorder later on.

5. Conclusions

The incidence of sunburn was influenced by the season under neotropical conditions. The shade netting reduces the sunburn and sunscald without affecting the growth processes dependent on leaf net assimilation. Protectants, on the other hand, are not effective and can increase sunscald incidence on the fruit during storage. The fruit position within the tree and the initial condition were the main factors affecting sun damage. However, black netting or favorable season conditions can reduce (i.e., reverse) the earlier sunburn symptoms. This shows the need for more studies on the relation between microclimate and physiological conditions at different hierarchical levels (fruit tissue, organ, branch and tree).

Author Contributions: Conceptualization, V.S., M.A.-S., J.A.Y. and J.G.-T.; methodology, V.S., M.A.-S., E.F., J.A.Y. and J.G.-T.; formal analysis, V.S. and E.F.; writing—original draft preparation, V.S.; writing—review and editing, V.S., M.A.-S., S.D., E.F., J.A.Y. and J.G.-T.; visualization, V.S.; supervision, S.D., J.A.Y. and J.G.-T.; project administration, V.S. and M.A.-S.; funding acquisition, V.S., M.A.-S., J.A.Y. and J.G.-T. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: Research funded by Agencia Nacional de Investigación e Innovación (RTS_X_2011_22868).

Institutional Review Board Statement: Not applicable.

Informed Consent Statement: Not applicable.

Acknowledgments: We thank Frutisur for their contribution to the funding of this work and for allowing us to use their crops, INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) and its members Alicia Feippe, Roberto Zoppolo and Danilo Cabrera for their participation in the research project, and CasaAmérica for their contribution to the materials used and their facilities. We also

thank Marcia García, Sebastián Galiger and José Luis Álvarez for their contribution to the field and laboratory work.

