



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

DESARROLLO, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.) CULTIVADA BAJO CONDICIONES DE MALLA SOMBRA DE COLORES

**TESIS PROFESIONAL
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

**PRESENTA:
LUIS ALBERTO ARAGÓN RAMÍREZ**

**BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DRA. ANA MARÍA CASTILLO GONZÁLEZ**



APROBADA



CHAPINGO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO, JUNIO DE 2024

DESARROLLO, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.) CULTIVADA BAJO CONDICIONES DE MALLA SOMBRA DE COLORES

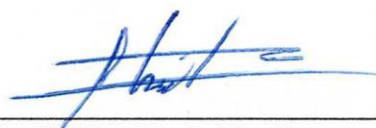
Tesis realizada por **Luis Alberto Aragón Ramírez**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: 
Dra. Ana María Castillo González

CO-DIRECTOR: 
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

ASESOR: 
Dra. María del Rosario García Mateos

ASESOR: 
Dr. Edilberto Avitia García

ASESOR: 
Dra. Ma. Carmen Ybarra Moncada

LECTOR EXTERNO: 
Dr. Efrén Fitz Rodríguez

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	ix
DEDICATORIA	xi
AGRADECIMIENTOS	xii
RESUMEN GENERAL	xiv
GENERAL ABSTRACT.....	xv
I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivo general.....	3
1.2.1. Objetivos específicos.....	3
1.3. Presentación de los capítulos	4
II. REVISIÓN DE LITERATURA	6
2.1. El cultivo de fresa	6
2.2. Efectos benéficos	6
2.3. Los antioxidantes	6
2.4. Calidad de fruto	7
2.5. La radiación y sus características	7
2.6. Radiación y fotosíntesis	8
2.7. Los pigmentos fotosintéticos.....	9
2.8. Los fotoreceptores	9
2.8.1 Fitocromos.....	10
2.8.2. Criptocromos.....	10
2.8.3. Fototropinas	10
2.8.4. UVR8.....	11
2.9. Fotosíntesis y CO ₂	11
2.10. Fotosíntesis y temperatura.....	12
2.11. Los metabolitos secundarios y radiación	13
2.11.1. Antocianinas.....	13

2.11.2. Carotenoides	14
2.11.3. Flavonoides	14
2.12. Mallas de color en los cultivos	14
2.12.1. Mallas de color y actividad fotosintética	15
2.12.2. Mallas de color y su efecto en la planta	16
2.13. Literatura citada.....	17
III. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL E INTERCAMBIO DE GASES EN HOJAS DE FRESA CV. CAMINO REAL BAJO MALLA SOMBRA DE COLORES	23
3.1. RESUMEN.....	24
3.2. ABSTRACT	25
3.3. INTRODUCCIÓN.....	26
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
3.5.1. Calidad y transmitancia de las mallas de color	29
3.5.2. Variables ambientales.....	29
3.5.3. Intercambio de gases en la hoja	32
3.5.4. Regresión múltiple: ambiente e intercambio de gases.....	35
3.5.5. Correlación canónica: ambiente e intercambio de gases.....	37
3.6. CONCLUSIONES.....	37
3.7. LITERATURA CITADA	38
IV. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, INTERCAMBIO DE GASES Y FISIOLOGÍA DE HOJAS DE FRESA CV. ALBIÓN BAJO MALLAS DE COLOR.....	43
4.1. RESUMEN.....	44
4.2. ABSTRACT	45
4.3. INTRODUCCIÓN.....	46
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	47
4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
4.6. CONCLUSIONES.....	62

4.7. LITERATURA CITADA	63
V. NUTRACEUTICAL QUALITY OF STRAWBERRY (<i>Fragaria x ananassa</i> Duch.) FRUITS FROM PLANTS CULTIVATED UNDER COLORED SHADE NETS	67
5.1. ABSTRACT	68
5.2. RESUMEN.....	69
5.3. INTRODUCTION	70
5.4. MATERIALS AND METHODS	71
5.4.1. Plant material and growing conditions.....	71
5.4.2. Temperature, relative humidity and spectral irradiance underneath the shade nets.....	72
5.4.3. Fruit physical characterization.....	72
5.4.4. Fruit chemical characterization.....	73
5.4.5. Fruit nutraceutical quantification.....	73
5.4.6. Statistical analysis	75
5.5. RESULTS	75
5.5.1. Fruit physical characterization.....	75
5.5.2. Fruit chemical characterization.....	76
5.5.3. Fruit nutraceutical quantification.....	77
5.5.4. Correlation and PCA between nutraceuticals	79
5.6. DISCUSSION	80
5.6.1. Fruit physical characterization.....	80
5.6.2. Fruit chemical characterization.....	81
5.6.3. Fruit nutraceutical quantification.....	82
5.6.4. Correlation and PCA between nutraceuticals	86
5.7. CONCLUSIONS	87
5.8. REFERENCES	87
VI. CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL EN <i>Fragaria x ananassa</i> Duch. CV. ALBIÓN CULTIVADA BAJO MALLAS DE COLOR.....	93

6.1. RESUMEN.....	94
6.2. ABSTRACT	95
6.3. INTRODUCCIÓN.....	96
6.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	98
6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	101
6.6. CONCLUSIONES.....	112
6.7. LITERATURA CITADA	113
VII. CONCLUSIONES GENERALES	116

LISTA DE CUADROS

Capítulo III

Cuadro 1. Efecto de la malla sombra de color sobre variables ambientales y del sustrato medidas al medio día solar (12:00 pm) en fresa cv. Camino Real.	31
Cuadro 2. Efecto de la malla sombra de color sobre variables de intercambio de gases e índice de clorofila medidas al medio día solar (12:00 pm) en hojas de fresa cv. Camino Real.	34
Cuadro 3. Regresión múltiple entre parámetros ambientales y de sustrato y de intercambio de gases en fresa cv. Camino Real.	36

Capítulo IV

Cuadro 1. Efecto de la malla sombra de color sobre variables ambientales y del sustrato en fresa cv. Albién.	53
Cuadro 2. Efecto de la malla sombra de color sobre variables de intercambio de gases en hojas de fresa cv. Albién.	55
Cuadro 3. Efecto de la malla sombra de color sobre azúcares solubles totales y variables anatómicas en hojas de fresa cv. Albién.	58
Cuadro 4. Efecto de la malla sombra de color sobre pigmentos en hojas de fresa cv. Albién.	61

Capítulo V

Table 1. Temperature, relative humidity and spectral irradiance ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$) measured under the colored shade nets assessed.	72
Table 2. Physical characteristics in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.	75
Table 3. Chemical characteristics in strawberry fruits cv. Albion cultivated under colored shade nets.	76
Table 4. Pearson correlation coefficients (r) between antioxidant compounds in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.	79

Capítulo VI

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa y radiación transmitida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por las mallas de color en plantas de fresa cv. Albión al medio día solar (12:00 pm).	99
Cuadro 2. Características de crecimiento de las plantas de fresa cv. Albión cultivadas bajo malla sombra de color.	102
Cuadro 3. Concentración de macronutrientes en hojas de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color.	108
Cuadro 4. Concentración de micronutrientes en hojas de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color.	108
Cuadro 5. Concentración de macronutrientes en la raíz y corona de la planta de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color.	109
Cuadro 6. Concentración de micronutrientes en la raíz y corona de la planta de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color.	109

LISTA DE FIGURAS

Capítulo III

Figura 1. Transmitancia medida bajo malla sombra de color al medio día solar (12:00 pm). Los datos son la relación en % entre la radiación medida fuera y dentro de las mallas.	42
Figura 2. Correlación canónica entre el primer par de variables canónicas y la correlación simple con sus respectivas variables originales. DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos, TAMB: temperatura del ambiente, TSUS: temperatura del sustrato, HR: humedad relativa, pH: pH del sustrato, ACO ₂ : asimilación de CO ₂ , Cest: conductancia estomática, Trans: transpiración, CO ₂ : CO ₂ intercelular, Thoja: temperatura de la hoja, IC: índice de clorofila.	42

Capítulo IV

Figura 1. Distribución de la irradiancia espectral de 280 a 800 nm en % (en relación al total) medida bajo malla sombra de color en fresa cv. Albión.	52
Figura 2. Cortes anatómicos de la hoja de fresa cv. Albión (40x) cultivada bajo malla sombra de colores. a) malla negra, b) malla azul, c) malla verde, d) malla beige y e) testigo.	59

Capítulo V

Fig. 1. Chemical characterization in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets as influenced by far red light (700 - 800 nm). a) Total soluble sugars, b) Total soluble solids, c) Titratable acidity, d) pH and e) TSS/TA ratio.	77
Fig. 2. Antioxidants concentration in strawberry fruit cv. Albion cultivated under varying colored shade nets. a) Phenols, b) Flavonoids, c) Anthocyanins, d) Ascorbic acid, and e) Antioxidant capacity. Data are expressed as mean $\pm$ standard error of nine replications. Different letters indicate significant statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$). GAE: Gallic acid equivalents, QE: Quercetin equivalents, CGE: Cyanidin-3-glucoside equivalents, ASCE: Ascorbic acid equivalents, TE: Trolox equivalents.	78

Fig. 3. Principal component analysis of antioxidants in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.	80
--	----

Capítulo VI

Figura 1. Transmitancia medida bajo malla sombra de color al medio día solar (12:00 pm). Los datos son la relación en % entre la radiación medida fuera y dentro de las mallas.	99
Figura 2. Características de crecimiento de la planta de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) Peso fresco de la planta, b) Peso seco de la planta, c) Peso seco de la hoja, d) Peso seco de la corona, e) Peso seco de la raíz, f) Peso seco del estolón y g) Peso específico de la hoja. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).	103
Figura 3. Rendimiento de fruto de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) gramos de fruto por planta, b) Peso del fruto y c) número de frutos por planta. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de nueve repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (prueba de Dunn para frutos por planta, y Tukey para el resto, $p \leq 0.05$).	107
Figura 4. Nutrientes en mg por g de peso seco en hojas de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) N, b) P, K, Ca y Mg, c) Fe, d) Cu, Zn y e) B, Mn y Mo. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).	111
Figura 5. Nutrientes en mg por g de peso seco en la raíz y corona de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) N, b) P, K, Ca y Mg, c) Fe, d) Cu, Zn y e) B, Mn y Mo. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).	112

DEDICATORIA

A mis padres Martha y Alfredo por siempre brindarme su apoyo incondicional, por haberme enseñado que siempre hay que mantener una buena actitud para salir adelante ante cualquier situación.

A mi esposa Viri por todo su apoyo a lo largo de este proceso, por su cariño, amor y consejos que siempre me dieron motivación, por todas las vivencias y aprendizajes durante esta aventura y por haberme dado durante esta etapa de la vida a ese bebé tan hermoso llamado Kai Teot.

A mis hermanos Benny y Edna por los buenos momentos durante este tiempo.

A mis sobrinos Frida y Emilio.

Los amo.

AGRADECIMIENTOS

A la noble Universidad Autónoma Chapingo, al Posgrado del Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia y a la coordinación del Posgrado, por el apoyo brindado durante los estudios de Doctorado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT), por haber apoyado la continuación de los estudios de posgrado, así como por el apoyo complementario para paternidad brindado.

A la Dra. Ana María Castillo González, por el apoyo para la realización de este trabajo y a lo largo de todo el posgrado, sobre todo en los tiempos complicados de la pandemia, por su tiempo otorgado para las revisiones, por sus sugerencias, sus consejos, su gran experiencia y su vocación que ayudaron a culminar este proyecto.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por el apoyo brindado, por sus sugerencias y comentarios que ayudaron con el establecimiento, mantenimiento del cultivo y que enriquecieron este trabajo.

A la Dra Rosario García Mateos, Dr. Edilberto Avitia García, Carmen Ybarra Moncada y al Dr. Efrén Fitz Rodríguez por sus valiosas recomendaciones, sugerencias, revisiones, correcciones y por todo el tiempo y apoyo brindado tanto en el laboratorio, asesorías e instrumentación que ayudó a llevar a cabo, enriquecer y completar este trabajo.

A mis profesores del posgrado, por su entusiasmo brindado durante las clases y por transmitir su conocimiento con gran vocación.

A la QFB Ángela Barrera Cortez y a la Dra. Lyzbeth Hernández Ramos por su apoyo, asesoría y gran disposición durante los análisis de laboratorio.

A Héctor Delín por los buenos momentos y el apoyo siempre brindado durante todo el posgrado.

A mis compañeros y buenos amigos que hice en Chapingo y a cada una de las personas que me ayudaron y contribuyeron a la realización de este trabajo.

Muchas gracias.

DATOS BIOGRÁFICOS

Luis Alberto Aragón Ramírez nació el 30 de agosto de 1989 en la Ciudad de México (CDMX). Realizó sus estudios de licenciatura en Biología en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la generación 2008-2015, obteniendo el título de Biólogo. En 2016 laboró como educador ambiental en el Centro de Educación Ambiental Ecoguardas del gobierno de la ciudad de México realizando impartición de pláticas sobre el medio ambiente, talleres y huertos urbanos. En el 2017 ingresó al Posgrado de Horticultura del departamento de Fitotecnia en la Universidad Autónoma Chapingo donde realizó sus estudios de Maestría en Ciencias en Horticultura, en el 2018 realizó una estancia académica en la Universidad de Almería (UAL), España, realizando actividades de apoyo a la investigación en cultivos bajo invernadero, también realizó formación complementaria en el curso de verano Study Abroad, Horticultura Protegida Sostenible: Sistemas de Cultivo sin Suelo e Hidroponía, impartido en la Universidad de Almería (UAL). Posteriormente en el 2020 realizó sus estudios de Doctorado en Ciencias en Horticultura en la Universidad Autónoma Chapingo.