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

References

- Schrader, L.E.; Zhang, J.; Duplaga, W.K. Two Types of Sunburn in Apple Caused by High Fruit Surface (Peel) Temperature. *Plant Health Prog.* **2001**, *2*, 3. [\[CrossRef\]](#)
- Yuri, J.A.; Torres, C.; Bastias, R.; Neira, A. Golpe de Sol En Manzanas. II. Factores Inductores y Respuestas Bioquímicas. *Agro-Ciencia* **2000**, *16*, 23–32.
- Piskolczy, M.; Varga, C.; Racskó, J. The Meteorological Causes of Sunburn Injury on the Surface of Apple Fruit (*Malus domestica* Borkh.). *J. Fruit Ornament. Plant Res.* **2004**, *12*, 245–252.
- Wünsche, J.N.; Greer, D.H.; Laing, W.A.; Palmer, J.W. Physiological and Biochemical Leaf and Tree Responses to Crop Load in Apple. *Tree Physiol.* **2005**, *25*, 1253–1263. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Felicetti, D.A.; Schrader, L.E. Photooxidative Sunburn of Apples; Characterization of a Third Type of Apple Sunburn. *Int. J. Fruit Sci.* **2008**, *8*, 160–172. [\[CrossRef\]](#)
- Yuri, J.A.; Neira, A.; Quilodran, A.; Razmilic, I.; Motomura, Y.; Torres, C.; Palomo, I. Sunburn on Apples Is Associated with Increases in Phenolic Compounds and Antioxidant Activity as a Function of the Cultivar and Areas of the Fruit. *J. Food Agric. Environ.* **2010**, *8*, 920–925.
- Hernandez, O.; Torres, C.A.; Moya-León, M.A.; Opazo, M.C.; Razmilic, I. Roles of the Ascorbate—Glutathione Cycle, Pigments and Phenolics in Postharvest ‘Sunscald’ Development on ‘Granny Smith’ Apples (*Malus domestica* Borkh.). *Postharvest Biol. Technol.* **2014**, *87*, 79–87. [\[CrossRef\]](#)
- Schrader, L.; Zhang, J.; Sun, J. Environmental Stresses That Cause Sunburn of Apple. *Acta Hortic.* **2003**, *618*, 397–405. [\[CrossRef\]](#)
- Meheriuk, M.; Prange, R.K.; Lidster, P.D.; Porritt, S.W. *Postharvest Disorders of Apples and Pears*; Agriculture and Agri-Food: Ottawa, ON, Canada, 1994; ISBN 0662212371.
- Severino, V.; Arias-Sibillotte, M.; Dogliotti, S.; Frins, E.; Gonzalez-Talice, J.; Yuri, J.A. Climatic and Physiological Parameters Related to the Progress and Prediction of Apple Sunburn Damage in a Neotropical Climate. *Adv. Hortic. Sci.* **2020**, *34*, 431–440. [\[CrossRef\]](#)
- Szabó, A.; Tamás, J.; Nagy, A. The Influence of Hail Net on the Water Balance and Leaf Pigment Content of Apple Orchards. *Sci. Hortic.* **2021**, *283*, 110112. [\[CrossRef\]](#)
- Torres, C.A.; León, L.; Sánchez-Contreras, J. Spectral Fingerprints during Sun Injury Development on the Tree in Granny Smith Apples: A Potential Non-Destructive Prediction Tool during the Growing Season. *Sci. Hortic.* **2016**, *209*, 165–172. [\[CrossRef\]](#)
- Torres, C.A.; Sepúlveda, A.; León, L.; Yuri, J.A. Early Detection of Sun Injury on Apples (*Malus domestica* Borkh.) through the Use of Crop Water Stress Index and Chlorophyll Fluorescence. *Sci. Hortic.* **2016**, *211*, 336–342. [\[CrossRef\]](#)
- Musacchi, S.; Serra, S. Apple Fruit Quality: Overview on Pre-Harvest Factors. *Sci. Hortic.* **2018**, *234*, 409–430. [\[CrossRef\]](#)
- Parchomchuk, P.; Meheriuk, M. Orchard Cooling with Pulsed Overtree Irrigation to Prevent Solar Injury and Improve Fruit Quality of “Jonagold” Apples. *HortScience* **1996**, *31*, 802–804. [\[CrossRef\]](#)
- Manja, K.; Aoun, M. The Use of Nets for Tree Fruit Crops and Their Impact on the Production: A Review. *Sci. Hortic.* **2019**, *246*, 110–122. [\[CrossRef\]](#)
- Gindaba, J.; Wand, S.J.E. Comparative Effects of Evaporative Cooling, Kaolin Particle Film, and Shade Net on Sunburn and Fruit Quality in Apples. *HortScience* **2005**, *40*, 592–596. [\[CrossRef\]](#)
- Racsko, J.; Schrader, L.E. Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. *Crit. Rev. Plant Sci.* **2012**, *31*, 455–504. [\[CrossRef\]](#)
- Mupambi, G.; Musacchi, S.; Serra, S.; Kalcsits, L.A.; Layne, D.R.; Schmidt, T. Protective Netting Improves Leaf-Level Photosynthetic Light Use Efficiency in ‘Honeycrisp’ Apple under Heat Stress. *HortScience* **2018**, *53*, 1416–1422. [\[CrossRef\]](#)
- Kalcsits, L.; Musacchi, S.; Layne, D.R.; Schmidt, T.; Mupambi, G.; Serra, S.; Mendoza, M.; Asteggiano, L. Above and Below-Ground Environmental Changes Associated with the Use of Photosensitive Protective Netting to Reduce Sunburn in Apple. *Agric. For. Meteorol.* **2017**, *237–238*, 9–17. [\[CrossRef\]](#)
- Tanny, J.; Cohen, S.; Grava, A.; Naor, A.; Lukyanov, V. The Effect of Shading Screens on Microclimate of Apple Orchards. *Acta Hortic.* **2009**, *807*, 103–108. [\[CrossRef\]](#)
- McCaskill, M.R.; McClymont, L.; Goodwin, L.; Green, S.; Partington, D.L. How Hail Netting Reduces Apple Fruit Surface Temperature: A Microclimate and Modelling Study. *Agric. For. Meteorol.* **2016**, *226–227*, 148–160. [\[CrossRef\]](#)
- Blanke, M.M. The Structure of Coloured Hail Nets Affects Light Transmission, Light Spectrum, Phytochrome and Apple Fruit Colouration. *Acta Hortic.* **2009**, *817*, 177–184. [\[CrossRef\]](#)
- Solomakhin, A.; Blanke, M. The Microclimate under Coloured Hailnets Affects Leaf and Fruit Temperature, Leaf Anatomy, Vegetative and Reproductive Growth as Well as Fruit Colouration in Apple. *Ann. Appl. Biol.* **2010**, *156*, 121–136. [\[CrossRef\]](#)
- Bastias, R.M.; Manfrini, L.; Corelli Grappadelli, L. Exploring the Potential Use of Photo-Selective Nets for Fruit Growth Regulation in Apple. *Chil. J. Agric. Res.* **2012**, *72*, 224–231. [\[CrossRef\]](#)
- Naschitz, S.; Naor, A.; Sax, Y.; Shahak, Y.; Rabinowitch, H.D. Photo-Oxidative Sunscald of Apple: Effects of Temperature and Light on Fruit Peel Photoinhibition, Bleaching and Short-Term Tolerance Acquisition. *Sci. Hortic.* **2015**, *197*, 5–16. [\[CrossRef\]](#)

27. Bastias, R.M.; Corelli-Grappadelli, L. Light Quality Management in Fruit Orchards: Physiological and Technological Aspects. *Chil. J. Agric. Res.* **2012**, *72*, 574–582. [\[CrossRef\]](#)
28. Bosco, L.C.; Bergamaschi, H.; Marodin, G.A.B. Solar Radiation Effects on Growth, Anatomy, and Physiology of Apple Trees in a Temperate Climate of Brazil. *Int. J. Biometeorol.* **2020**, *64*, 1969–1980. [\[CrossRef\]](#)
29. Schrader, L.E. Scientific Basis of a Unique Formulation for Reducing Sunburn of Fruits. *HortScience* **2011**, *46*, 6–11. [\[CrossRef\]](#)
30. Reig, G.; Donahue, D.J.; Jentsch, P. The Efficacy of Four Sunburn Mitigation Strategies and Their Effects on Yield, Fruit Quality, and Economic Performance of Honeycrisp Cv. Apples under Eastern New York (USA) Climatic Conditions. *Int. J. Fruit Sci.* **2020**, *3*, 541–561. [\[CrossRef\]](#)
31. Bosco, L.C.; Bergamaschi, H.; Cardoso, L.S.; Paula, V.A. de Microclimate Alterations Caused by Agricultural Hail Net Coverage and Effects on Apple Tree Yield in Subtropical Climate of Southern Brazil. *Bragantia Camp.* **2018**, *77*, 181–192. [\[CrossRef\]](#)
32. Bernardi, R.E.; Holmgren, M.; Arim, M.; Scheffer, M. Why Are Forests so Scarce in Subtropical South America? The Shaping Roles of Climate, Fire and Livestock. *For. Ecol. Manag.* **2016**, *363*, 212–217. [\[CrossRef\]](#)
33. Zibordi, M.; Domingos, S.; Grappadelli, L.C. Thinning Apples via Shading: An Appraisal under Field Conditions. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* **2009**, *84*, 138–144. [\[CrossRef\]](#)
34. Archbold, D.D.; Nosarzowski, M.; Wu, B.; Vuppapapati, P. Does Availability of Soluble Carbohydrate Reserves Determine Apple Fruit Set? Available online: https://www.actahort.org/books/903/903_110.htm (accessed on 2 August 2021).
35. Corelli-Grappadelli, L.; Lakso, A.N. Fruit Development in Deciduous Tree Crops as Affected by Physiological Factors and Environmental Conditions. Available online: https://www.actahort.org/books/636/636_52.htm (accessed on 2 August 2021).
36. Torres, C.A.; Sepulveda, A.; Gonzalez-Talice, J.; Yuri, J.A.; Razmilic, I. Fruit Water Relations and Osmoregulation on Apples (*Malus domestica* Borkh.) with Different Sun Exposures and Sun-Injury Levels on the Tree. *Sci. Hortic.* **2013**, *161*, 143–152. [\[CrossRef\]](#)
37. Hunsche, M.; Blanke, M.M.; Noga, G. Does the Microclimate under Hail Nets Influence Micromorphological Characteristics of Apple Leaves and Cuticles? *J. Plant Physiol.* **2010**, *167*, 974–980. [\[CrossRef\]](#)
38. Mupambi, G.; Anthony, B.M.; Layne, D.R.; Musacchi, S.; Serra, S.; Schmidt, T.; Kalcsits, L.A. The Influence of Protective Netting on Tree Physiology and Fruit Quality of Apple: A Review. *Sci. Hortic.* **2018**, *236*, 60–72. [\[CrossRef\]](#)
39. Mupambi, G.; Schmeisser, M.; Dzikiti, S.; Reynolds, S.; Steyn, W.J. Ineffectiveness of Foliar S-ABA Application as an Apple Sunburn Suppressant Explained through Effects on Peel Biochemistry and Leaf Ecophysiology. *Sci. Hortic.* **2018**, *232*, 256–263. [\[CrossRef\]](#)
40. Woolf, A.B.; Ferguson, I.B. Postharvest Responses to High Fruit Temperatures in the Field. *Postharvest Biol. Technol.* **2000**, *21*, 7–20. [\[CrossRef\]](#)
41. Flaishman, M.A.; Peles, Y.; Dahan, Y.; Milo-Cochavi, S.; Frieman, A.; Naor, A. Differential Response of Cell-Cycle and Cell-Expansion Regulators to Heat Stress in Apple (*Malus domestica*) Fruitlets. *Plant Sci.* **2015**, *233*, 82–94. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
42. Dussi, M.C.; Giardina, G.; Sosa, D.; González Junyent, R.; Zecca, A.; Reeb, P.R. Shade Nets Effect on Canopy Light Distribution and Quality of Fruit and Spur Leaf on Apple Cv. Fuji. *Span. J. Agric. Res.* **2005**, *3*, 253–260. [\[CrossRef\]](#)
43. Yuri, J.A. Daño Por Sol En Manzanas. *Rev. Frutic.* **2010**, *8*, 2–9.
44. Glenn, D.M.; Yuri, J.A. Photosynthetically Active Radiation (PAR) × ultraviolet Radiation (UV) Interact to Initiate Solar Injury in Apple. *Sci. Hortic.* **2013**, *162*, 117–124. [\[CrossRef\]](#)
45. Bosančić, B.; Mitić, N.; Blanke, M.; Pecina, M. A Main Effects Meta Principal Components Analysis of Netting Effects on Fruit: Using Apple as a Model Crop. *Plant Growth Regul.* **2018**, *86*, 455–464. [\[CrossRef\]](#)
46. PVGIS-SARAH © European Communities, 2001–2017. Available online: <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/downloads/SARAH> (accessed on 2 August 2021).
47. Ferguson, I.; Volz, R.; Woolf, A. Preharvest Factors Affecting Physiological Disorders of Fruit. *Postharvest Biol. Technol.* **1999**, *15*, 255–262. [\[CrossRef\]](#)
48. Niu, J.P.; Hou, Z.; Ou, Z.; Hui, W. Comparative Study of Effects of Resveratrol, 1-MCP and DPA Treatments on Postharvest Quality and Superficial Scald of ‘starkrimson’ Apples. *Sci. Hortic.* **2018**, *240*, 516–521. [\[CrossRef\]](#)
49. Contreras, C.; Zoffoli, J.P.; Alcalde, J.A.; Ayala, M. Evolución Del Daño Por Insolación de Manzanas “Granny Smith” Durante El Almacenaje Refrigerado. *Cienc. Investig. Agrar.* **2008**, *35*, 147–157. [\[CrossRef\]](#)
50. Olivares-Soto, H.; Bastias, R.M.; Calderón-Orellana, A.; López, M.D. Sunburn Control by Nets Differentially Affects the Antioxidant Properties of Fruit Peel in ‘Gala’ and ‘Fuji’ Apples. *Hortic. Environ. Biotechnol.* **2020**, *61*, 241–254. [\[CrossRef\]](#)