RESUMEN GENERAL

DESARROLLO, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE FRESA (*Fragaria x ananassa* Duch.) CULTIVADA BAJO CONDICIONES DE MALLA SOMBRA DE COLORES

El fruto de fresa tiene alta demanda a nivel mundial, ya que posee propiedades organolépticas y nutraceuticas benéficas para la salud humana. La malla sombra de color puede modificar la cantidad, calidad de radiación y promover respuestas fisiológicas en la planta, modificando el crecimiento, rendimiento y contenido nutraceutico del fruto; sin embargo, los efectos son variados, por lo que es importante conocer si es posible lograr un mejor desarrollo de la planta de fresa con el uso de esta tecnología. Se caracterizó la calidad y cantidad de radiación transmitida por mallas de color negro, azul, verde y beige, así como el ambiente generado y el intercambio de gases en las hojas de la planta de fresa cv. Camino Real, además de características anatómicas y pigmentos en la hoja de la planta de fresa cv. Albión. La malla sombra negra disminuyó la temperatura ambiental, aumentó la humedad relativa y en las hojas incrementó la conductancia estomática. La malla sombra verde y negra disminuyeron la DFFF, el número de capas de parénquima de la hoja, estomas y clorofila total, por otra parte, la malla verde, negra y beige disminuyeron la tasa fotosintética y aumentaron el CO₂ intercelular en la hoja, también la malla verde y beige disminuyeron la concentración de azúcares solubles totales. También se determinó el efecto de las mallas de color sobre la calidad física, química y nutraceutica en el fruto, así como el crecimiento, rendimiento y nutrimentos. Los frutos de las plantas cultivadas bajo la malla azul y beige desarrollaron mayor concentración de azúcares solubles totales y la malla azul mayor cantidad de antocianinas. Los frutos obtenidos en la malla beige presentaron más acidez titulable y compuestos fenólicos que el testigo. Las plantas cultivadas en la malla azul tuvieron mayor área foliar, largo de peciolo, longitud y volumen de raíz, mayor peso fresco y peso seco total de la planta que el resto de las mallas, pero no mayor al testigo. El rendimiento con la malla negra y verde fue menor que el testigo. La concentración de K, Fe, Cu, Zn y Mn en las hojas dependió del color de la malla.

Palabras clave: Calidad de radiación, tasa fotosintética, clorofila, nutrimentos, rendimiento, nutraceuticos.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Luis Alberto Aragón Ramírez

Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

GENERAL ABSTRACT

DEVELOPMENT, YIELD AND QUALITY OF STRAWBERRY (*Fragaria x ananassa* Duch.) GROWN UNDER COLORED SHADE NETS

Strawberry fruit has a high demand worldwide for its organoleptic and nutraceutical properties that are beneficial to human health. Colored shade nets can modify the quantity and quality of light and promote physiological responses in the plant, modifying growth, yield, and nutraceutical content of the fruits; however, the effects are variable, so it is important to know if it is possible to achieve better development of the strawberry plant using this technology. The quality and quantity of light transmitted by black, blue, green and beige nets were characterized, as well as the environment generated and the gas exchange in the leaves of the strawberry plant cv. Camino Real, in addition to the anatomical characteristics and pigments in the leaves of the strawberry plant cv. Albion. The black shade net decreased ambient temperature, increased relative humidity, and increased stomatal conductance in leaves. Green and black shade nets decreased PAR, the number of leaf parenchyma layers, stomata, and total chlorophyll, on the other hand, green, black and beige nets decreased photosynthetic rate and increased intercellular CO₂ in the leaf, also green, and beige netting decreased total soluble sugars concentration. The effect of the colored nets on the physical, chemical and nutraceutical quality of the fruit, as well as growth, the yield, and nutrient content, were also determined. The fruits of the plants grown under the blue and beige nets developed a higher concentration of total soluble sugars and the plants under the blue net showed a higher anthocyanins concentrations. The fruits obtained in the beige net had higher titratable acidity and phenolic compounds than the control. Plants grown in the blue net had greater leaf area, petiole length, root length and volume, fresh weight, and total plant dry mass than the rest of the nets, but not greater than the control. Yield in plants under the black and green nets was lower than the control. The concentration of K, Fe, Cu, Zn, and Mn in the leaves depended on the net color.

Keywords: Light quality, photosynthetic rate, chlorophyll, nutrients, yield, nutraceuticals.

Doctoral Thesis in Science, in Horticulture, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo

Author: Luis Alberto Aragón Ramírez

Advisor: Dra. Ana María Castillo González

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México el cultivo de fresa es importante desde el punto de vista socioeconómico, debido a que genera empleo y divisas por ser un producto de exportación para su consumo en fresco, congelado y procesado (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020). A pesar de ser un cultivo originario de zonas templadas y cálidas del hemisferio Norte, se ha logrado establecer en latitudes bajas de los trópicos y altas de los subtrópicos (Hancock, 2020). México es uno de los principales países productores y exportadores, sobre todo hacia Estados Unidos; ocupa el tercer lugar mundial en producción de fresa, aproximadamente el 70 % de la producción se concentra en el estado de Michoacán, Baja California y Guanajuato (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020).

El fruto de fresa es muy apreciado a nivel mundial, debido a que contiene una diversidad de propiedades organolépticas y nutraceuticas como vitamina C y compuestos fenólicos entre otros, los cuales poseen una fuerte capacidad antioxidante, importante en la prevención de enfermedades neurodegenerativas y cardiovasculares (Seeram, 2008; Stevenson & Scalzo, 2012), por lo que es considerado un alimento funcional (Giampieri et al., 2014). Dentro de las principales investigaciones generadas en fresa, destacan las enfocadas a su nutrición, vida postcosecha, rendimiento y calidad de fruto; esto debido a la gran demanda que posee en el mercado, ya que en los últimos años los países importadores han incrementado los estándares de calidad, por lo cual se estima que en un futuro el mercado exigirá sólo fruta de mayor calidad nutraceutica e inocuidad, por lo que los retos que enfrentará este cultivo están relacionados con la implementación de estrategias para desarrollar tecnología que permita incrementar el rendimiento y mejorar la calidad del fruto (Secretaría de Agricultura y Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017).

El uso de mallas en la agricultura puede proveer a los cultivos protección contra radiación excesiva, vientos o plagas (Shahak, 2008), la malla sombra negra

usada de manera convencional, modifica la cantidad de radiación que recibe la planta; por otra parte, las mallas de color o foto-selectivas, pueden modificar la calidad de radiación y promover la transmisión de longitudes de onda específicas (Stamps, 2009; Whitelam & Halliday, 2007), lo que puede resultar en la estimulación de respuestas fisiológicas reguladas por la radiación como la fotosíntesis y la fotomorfogénesis, dependiendo del grado de sombreado y el color usado, puede desencadenar cambios en el crecimiento de ramas, brotes, frutos y a su vez influir en el tiempo de cosecha y calidad de fruto (Retamales et al., 2008), también pueden aliviar el estrés ambiental del cultivo incrementando los rendimientos y adelantando la cosecha (Lobos et al., 2009). Se ha reportado que al modificar la cantidad de radiación UV, por medio de las mallas de color, es posible incrementar el crecimiento y desarrollo de la planta (Retamales et al., 2008; Stamps, 2009), aumentar el rendimiento, tiempo de cosecha (Arthurs et al., 2013); así como el contenido nutraceutico del fruto (Zoratti et al., 2015).

Las mallas de color son una herramienta relativamente nueva; sin embargo, los efectos son variados y la respuesta en la planta puede diferir incluso entre cultivares, esto debido a que las mallas de color tienen numerosos efectos, además de la foto-selectividad; la cual puede cambiar con el tiempo (Stamps, 2009). Es importante que los investigadores provean descripciones completas de las condiciones experimentales, calidad y cantidad de radiación, así como parámetros del microclima, los cuales pueden contribuir a una mejor determinación de los factores causantes de las variaciones en los resultados reportados (Stamps, 2009).

La importancia de las mallas para el cultivo de fresa, radica en que de acuerdo con la Dávalos et al. (2011), la competitividad y rentabilidad de la industria de fresa en México, dependerá de mejorar las técnicas de producción que permitan disminuir los costos y el establecimiento del cultivo en zonas con producción de mejor calidad, durante las épocas de mayor demanda en el mercado mundial, por lo cual es importante conocer si es posible lograr un mejor desarrollo de la

planta por medio del uso de tecnología más económica, como las de mallas de color que pueda repercutir en un mayor rendimiento y calidad de fruto.

1.1. Hipótesis

Al modificar la calidad de radiación que incide en el cultivo por medio de malla sombra de diferentes colores, será posible obtener respuestas de crecimiento distintas en las plantas.

1.2. Objetivo general

Evaluar el efecto de mallas sombra de distintos colores (negro, azul, verde y beige) en el ambiente que se genera en su interior y en la calidad y rendimiento del fruto del cultivo de fresa bajo estas condiciones, e identificar si algún color puede ser considerado como un sistema de producción alternativo.

1.2.1. Objetivos específicos

- a) Definir las condiciones ambientales que se generan por el color de cada malla, así como su influencia en el intercambio de gases de la hoja de la planta de fresa cv. Camino Real.
- b) Conocer cómo se modifican las condiciones ambientales que se generan por el color de cada malla, el intercambio de gases de la planta, así como el efecto en la concentración de azúcares, pigmentos y anatomía de la hoja de la planta de fresa cv. Albión.
- c) Determinar el efecto de las mallas de color sobre los parámetros de calidad y contenido de sustancias nutraceuticas en el fruto de fresa cv. Albión.
- d) Determinar el efecto de las mallas de color en el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental en la planta de fresa cv. Albión.

1.3. Presentación de capítulos

Para llevar a cabo los objetivos anteriores en esta tesis se desarrollaron siete capítulos que se describen brevemente:

En el Capítulo I se presentó la introducción general, en el Capítulo II se presenta la revisión de literatura.

En el Capítulo III se caracterizó la calidad y cantidad de radiación transmitida por las mallas, se registraron parámetros ambientales y de sustrato, se midió el intercambio de gases en las hojas de la planta de fresa cv. Camino Real con la finalidad de conocer las condiciones ambientales que se generan por el color de cada malla. La malla sombra negra disminuyó la temperatura ambiental, aumentó la humedad relativa y en las hojas incrementó la conductancia estomática. La DFFF y el pH del sustrato tuvieron mayor influencia sobre el intercambio de gases en la hoja.

El Capítulo IV muestra la caracterización de las condiciones ambientales de crecimiento, el intercambio de gases con el propósito de definir su efecto sobre características anatómicas y pigmentos en la hoja de la planta de fresa cv. Albión. La malla sombra verde y negra disminuyeron la DFFF, el número de capas de parénquima en empalizada, grosor de la hoja, estomas y clorofila total, por otra parte, la malla verde, negra y beige disminuyeron la tasa fotosintética y aumentaron la concentración de CO₂ intercelular en la hoja, también la malla verde y beige disminuyeron la concentración de azúcares solubles totales.

En el Capítulo V se determinó el efecto de las mallas de color sobre los parámetros de calidad física, química y contenido de sustancias nutraceuticas en el fruto de fresa cv. Albión, con el propósito de conocer si algún color de malla pudo favorecer una mayor calidad nutraceutica en el fruto. Los frutos de las plantas cultivadas bajo la malla azul y beige desarrollaron mayor concentración de azúcares solubles totales y la malla azul mayor cantidad de antocianinas. Los frutos obtenidos en la malla beige presentaron más acidez titulable y compuestos fenólicos que el testigo.

En el Capítulo VI se reporta el crecimiento, rendimiento y nutrimentos en plantas de fresa cv. Albión bajo malla sombra de color, con el propósito de Identificar como las mallas de color modifican el desarrollo y producción de la planta. Las plantas cultivadas en las mallas de color fueron más altas que el testigo. Las plantas cultivadas en la malla azul tuvieron mayor área foliar, largo de peciolo, mayor longitud y volumen de raíz, también presentaron mayor peso fresco y peso seco total de la planta que el resto de las mallas, pero estos fueron similares al testigo. Los días transcurridos de flor a fruto en la malla negra y verde fueron mayores que en el testigo, malla azul y beige. El rendimiento con la malla negra y verde menor que el testigo. La concentración de K, Fe, Cu, Zn y Mn en las hojas dependió del color de la malla.

Por último, en el Capítulo VII se presentan las conclusiones generales.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. El cultivo de fresa

La fresa cultivada es una frutilla que se caracteriza por su delicado sabor y alto contenido en vitaminas y antioxidantes, por lo que es incluida en la dieta de millones de personas (Hancock, 2020). Es cultivada en regiones agrícolas que se localizan desde el Ártico hasta los trópicos (Hancock, 2020). Debido a que México cuenta con una diversidad de microclimas, ha sido posible la adaptación de este cultivo con buenos resultados en estados como Michoacán, Baja California, Guanajuato, centro de México, Aguascalientes, Jalisco, Puebla y Sinaloa (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020). De acuerdo con datos reportados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024), México ocupa el tercer lugar en el ranking mundial en producción de fresa.

2.2. Efectos benéficos

El fruto de fresa posee una gran diversidad de propiedades organolépticas y contenido fitoquímico como vitamina C y compuestos fenólicos, entre otros, los cuales poseen una fuerte capacidad antioxidante; estos antioxidantes tienen un papel importante en la prevención de enfermedades para la salud humana, por lo que estos frutos son considerados un alimento funcional (Giampieri et al., 2014). De acuerdo con Basu et al. (2014) los efectos benéficos que posee la fresa en la salud son atribuidos a una sinergia entre los nutrientes y los fitoquímicos en los frutos.

2.3. Los antioxidantes

Son moléculas que inhiben la acción destructiva de los radicales libres, pueden proteger a las células de los efectos nocivos producto de agentes oxidantes, ya que pueden contrarrestar de manera directa o indirecta sus efectos, pueden ser enzimas producidas por el organismo o sustancias provenientes de los alimentos como en el caso de la fresa y otras frutillas como arándano, frambuesa o zarzamora (Flieger et al., 2021; Halliwell, 2006). Las moléculas

antioxidantes tienen la capacidad de ceder fácilmente un electrón, cuando estas se encuentran con un radical libre de oxígeno (molécula que posee uno o más electrones desapareados en su último orbital atómico por lo que es muy inestable, altamente reactivo y un agente altamente oxidante), las moléculas antioxidantes ceden su electrón y el radical libre se estabiliza, detiene las posibles reacciones en cadena que provocan su efecto oxidante; la molécula antioxidante al ceder su electrón se oxida convirtiéndose en una sustancia inocua (Halliwell, 2006).