5. CONCLUSIONES GENERALES

El presente trabajo fue propuesto con el objetivo de contribuir a la comprensión de la adaptación del cultivo de manzana a las condiciones de clima neotropical y analizar estrategias de manejo que permitan superar las principales limitantes impuestas sobre la calidad de fruta en términos de desórdenes fisiológicos. Para ello, basamos el estudio en las siguientes hipótesis: que existen condiciones de estrés abiótico que determinan la aparición de desórdenes fisiológicos; que existe correlación entre estos desórdenes y una serie de parámetros fisiológicos como potencial hídrico de tejido, concentración de sustancias reactivas al oxígeno, pigmentos y prolina; que es posible la caracterización de los frutos mediante espectroradiometría durante el período de crecimiento y que esta caracterización puede constituir una herramienta de predicción de daños y que existen estrategias de manejo capaces de reducir la pérdida de calidad por desórdenes fisiológicos.

El desarrollo del trabajo ha contribuido a comprender la adaptación del cultivo de manzana a condiciones de clima templado cálido o neotropical, aportando información relevante tanto en términos locales como regionales y globales. A escala local esta información es relevante por la importancia del cultivo en relación a la producción y sus efectos sobre la sociedad en su conjunto. Para la región la relevancia radica en que son reducidos los estudios previos y existe falta de información. A nivel global es relevante debido a que las zonas tradicionales de cultivo de manzana están experimentando cambios en las condiciones de cultivo que hacen trascendentes los estudios desarrollados en otras zonas climáticas. Si bien el foco se ha centrado en aspectos de calidad vinculados a desórdenes fisiológicos, fue analizado

también el efecto de medidas de manejo tendientes a mejorar la calidad de fruta sobre los componentes del rendimiento.

Basados en las preguntas que han guiado este trabajo y en los resultados obtenidos organizaremos este capítulo final de la siguiente forma:

1. Resultados y análisis de las condiciones predisponentes al desarrollo de desórdenes fisiológicos (principalmente daños por sol).
2. Resultados y análisis de la caracterización de los frutos y su potencial como herramientas de predicción.
3. Evaluación de manejos tendientes a reducir los daños.

5.1. CONDICIONES PREDISPOENTES

Durante el período de estudio se registró una alta variabilidad en las condiciones predisponentes, así como en el desarrollo de daños. Se presentaron condiciones favorables a la ocurrencia de daños tanto en los aspectos referidos a temperaturas máximas como a déficits hídricos. Las temperaturas máximas alcanzaron los máximos históricos (39 °C) y los balances hídricos (con riego) presentaron valores de hasta -150 mm.

De la relación de los factores analizados y la expresión de daños se puede concluir que la disponibilidad de agua en el suelo fue la condición más relacionada con el desorden fisiológico de mayor importancia: el daño por sol.

Existe una relación de vinculación entre los factores predisponentes, radiación, temperatura y estrés hídrico, que determina que, aunque alguno de ellos se presente como más relevante, es necesario considerarlos en conjunto

y entender cómo la modificación de alguno de ellos puede influir en la modificación de los otros.

5.2. CARACTERIZACIÓN DE FRUTOS Y PREDICCIÓN

El estudio de la evolución de los daños de sol conjuntamente con el análisis de indicadores fisiológicos destructivos y no destructivos permitió contribuir a la definición de estrategias tendientes a elaborar métodos de predicción de daños. Los abordajes no destructivos de la predicción de desórdenes fisiológicos están aún en desarrollo y los resultados obtenidos al respecto en este trabajo no permitieron seleccionar ni generar un índice espectralradiométrico que cumpla dicho objetivo. El índice de espectralradiometría PSRI480 fue el de mayor capacidad de discriminación entre frutos sanos y frutos dañados, pero no pudo establecerse un índice capaz de anticipar el desarrollo de desórdenes fisiológicos en campo mediante espectralradiometría. Entre los abordajes destructivos, el potencial hídrico de fruto y la concentración de prolina en los tejidos del fruto presentaron la mayor capacidad de discriminar entre frutos sanos y dañados.

Los avances en la discriminación entre frutos dañados y sanos no implican la capacidad de predecir daños; sin embargo, los métodos de predicción podrían continuar desarrollándose basados en la determinación de condiciones de fruta dañada cuando el daño tiene aún posibilidades de reversión. En este sentido, y considerando los indicadores evaluados en este trabajo, las diferencias de potencial hídrico entre las caras del fruto y la concentración de prolina (como indicadores destructivos) y el índice de espectralradiometría PSRI480 (como indicador no destructivo) presentan las mejores características.

La importancia de la predicción de desórdenes fisiológicos, radica en el hecho de que la mayoría de ellos se manifiestan luego del almacenamiento refrigerado. Dicha condición determina que más allá de las posibles pérdidas directas en cosecha o procesamiento de fruta inmediatamente luego de esta, el sector productivo presente pérdidas luego de haber adicionado a los costos de producción de campo los costos asociados al almacenamiento. Esta pérdida de rendimiento comercial luego de incurridos los costos de producción y de almacenamiento reducen la sostenibilidad económica de la producción.

El desarrollo de métodos de predicción, fundamentalmente de aquellos desórdenes fisiológicos que se manifiestan luego de la conservación frigorífica (bitter pit y escaldado por sol), podría constituir una herramienta de gran valor para reducir las pérdidas de fruta y mejorar las perspectivas del sector productivo.

5.3. MANEJOS

5.3.1. Modificación de los factores predisponentes

Mediante los manejos propuestos fue posible modificar los factores predisponentes y la presencia de síntomas. El tratamiento con malla negra 50 % fue el que modificó en mayor medida los factores predisponentes con respuesta en los niveles de daño.

La temperatura de aire se redujo únicamente en el tratamiento con malla negra 50 %, sin embargo, la temperatura de la fruta sí fue menor en todos los tratamientos de malla. El uso de protectores solares no disminuyó la temperatura de la fruta. El tratamiento con malla negra 35 % no alcanzó a reducir los valores de temperatura de aire y presentó valores intermedios respecto de la temperatura de fruto. Los tratamientos control y protectores

solares presentaron los mayores valores de temperatura de fruto y los tratamientos con malla negra 50 % y malla blanca presentaron los menores valores.

El tratamiento con malla negra 50 % redujo los valores de temperatura máxima del aire en el período registrado, presentó los valores de potencial de xilema menos restrictivos y las menores temperaturas de fruto. El tratamiento de malla blanca, sin embargo, no generó condiciones favorables para la reducción del daño de quemado de sol, ni respecto de la temperatura del aire ni respecto del potencial hídrico de xilema. En ambos tratamientos de malla, el comportamiento del daño, las temperaturas de aire y de fruta, así como la condición hídrica se relacionaron con las modificaciones realizadas sobre la radiación incidente. Mallas negras y blancas redujeron en diferente magnitud pero con un perfil similar la radiación en las distintas longitudes de onda del rango PAR mientras que las diferencias de comportamiento respecto de la transmitancia para ambos colores de malla se detectaron en el rango entre 350 y 425 nm y entre 700 y 800 nm. El incremento de radiación infrarroja (>740 nm) es de gran aporte calórico y podría estar relacionado a los aumentos de temperatura del aire registrados en el tratamiento de malla blanca. Respecto a las variables crecimiento vegetativo, crecimiento de fruto, inducción y diferenciación floral, no se vieron afectados en los rangos de modificación de la radiación de los tratamientos de malla.

5.3.2. Manifestación de síntomas

Los manejos instalados durante el período evaluado con el objetivo de reducir los desórdenes fisiológicos en la piel de manzanas Granny Smith (cultivar de alta sensibilidad) mostraron resultados variados. Si bien todos los

tipos de malla presentaron valores de quemado menores al testigo, solo el tratamiento con malla Negra 50 % alcanzó diferencias significativas en los daños de quemado a cosecha. Por su parte, en la expresión de sunscald los tratamientos bajo malla y en particular el tratamiento con malla negra 50 % presentaron siempre menores daños.

Los tratamientos de protectores solares no presentaron mejoras en la expresión de daños en campo ni luego del almacenamiento.

5.4. PERSPECTIVAS DE FUTURO

La importancia social y económica del cultivo de manzana, establece la necesidad de estudiar y contribuir al desarrollo de medidas de manejo que mejoren su sustentabilidad. El cultivo presenta entre las principales características relevantes desde la perspectiva socioeconómica, el número de productores (la gran mayoría familiares), su aporte a la soberanía alimentaria, al empleo rural y al desarrollo de la fruticultura.

La evolución de las condiciones climáticas indica la presencia de una mayor ocurrencia de condiciones predisponentes para el desarrollo de desórdenes fisiológicos; por tanto, los estudios de adaptación ecofisiológica y de medidas de manejo adaptadas a las condiciones locales adquieren gran relevancia. Entre las medidas de manejo se encuentran las de mitigación de los efectos, como la colocación de mallas de sombreamiento o las de adaptación como las herramientas de predicción, ambas abordadas en el presente estudio y con resultados muy promisorios.

Desde el punto de vista de las herramientas de control, el establecimiento de las medidas de manejo para cultivares coloreados implica un desafío que no ha sido abordado en este estudio. Este aspecto debería estudiarse en

futuros trabajos, fundamentalmente en el caso de Cripps pink ya que es el cultivar coloreado en el que se expresan con mayor frecuencia los desórdenes fisiológicos vinculados al daño por sol.