2.4. Calidad de fruto

La calidad del fruto de fresa es producto de la interacción entre la variedad y los factores pre cosecha como el clima y prácticas culturales, como el proceso de maduración del fruto se detiene en la cosecha, entonces este debe ser cosechado en la madurez para asegurar un buen sabor y calidad, esto debido a que la calidad del fruto no puede ser mejorada después de la cosecha, por lo que se emplean los índices de madurez, por ejemplo, el color, el contenido de sólidos solubles y la acidez titulable son usados como índices de cosecha; además se considera también la coloración como parámetro en más de 2/3 partes de la superficie del fruto (color rosa o rojo), un mínimo de sólidos solubles de 7 % y un máximo de acidez titulable de 0.8 % son aceptados como una medida mínima para el tiempo de cosecha (Taghavi et al., 2019; Zhao, 2007).

2.5. La luz y sus características

La luz posee características tanto de onda como de partícula, una onda se caracteriza por una longitud (λ) y una frecuencia; por otra parte, la partícula se conoce como fotón y cada fotón contiene una cantidad de energía, entonces la luz del sol actúa como una lluvia de fotones de diferentes frecuencias, donde el ojo humano sólo es sensible a un pequeño intervalo (luz visible del espectro electromagnético) (Kosai et al., 2016; Taiz & Zieger, 2006). De acuerdo con Kosai et al. (2016), la intensidad de luz puede ser clasificada en tres categorías

de medición: radiometría (basada en energía, se mide como irradiancia y su unidad es el W m^{-2}), fotometría (basada en luminosidad, se mide como iluminancia y su unidad es el lm m^{-2}) y fotonmetría (basada en medición de fotones, se mide como densidad de flujo de fotones y su unidad es el $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), esta última es la que debe ser usada para describir la intensidad de luz cuando se desea conocer la respuesta de la planta a la luz, debido a que muchas respuestas de la planta son observadas como resultado de reacciones fotoquímicas.

El intervalo del espectro electromagnético que es visible para el ojo humano va de 380 a 750 nm, donde las longitudes de onda más cortas corresponden a la luz violeta, las cuales poseen fotones de energía alta; por el contrario, las longitudes de onda más largas se encuentran alrededor de los 750 nm que pertenecen a luz roja y poseen fotones con baja energía (Berkovich et al., 2017). Las plantas entre otros organismos, emplean la luz en la fotosíntesis, por lo que el intervalo de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) o también definida como la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) está definido entre 400 a 700 nm, aunque algunos autores redefinieron el concepto como RFA extendida (RFAe) de 400 a 750 nm donde menciona que el espectro del infrarojo cercano (700-750) también afecta de manera significativo el desarrollo de las plantas (Zhen et al., 2021), y por otra parte, el resto de longitudes de onda emitidas por el sol no son usadas de igual modo en este proceso (Geilfus, 2019). La RFA puede ser dividida en región azul (400 a 500 nm), verde (500 a 600 nm) y roja (600 a 700 nm), también se ha reportado que la planta puede responder a regiones de luz UV (< 400 nm) y rojo lejano (700 - 800 nm) (Whitelam & Halliday, 2007).

2.6. Luz y fotosíntesis

De acuerdo con Taiz y Zieger (2006), la fotosíntesis consta de dos fases, una fase luminosa y otra de fijación de CO_2 ; la fase luminosa está basada en la captación de energía lumínica, cuyo resultado es la formación de ATP y

NADPH, que es la energía usada para muchos procesos en el metabolismo de la planta, incluida la fase de fijación de CO₂.

El efecto de la luz en la planta radica en los fotosistemas y el tipo de luz que estos reciben, ya que dependiendo de la cantidad o calidad de luz su eficiencia disminuye, también si reciben un exceso de luz, los fotosistemas pueden sufrir daños al generarse especies reactivas de oxígeno (Goh et al., 2012); se ha reportado que el fotosistema II puede ser fácilmente dañado si existe un exceso de excitación hacia el centro de reacción, lo que ocasiona su inactivación (fotoinhibición), esto aunado a que el Fotosistema I es vulnerable al daño por especies reactivas de oxígeno (Goh et al., 2012; Taiz & Zeiger, 2006).

2.7. Los pigmentos fotosintéticos

Los pigmentos involucrados en la fotosíntesis son las clorofilas y carotenoides principalmente, las clorofilas a y b son abundantes en las plantas verdes y la c y d en algunos protistas y cianobacterias (Taiz & Zeiger, 2006). Las clorofilas pueden absorber longitudes de onda de 400 a 480 nm y de 600 a 700 nm (Taiz & Zeiger, 2006). Por otra parte, los carotenoides pueden absorber longitudes de 400 a 500 nm (Naznin & Lefsrud 2017), estos además, tienen un papel como pigmentos accesorios debido a su función fotoprotectora, ya que la membrana fotosintética puede ser fácilmente dañada por grandes cantidades de energía absorbida por los pigmentos (Esteban et al., 2014), si esta energía no puede ser almacenada, este mecanismo funciona como una válvula de seguridad que disipa el exceso de energía (Geilfus, 2019; Pessaraki, 2018).

2.8. Los fotoreceptores

La luz además de tener un efecto sobre la fotosíntesis también puede tener un efecto sobre otros procesos fisiológicos como la apertura de estomas, fototropismo y foto-morfogénesis (Pessaraki, 2018). La luz es percibida por moléculas sensibles conocidas como fotorreceptores, estas moléculas detectan señales de la luz y pueden inducir procesos fisiológicos o morfológicos como la floración, dependiendo de la intensidad, calidad y fotoperiodo (Viršilė et al.,

2017). Existen varios tipos de proteínas fotorreceptoras, entre ellos los fitocromos; principales receptores que absorben luz roja/rojo lejano (de 600 a 750 nm) (Higuchi & Hisamatsu 2016), los criptocromos y fototropinas que absorben luz azul/UV-A y el fotorreceptor UVR8 que absorbe luz UV-B, muchos de estos grupos de fotorreceptores contienen más de un miembro y comparten un grado de similitud entre individuos de la misma familia (Mawphiang & Kharshiing, 2017). Según Kharshiing y Sinha (2015) la acción de los fotorreceptores puede influenciar el crecimiento de la planta en diferentes etapas de desarrollo y su acción incluye germinación de semillas, arquitectura de la planta, floración, reproducción, acumulación de biomasa y senescencia (Mawphiang & Kharshiing, 2017).

2.8.1 Fitocromos

Permiten a la planta cuantificar la sombra a su alrededor al detectar cambios en la relación rojo/rojo lejano y de esta manera desencadenar una respuesta sobre todo en altas densidades de plantas, la cual puede proveerle ventajas competitivas sobre sus vecinos que compiten por el recurso limitante de luz; también son los responsables de la germinación y junto con los criptocromos actúan en la sincronización circadiana y floración (Kadomura-Ishikawa et al., 2013).

2.8.2. Criptocromos

Participan en procesos desde la fotomorfogénesis hasta la sincronización del reloj circadiano, por medio del cual la planta puede ubicarse en el tiempo, sobre todo en especies con fotoperiodo variable, su acción puede ser desencadenada por la luz azul UV-A (Kadomura-Ishikawa et al., 2013; Mawphiang & Kharshiing, 2017).

2.8.3. Fototropinas

Pueden fungir como receptor de la luz azul UV-A, controlar la apertura de los estomas y la alteración de los patrones de crecimiento en respuesta a la

radiación incidente (fototropismo) (Taiz & Zeiger, 2006). Por ejemplo, el movimiento de los cloroplastos a la respuesta de distintas intensidades luminosas cuando las plantas son expuestas a condiciones de baja luminosidad, tanto la phot1 y phot2 inducen la acumulación de cloroplastos en la superficie de las células del mesófilo en empalizada para maximizar la captura de luz (Kadomura-Ishikawa et al., 2013; Mawphiang & Kharshiing, 2017). Por el contrario; en alta luminosidad pueden mediar el arreglo de los cloroplastos de manera paralela a la dirección de la fuente de luz para minimizar un posible daño (Kadomura-Ishikawa et al., 2013; Mawphiang & Kharshiing, 2017).

2.8.4. UVR8

Utilizado como una señal de aclimatación y sobrevivencia a luz UV, las respuestas morfogénicas incluyen alteraciones en área foliar, grosor, masa e índice estomático (Mawphiang & Kharshiing, 2017). Las plantas expuestas a radiación UV-B también muestran decremento en el contenido de clorofila y en la relación clorofila a/b, algunos autores reportaron que la radiación UV-B también puede inducir la acumulación de metabolitos secundarios como flavonoides, los cuales son controlados por este fotorreceptor (Mawphiang & Kharshiing, 2017).

2.9. Fotosíntesis y CO₂

La cuantificación de la fijación de CO₂ en las hojas permite conocer la respuesta a la luz y proporciona información sobre propiedades fotosintéticas de las hojas. En la oscuridad no hay asimilación fotosintética de carbono, por lo que la planta libera CO₂ como consecuencia de la respiración. A medida que el flujo de fotones aumenta la asimilación de CO₂ también se incrementa (Driesen et al., 2020; Pavel & Dejong 1993). Los valores en las plantas de sombra son más bajos debido a que la tasa de respiración es menor, esto parece representar una adaptación que permite a las plantas de sombra sobrevivir en ambientes con luz limitada (Pessaraki, 2018; Pessaraki, 2021).

Otro factor importante que influye en la fotosíntesis es el nivel de CO_2 , el CO_2 difunde desde la atmósfera a las hojas a través de los estomas, debido a que la cutícula que cubre la hoja, prácticamente impermeable al CO_2 , de este modo el CO_2 pasa por espacios aéreos intercelulares, por las células del mesófilo hasta los cloroplastos (Evans, 1999), en presencia de cantidades adecuadas de luz, altas concentraciones de CO_2 permiten mantener tasas fotosintéticas altas y bajas concentraciones de CO_2 pueden limitar el nivel de fotosíntesis (Pessarakli, 2018). La ruta de difusión del CO_2 al interior del cloroplasto es una fase gaseosa, el resto de la ruta de difusión se considera una fase líquida, en la cual el CO_2 se disuelve en el agua de las paredes celulares y difunde a la célula y a los sitios de carboxilación en el cloroplasto, usando la misma ruta, pero en sentido contrario va el agua que sale de la hoja (Taiz & Zeiger, 2006). Como el CO_2 y el agua comparten esa misma ruta, un descenso en la resistencia estomática por apertura de estomas facilita una mayor incorporación de CO_2 a la hoja, pero también implica una pérdida sustancial de agua (Pessarakli, 2021).

2.10. Fotosíntesis y temperatura

De acuerdo con Taiz y Zeiger (2006) la tasa fotosintética y la temperatura tienen una relación, donde la fotosíntesis llega a un punto óptimo, si la temperatura continúa aumentando, la tasa de fotosíntesis disminuye a tal grado que este descenso puede ser asociado con efectos deletéreos reversibles y no reversibles como la fotorrespiración. En concentraciones ambientales de CO_2 , la fotosíntesis está limitada por la actividad de la Rubisco (Ribulosa biscofosfato carboxilasa/oxigenasa), cuando la temperatura va aumentando, existe un aumento de la tasa de carboxilación y un descenso en la afinidad de la rubisco por el CO_2 (Mathur et al., 2014) y las tasas respiratorias también aumentan. De acuerdo con lo anterior, las plantas de distintas especies que crecen en hábitats con diferentes temperaturas tienen diferentes temperaturas óptimas para la fotosíntesis y plantas de la misma especie que crecen a diferentes temperaturas muestran una temperatura óptima que se correlaciona con la temperatura a la

cual crecieron, estos cambios juegan un papel importante, pues contribuye a la adaptación de planta a distintos entornos (Davison, 1991; Choi, 2021).

2.11. Los metabolitos secundarios y luz

Son productos intermediarios que juegan un papel en la interacción celular de la planta con su ambiente (Velpoorte & Alfermann, 2000). Tienen la función de comunicación, polinización, inhibición de herbivoría, o pigmentación (protección contra exceso de luz) (Geilfus, 2019). La luz juega un papel importante en la síntesis y activación de algunos metabolitos secundarios, ya que dependiendo de la intensidad y calidad puede causar estrés en la planta, ya sea por daños en los fotosistemas por exceso de luz, exposición a radiación de alta energía, producción de radicales libres de oxígeno, sobrecalentamiento o daño en las membranas, por lo que las plantas contrarrestan ese estrés sintetizando compuestos como antocianinas, carotenoides o flavonoides (Warner et al., 2021).

2.11.1. Antocianinas

Son pigmentos presentes en las hojas, flores, frutos y en ocasiones en la raíz (Geilfus, 2019), producidas en órganos en respuesta a factores de estrés abióticos y no abióticos relacionados con la radiación UV, temperatura, sequía o en defensa contra agentes antimicrobiales. Responden a factores como la luz y temperatura, se ha reportado que algunos cultivos presentan un decremento en antocianinas y flavonoles al reducir la radiación por medio de malla sombra (Chen, 2015; Pascual-Teresa & Sanchez-Ballesta, 2008). La luz con suficiente cantidad de energía y apropiada composición espectral como la luz azul-violeta y UV son las más efectivas para iniciar la síntesis de antocianinas, por el contrario, la luz del rojo lejano es la menos efectiva e incluso inhibe la síntesis (Jakopic et al., 2007).

2.11.2. Carotenoides

Son pigmentos dominantes en flores, frutos y están presentes en otros órganos como la raíz, absorben la energía luminosa para la fotosíntesis, protegen a la clorofila de daños por radiación y sirven como antioxidantes (Geilfus, 2019), cuando la planta está expuesta a una gran cantidad de luz, si el estado excitado de la clorofila no es rápidamente controlado puede ocasionar reacciones con oxígeno molecular formando un estado excitado de oxígeno (O_2), el cual es extremadamente reactivo y puede dañar componentes celulares como los lípidos, entonces los carotenoides ejercen su acción fotoprotectora, ya que controlan rápidamente el estado excitado de la clorofila (Taiz & Zieger, 2006).