Desde el punto de vista de la prevención y predicción, los aspectos relativos al estatus hídrico del cultivo (estudio de potenciales hídricos y contenidos de prolina) parecen establecerse como promisorios para profundizar desde el conocimiento básico y contribuir a generar herramientas aplicadas al ámbito productivo. En este sentido parece relevante avanzar en estudios realizados en condiciones de crecimiento controlado, en donde se manejen los factores predisponentes y se permita evaluar los estados iniciales y reversibles de la expresión de daños.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Ballester C, Castel J, Jiménez-Bello MA, Castel JR, Intrigliolo DS. 2013. Thermographic measurement of canopy temperature is a useful tool for predicting water deficit effects on fruit weight in citrus trees. *Agricultural Water Management* 122:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.005>
- Blanke M. 2009. The structure of coloured hail nets affects light transmission, light spectrum, phytochrome and apple fruit colouration. *Acta Horticulturae*. 817, 177-184
- Boini A, Manfrini L, Morandi B, Corelli Grappadelli L, Predieri S, Daniele GM, López G. 2021. High Levels of Shading as A Sustainable Application for Mitigating Drought, in *Modern Apple Production*. *Agronomy* 11:422. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030422>
- Braun H-J, Payne T, in Reynolds MP., Pask AJD. MDM y C-DPN (Eds). 2013 *Fitomejoramiento en mega-ambientes*. México, D.F.: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)
- Caputi P, Canessa S. 2012. Consultoría solicitada por la Representación FAO en Uruguay sobre Plan Estratégico y diseño institucional para el sector de frutales de hoja caduca. Informe Final. 1–89. Visto 04/03/2022. Disponible en: https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/publicaciones/plan_estrategico_fhc_2012_caputti-canessa.pdf

- Dan C, Șerban C, Sestras AF, Militaru M, Morariu P, Sestraș RE. 2015. Consumer Perception Concerning Apple Fruit Quality, Depending on Cultivars and Hedonic Scale of Evaluation - a Case Study. *Notulae Scientia Biologicae* 7:140–149. <https://doi.org/10.15835/nsb.7.1.9553>
- Darbyshire R, McClymont L, Goodwin I. 2015. Sun damage risk of Royal Gala apple in fruit-growing districts in Australia. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 43:222–232
- Dogliotti S, García MC, Peluffo S, Dieste, JP, Pedemonte AJ, Bacigalupe GF, Scarlato M, Alliaume F, Alvarez J, Chiappe M, Rossing WAH. 2014. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. *Agricultural Systems* 126:76–86. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.009>
- FAO-MGAP (Food and Agriculture Organization – Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca), 2013. Sensibilidad y capacidad adaptativa de la viticultura y la fruticultura frente al cambio climático. Volumen VI de Clima de cambios: nuevos desafíos de adaptación en Uruguay. Autores: Ferrer M; Camussi G; Fourment M, Varela V; Pereyra G; Taks J, Contreras S; Cruz G; Astigarraga L; Picasso V. Resultado del proyecto FAO TCP URU 3302, Montevideo. Corrección de estilo: Galván M. Diseño: Grille E. Disponible en: <http://www.fao.org/climatechange/84982/es>
- Feippe A, Rebellato J, Fredes A, Severino V 2011 Jornada de divulgación: mancha lenticelar. Programa de Investigación en Producción Frutícola. Serie Actividades de Difusión n.º 649, pp 1–30
- Feippe A, Muller I, Echeverría G, Lamarca N, Chiesa N, Viñas I, Albín A, Teixido N. 2007. Calidad de la carne y otros distintos sistemas productivos;

- componente frutas, manzana y citrus. Serie técnica n.º 163 INIA, Uruguay. 58p. ISBN: 978-9974-38-231-2
- Feippe A. 1995. Desordenes fisiológicos y problemas más comunes observados durante el almacenamiento de manzanas, peras y ciruelas en Uruguay. Boletín de divulgación INIA n.º 55. Uruguay. 16p. ISBN: 9974-38-048-0
- Ferguson I, Volz R, Woolf A (1999) Preharvest factors affecting physiological disorders of fruit. *Postharvest Biology and Technology* 15:255–262. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(98\)00089-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(98)00089-1)
- Gariglio NF, Pilatti RA, Agustí Fonfría M. 2007. Requerimientos ecofisiológicos de los árboles frutales. In: Sozzi GO (ed) Árboles frutales. Ecofisiología Cultivo y Aprovechamiento, Facultad de Buenos Aires, Argentina, p 51
- Gazzano I, Achkar M, Apezteguía E, Ariza J, Gómez Perazzoli A, Pivel J. 2021. Ambiente y crisis en Uruguay. *Revista de Ciencias Sociales* 34:13–40
- Giménez A, Lanfranco B. 2012. Adaptación al cambio climático y la variabilidad : algunas opciones de respuesta para la producción agrícola en Uruguay. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:611–620
- Gindaba J, Wand SJE. 2005. Comparative Effects of Evaporative Cooling , Kaolin Particle Film , and Shade Net on Sunburn and Fruit Quality in Apples. *HortScience* 40:592–596
- Glenn DM, Yuri JA. 2013. Photosynthetically active radiation (PAR)×ultraviolet radiation (UV) interact to initiate solar injury in apple. *Scientia Horticulturae* 162:117–124. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.07.037>