2.11.3. Flavonoides

Están involucrados en la filtración UV, en la fijación simbiótica de N y proveen protección contra la oxidación (Geilfus, 2019), pueden proteger de daños ocasionados por luz de longitudes de onda corta como la luz UV, absorben la luz a menores longitudes de onda que las antocianinas (Geilfus, 2019). Las flavonas y flavonoles no están restringidos a las flores, también están presentes en las hojas, tienen la función de proteger a las células de radiación excesiva UV-B (280 a 320 nm), debido a que se acumulan en la pared epidermal de las hojas y tallos, entonces absorben la luz fuertemente en la región UV-B mientras permiten el paso de la radiación fotosintéticamente activa, la cual es más eficiente para la planta (Geilfus, 2019). La exposición de las plantas a luz UV-B ha demostrado el incremento de la síntesis de flavonas y flavonoles (Geilfus, 2019; Taiz & Zieger, 2006).

2.12. Mallas de color en los cultivos

Con el objetivo de establecer un medioambiente que permita obtener producción fuera de temporada y frutos de mejor calidad, los productores han empleado macrotúneles enfocados a mejorar el rendimiento del cultivo (Takeda et al., 2010). Sin embargo, una alternativa es el uso de malla sombra, la cual permite controlar el crecimiento de las plantas al reducir la intensidad de luz y al

modificar las condiciones microambientales, como la temperatura del aire y del suelo (Manja & Aoun, 2019; Zhao et al., 2012). La eficiencia de la malla está influenciada por el factor de sombreo, el cual es un parámetro comercial que describe la habilidad para absorber o reflejar radiación solar, la cual a su vez depende del color de la malla, el tamaño de poro y la textura (Castellano et al., 2008). Si se incrementa el factor de sombreo entonces la cantidad de radiación que se bloquea será mayor para la vegetación que está bajo la malla, afectando de este modo la temperatura y la humedad relativa (Stamps, 2009).

Por otra parte, el uso de mallas sombra de color o también llamadas mallas foto-selectivas, a diferencia de la malla sombra negra tradicional, la cual es completamente opaca y no modifica la calidad del espectro de radiación (Shahak, 2008), éstas contienen aditivos que filtran la radiación solar para promover la transmisión de una longitud de onda específica (Stamps, 2009). Las mallas son hechas de polipropileno o polietileno tejido, contienen diversos cromóforos los cuales son elementos dispersantes/reflectivos (Zoratti et al., 2015). Las combinaciones de cromóforos permiten a las mallas filtrar longitudes de onda específicas basadas en respuestas fisiológicas deseadas (Zoratti et al., 2015).

2.12.1. Mallas de color y actividad fotosintética

De acuerdo con Manja y Aoun (2019), un sombreo elevado puede disminuir la temperatura de la hoja y la demanda evaporativa e incrementar la fotosíntesis, este incremento puede guiar a una mayor producción de carbohidratos y mejor eficiencia en el uso de agua, lo que puede resultar en un mayor rendimiento. Las hojas que están bajo sombra tienen una mayor actividad fotosintética debido a un menor cierre de estomas y a un menor daño en el fotosistema II causado por un exceso de radiación (Jutamanee & Onnom, 2016). De acuerdo con Rajapakse y Shahak (2008) cuando se incrementa la luz de color rojo y azul las plantas mejoraron la fotosíntesis y su productividad, debido a que la clorofila a y b tienen un potencial de absorción mayor en la región azul y roja, entonces el incremento en estos dos tipos de luz se puede lograr al cubrir el cultivo con

mallas sombra de color rojo y azul. Asimismo, Sivakumar et al. (2018) reportaron que cuando una alta intensidad de luz roja llega a los cultivos la síntesis de enzimas fotosintéticas se incrementa y también el contenido de clorofila por unidad de área foliar.

2.12.2. Mallas de color y su efecto en la planta

El uso de mallas de color en los cultivos puede estimular respuestas en la planta, por ejemplo, se ha reportado que al alterar el nivel de luz UV en los sistemas de crecimiento puede afectar el contenido fitoquímico y de pigmentos en los cultivos (Ordidge et al., 2010). De acuerdo con Shahak (2008), la calidad de la luz que llega a las plantas puede afectar el crecimiento y su desarrollo, lo que puede influir en la calidad, producción de frutos y tiempo de cosecha.

Por otra parte, la respuesta en los cultivos puede ser distinta en cuanto a su crecimiento bajo la misma malla, algunos trabajos han reportado beneficios en el uso de mallas de color, Díaz-Pérez y St. John (2019) determinaron los efectos del uso de malla sombra negra, roja, plata y blanca sobre el crecimiento y pigmentos foliares en pimiento, con lo que se concluyó que las mallas mejoraron el crecimiento del cultivo. Retamales et al. (2008) reportaron que el uso de mallas de color produjo cambios en el comportamiento reproductivo y vegetativo de arándano, el rendimiento aumentó de 60 a 90 %, con mallas de color gris al 35 %, roja al 50 % y blanca al 50 % de sombreo. Lobos et al. (2009) estudiaron el efecto de malla blanca, roja y negra, empleando porcentajes de sombreo de 25, 50 y 75 %, reportaron que se incrementó el peso de los frutos en comparación con el control, pero los sólidos solubles disminuyeron, por lo que concluyeron que las mallas de color alteraron la fisiología de la planta, lo cual podría ser una herramienta para desplazar la temporada de cosecha.

Como se mencionó anteriormente, el uso de mallas modifica la cantidad y calidad de luz, la cual es importante para la iniciación floral y a su vez puede repercutir en el futuro rendimiento del cultivo, Wang et al. (2020) reportaron la respuesta de dos cultivares de fresa expuestos a condiciones de luz y sombra;

los resultados mostraron que el crecimiento y desarrollo de fresa fueron altamente variables en un medio ambiente de poca luz y concluyeron que la cantidad de luz suplementada es un factor importante para mantener la uniformidad en la floración. Otros estudios han reportado que es posible atrasar el periodo de floración en variedades de día corto, también señalaron que el uso de mallas bloquea la señal que inicia la floración hasta que la malla es removida, lo cual puede atrasar la iniciación floral en las yemas de la planta de fresa (Takeda et al., 2010). Por otra parte, Wang y Wang (2014) reportaron también una mayor duración de la etapa de floración y maduración de los frutos, pero no encontraron diferencias significativas en los parámetros relacionados con la calidad de fruto como firmeza, sólidos solubles, ácido ascórbico y acidez titulable.

De manera general las investigaciones que se han realizado en torno a las mallas de color entre los cultivos presentan resultados variables, esto sugiere que la respuesta fisiológica involucrada aun no es entendida por completo, ya que depende de varios factores y esta puede variar en función del cultivar, área geográfica, prácticas culturales empleadas como la densidad de plantación, irrigación o fertilización (Rylski & Spigelman, 1986), también a que existe información limitada, debido a la distinta fabricación de las mallas o las condiciones ambientales de crecimiento que no suelen ser reportadas (Arthurs et al., 2013).