- Glenn DM, Wünsche J, McIvor I, Nissen R, George A. 2008. Ultraviolet radiation effects on fruit surface respiration and chlorophyll fluorescence. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 83(1):43–50. <https://doi.org/10.1080/14620316.2008.11512345>
- Grandón S, Sánchez-Contreras J, Torres CA. 2019. Prediction models for sunscald on apples (*Malus domestica* Borkh.) cv. Granny Smith using Vis-NIR reflectance. *Postharvest Biology and Technology* 151:36–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.01.012>
- Hengari S, Theron KI, Midgley SJE, Steyn WJ. 2014. The effect of high UV-B dosage on apple fruit photosystems at different fruit maturity stages. *Scientia Horticulturae* 170:103–114. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.02.037>
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2021. Unidad de Agro-clima y Sistemas de información (GRAS) Montevideo. s.p. Consultado 04/03/2021. 2021. Disponible en <http://www.inia.uy/gras>
- Jaeger SR, Antúnez L, Ares G, Johnston JW, Hall M, Harker FR. 2016. Consumers' visual attention to fruit defects and disorders: A case study with apple images. *Postharvest Biology and Technology* 116:36–44. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.12.015>
- Kanayama Y, Kochetov A. 2015. *Abiotic Stress Biology in Horticultural Plants*. Springer Japan. 220p. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-55251-2>
- Kowitcharoen L, Wongs-Aree C, Setha S, Komkhuntod R, Kondo S, Srilaong V. 2018. Pre-harvest drought stress treatment improves antioxidant activity and sugar accumulation of sugar apple at harvest and during

- storage. *Agriculture and Natural Resources* 52:2. 146-154.
<https://doi.org/10.1016/j.anres.2018.06.003>
- Lin-Wang K, Micheletti D, Palmer J, Volz R, Lozano L, Espley R, Hellens RP, Chagnè D, Rowan DD, Troggio M, Iglesias I, Allan AC. 2011. High temperature reduces apple fruit colour via modulation of the anthocyanin regulatory complex. *Plant, Cell & Environment* 34:1176–90.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02316.x>
- López Camelo AF. 2003. Manual para la preparación y venta de frutas y hortalizas. Del campo al mercado. Boletín de servicios agrícolas de la FAO 151. 207 p. ISBN: 925304991x
- Lötze E, Theron KI. 2007. Evaluating the Effectiveness of Pre-Harvest Calcium Applications for Bitter Pit Control in 'Golden Delicious' Apples Under South African Conditions. *Journal of Plant Nutrition* 30:471–485.
<https://doi.org/10.1080/01904160601172098>
- Makeredza B, Schmeisser M, Lötze E, Steyn WJ. 2013. Water Stress Increases Sunburn in 'Cripps' Pink' Apple. *HortScience* 48(4):444-447
- Manja K, Aoun M. 2019. The use of nets for tree fruit crops and their impact on the production: A review. *Scientia Horticulturae* 246:110–122.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.050>
- Merzlyak MN, Solovchenko AE, Gitelson AA. 2003. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit. *Postharvest Biology and Technology* 27:197–211. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00066-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00066-2)

- MGAP-DIEA. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección de estadísticas Agropecuarias) 2016. Encuesta frutícola de hoja caduca Zafra 2016. [en línea] Consultado 04/03/2021, disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/encuesta-fruticola-hoja-caduca-zafra-2016-nro-338>
- MGAP-DIEA. (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca – Dirección de estadísticas Agropecuarias) 2014. Anuario estadístico. [en línea] Consultado 04/03/2021, disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Documentos%20compartidos/Anuario2014/Diea-Anuario%202014-Digital01.pdf>
- Monge E, Val J, Sanz M, Montañés ABL. 1994. El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. Anales de la Estación Experimental de Aula Dei (Zaragoza).Vol. 21, n.3: 189-201
- Morales-Quintana L, Waite JM, Kalcsits L, Torres CA, Ramos P. 2020. Sun injury on apple fruit: Physiological, biochemical and molecular advances, and future challenges. *Scientia Horticulturae* 260:108866. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108866>
- Mupambi G, Anthony BM, Layne DR, Musacchi S, Serra S, Schmidt T, Kalcsits LA. 2018a. The influence of protective netting on tree physiology and fruit quality of apple: A review. *Scientia Horticulturae* 236:60–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.03.014>
- Mupambi G, Schmeisser M, Dzikiti S, Reynolds S, Steyn WJ. 2018b. Ineffectiveness of foliar S-ABA application as an apple sunburn suppressant explained through effects on peel biochemistry and leaf

- ecophysiology. Scientia Horticulturae 232:256–263.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.021>
- Mupambi G. 2017. Water relations and sunburn in apple fruit. Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Agric) in the Faculty of AgriScience at Stellenbosch University. 256p
- Musacchi S, Serra S. 2018. Apple fruit quality: Overview on pre-harvest factors. Scientia Horticulturae 234:1–22.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.057>
- Naschitz S, Naor A, Sax Y, Shahak Y, Rabinowitch H. 2015. Photo-oxidative sunscald of apple: Effects of temperature and light on fruit peel photoinhibition, bleaching and short-term tolerance acquisition. Scientia Horticulturae 197:5–16.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.11.003>
- Piskolczi M, Varga C, Racskó J. 2004. The Meteorological Causes of Sunburn Injury on the Surface of Apple Fruit (*Malus domestica* Borkh.). Journal of Fruit and Ornamental Plant Research 12:245–252
- Proexport. 2013. Frutas Frescas. Uruguay XXI Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones. 12p.
- Racsko J, Schrader LE. 2012. Sunburn of Apple Fruit: Historical Background, Recent Advances and Future Perspectives. Critical Reviews in Plant Sciences 31:455–504. <https://doi.org/10.1080/07352689.2012.696453>
- Ramírez F, Kallarackal J. 2014. Ecophysiology of temperate fruit trees in the tropics. Advances in Environmental Research 31:89–101

- Reig G, Donahue DJ, Jentsch P. 2019. The Efficacy of Four Sunburn Mitigation Strategies and Their Effects on Yield , Fruit Quality , and Economic Performance of Honeycrisp Cv . Apples under Eastern New York (USA) Climatic Conditions. *International Journal of Fruit Science* 0:1–21. doi: 10.1080/15538362.2019.1605558
- Renom M, Rusticucci M, Barreiro M. 2011 Multidecadal changes in the relationship between extreme temperature events in Uruguay and the general atmospheric circulation. *Climate Dynamics* 37:2471–2480. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0986-9>
- Roberts MF. 2005. Organic compatible solutes of halotolerant and halophilic microorganisms. *Aquatic Biosystems* 1:5. <https://doi.org/10.1186/1746-1448-1-5>
- Schrader L, Sun J, Zhang J, Felicetti D, JUN T. 2008. Heat and Light-Induced Apple Skin Disorders: Causes and Prevention. *Acta Horticulturae* 51–58. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.772.5>
- Schrader L, Zhang J, Sun J. 2003. Environmental stresses that cause sunburn of apple. *Acta Horticulturae* 618:397–405. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2003.618.47>
- Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, Yuri J A, González-Talice J. 2021. Pre- and Postharvest Management of Sunburn in ‘Granny Smith’ Apples (*Malus domestica* Borkh) under Neotropical Climate Conditions. *Agronomy* 11, 1618. <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/8/1618>
- Severino V, Arias-Sibillotte M, Dogliotti S, Frins E, González-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* 34:431–440. <https://doi.org/10.13128/ahsc>
- Shivashankara K.S., Rao N.K.S., Geetha G.A. 2013. Impact of Climate Change on Fruit and Vegetable Quality. In: Singh H., Rao N., Shivashankar K. (eds.) *Climate-Resilient Horticulture: Adaptation and Mitigation Strategies*. Springer, India. pp 237–244. https://doi.org/10.1007/978-81-322-0974-4_21
- Solovchenko A, Dorokhov A, Shurygin B, Nikolenko A, Velichko V, Smirnov I, Khort D, Aksenov A, Kuzin A. 2021. Linking tissue damage to hyperspectral reflectance for non-invasive monitoring of apple fruit in orchards. *Plants* 10:1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10020310>
- Solovchenko AE, Chivkunova OB, Gitelson AA, Merzlyak MN. 2010. Non-Destructive Estimation Pigment Content , Ripening , Quality and Damage in Apple Fruit with Spectral Reflectance in the Visible Range. *Fresh Produce* 4:91–102
- Szabó A, Tamás J, Nagy A. 2021. The influence of hail net on the water balance and leaf pigment content of apple orchards. *Scientia Horticulturae* 283: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110112>
- Tartachnyk I, Kuckenberg J, Yuri JA, Noga G. 2012. Identifying fruit characteristics for non-invasive detection of sunburn in apple. *Scientia Horticulturae* 134:108–113. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.11.009>
- Torres CA, Sepúlveda A, González-Talice J, Yuri JA, Razmilic I. 2013. Fruit water relations and osmoregulation on apples (*Malus domestica* Borkh.) with

- different sun exposures and sun-injury levels on the tree. *Scientia Horticulturae* 161:143–152. doi: 10.1016/j.scienta.2013.06.035
- Torres CA, León L, Sánchez-Contreras J. 2016a. Spectral fingerprints during sun injury development on the tree in Granny Smith apples: A potential non-destructive prediction tool during the growing season. *Scientia Horticulturae* 209:165–172. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.06.024>
- Torres CA, Sepúlveda A, León L, Yuri JA. 2016b. Early detection of sun injury on apples (*Malus domestica* Borkh.) through the use of crop water stress index and chlorophyll fluorescence. *Scientia Horticulturae* 211:336–342. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.09.022>
- Tripathi DK. 2020. Plant life under changing environment responses and management, Academic. London. 520p.
- XXI Uruguay. 2016. Producción y comercio exterior frutas frescas Inteligencia competitiva. URUGUAY XXI Instituto de Promoción de Inversiones y Exportaciones
- Yuri JA, Neira A, Fuentes M, Razmilic I, Lepe V, González MF. 2020. Bagging cv. Fuji, Raku Raku Apple Fruit Affects Their Phenolic Profile and Antioxidant Capacity. *Erwerbs-Obstbau* 62:221–229. <https://doi.org/10.1007/s10341-020-00475-0>
- Yuri JA. 2010. Daño por sol en manzanas. *Fruticultura* 8:2–9