2.13. Literatura citada

- Arthurs, S. P., Stamps, R. H., & Giglia, F. F. (2013). Environmental modification inside photoselective shadehouses. *HortScience*, 48(8), 975-979. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.975>
- Basu, A., Nguyen, A., Betts, N. M., & Lyons, T. J. (2014). Strawberry as a functional food: An evidence-based review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(6), 790-806. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.608174>
- Berkovich, Y. A., Kononova, I. O., Smolyanina, S. O., Erokhin, A. N., Avercheva, O. V., Bassarskaya, E. M., Kochetova, G. V., Zhigalova, T. V., Yakovleva, O. S., & Tarakanov, I.G. (2017). LED crop illumination inside

- space greenhouses. *REACH - Reviews in Human Space Exploration*, 6, 11-24, <http://dx.doi.org/10.1016/j.reach.2017.06.001>
- Castellano, S., Mugnozza, G. S., Russo, G., Briassoulis, D., Mistriotis, A., Hemming, S., & Waaijenberg, D., (2008). Plastic nets in agriculture: a general review of types and applications. *Applied. Engineering in Agricultural and Biological Engineers*, 24(6), 799-808. <https://doi.org/10.13031/2013.25368>
- Chen, C. (2015). *Pigments in fruits and vegetables, genomics and dietetics*. Springer.
- Choi, H. G. (2021). Correlation among phenotypic parameters related to the growth and photosynthesis of strawberry (*Fragaria x anannassa* Duch.) grown under various light intensity conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 647585. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647585>
- Dávalos, G. P. A., Aguilar, G. R., Jofre, G. A. E., Hernández, R. A. R. y Vázquez, S. M. N. (2011). *Tecnología para sembrar viveros de fresa. Campo Experimental Bajío*, INIFAP.
- Davison, I. R. (1991). Environmental effects on algal photosynthesis: temperature. *Journal of Phycology*, 27, 2-8. <https://doi.org/10.1111/j.0022-3646.1991.00002.x>
- Díaz-Pérez, J. C. & St. John, K. (2019). Bell pepper (*Capsicum annun* L.) under colored shade nets: plant growth and physiological responses. *HortScience*, 54(10), 1795-1801. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14233-19>
- Driesen, E., Van den Ende, W., De Proft, M., & Saeys, W. (2020). Influence of environmental factors light, CO₂, temperature, and relative humidity on stomatal opening and development: a review. *Agronomy*, 10(12), 1975. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121975>
- Esteban, R., Barrutia, O., Artetxe, U., Fernández-Marín, B., Hernández, A., & García-Plazaola, J. I. (2014) Internal and external factors affecting photosynthetic pigment composition in plants: a meta-analytical approach. *New Phytologist*. 206(1), 268-280. <https://doi.org/10.1111/nph.13186>
- Evans, J. R. (1999). Leaf anatomy enables more equal access to light and CO₂ between chloroplasts. *New Phytologist*, 143, 93-104. <https://doi.org/10.1046/j.14698137.1999.00440.x>
- Flieger, J., Flieger, W., Baj, J., & Maciejewski, R. (2021). Antioxidants: classification, natural sources, activity/capacity measurements, and usefulness for the synthesis of nanoparticles. *Materials*, 14, 4135. <https://doi.org/10.3390/ma14154135>
- Geilfus, C. M. (2019). *Controlled environment horticulture, improving quality of vegetables and medicinal plants*. Springer.
- Giampieri, F., Alvarez-Suarez, J. M., & Battino, M. (2014). Strawberry and human health: effects beyond antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(18), 3867-3876. <https://doi.org/10.1021/jf405455n>

- Goh, C. H., Ko, S. M., & Koh, S. (2012). Photosynthesis and environments: photoinhibition and repair mechanisms in plants. *Journal of Plant Biology*, 55, 93-101. <https://doi.org/10.1007/s12374-011-9195-2>
- Halliwell, B. (2006). Reactive species and antioxidants. Redox biology is a fundamental theme of aerobic life. *Plant Physiology*, 141, 312-322. <https://doi.org/10.1104/pp.106.077073>
- Hancock, J. F., (2020): *Strawberries*. CABI Publishing.
- Higuchi, Y., & Hisamatsu, T. (2016). Light acts as a signal for regulation of growth and development. In T. Kozai, T., Fujiwara, K., & Runkle, E.S. (Eds.). *LED lighting for urban agriculture*, (pp. 57-73). Springer Science Business Media Singapore. https://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_5
- Jakopic, J., Veberic, R. & Stampar, F. (2007). The effect of reflective foil and hail nets on the lighting, color and anthocyanins of “Fuji” apple. *Scientia Horticulturae*, 115, 40-46. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2007.07.014>
- Jutamanee, K., & Onnom, S., 2016. Improving photosynthetic performance and some fruit quality traits in mango trees by shading. *Photosynthetica*, 54, 542-550. <https://doi.org/10.1007/s11099-016-0210-1>
- Kadomura-Ishikawa, Y., Miyawaki, K., Noji, S. & Takahashi, A. (2013). *Phototropin 2* is involved in blue light-induced anthocyanin accumulation in *Fragaria x ananassa* fruits. *Journal of Plant Research*, 126, 847-857. <https://doi.org/10.1007/s10265-013-0582-2>
- Kharshiing, E., & Sinha, S. P. (2015). Plant productivity: can photoreceptors light the way?. *Journal of Plant Growth Regulation*, 34, 206-214. <https://doi.org/10.1007/s00344-014-9454-9>
- Kosai, T., Fujiwara, K., & Runkle, E. S., (2016). *LED lighting for urban agriculture*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0>
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., del Pozo, A., Hancock, J. F., & Flore, J. A. (2009). Physiological response of *Vaccinium corymbosum* “Elliot” to shading nets in Michigan. *Acta Horticulturae*, 810, 465-470. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.810.60>
- 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>
- Mathur, S., Agrawal, D., & Jajoo, A. (2014). Photosynthesis: response to high temperature stress. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 137, 116-126. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.01.010>
- Mawphiang, O. I. L., & Kharshiing, E. (2017). Photoreceptor mediated plant growth responses: implications for photoreceptor engineering toward improved performance in crops. *Frontiers in Plant Science*, 8, 268784. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01181>
- Naznin, M. T., & Lefsrud, M. (2017). An overview of LED lighting and spectral quality on plant photosynthesis. In Gupta, S. D. (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture*, (pp. 101-111). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978981-10-5807-3_6
- Ordidge, M., García-Matías, P., Battey, N. H., Gordon, M. H., Hadley, P., John, P., Lovegrove, J. A., Vysini, E. & Wagstaffe, A. (2010). Phenolic contents

- of lettuce, strawberry, raspberry, and blue Berry crops cultivated under plastic films varying in ultraviolet transparency. *Food Chemistry*, 119, 1224-1227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.039>
- Pascual-Teresa, S., & Sanchez-Ballesta, M. T. (2008). Anthocyanins: from plant to health. *Phytochemistry Review*, 7, 281-299. <https://doi.org/10.1007/s11101-007-9074-0>
- Pavel, E. W., & DeJong T. M. (1993). Seasonal CO₂ exchange patterns of developing peach (*Prunus persica*) fruits in response to temperature, light and CO₂ concentration. *Physiologia Plantarum*, 88(2), 322-330. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1993.tb05506.x>
- Pessaraki, M. (2018). *Handbook of Photosynthesis*. Third edition. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315372136>
- Pessaraki, M. (2021). *Handbook of Plant and Crop Physiology*. Fourth edition. CRC Press.
- Rajapakse, N. C., & Shahak, Y. (2008). 12 Light-quality manipulation by horticulture industry. In C. Garry, Whitelam & K. J. Halliday (Eds.), *Annual Plant Review 30: Light and plant development* (pp. 290-312). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0321>
- Retamales, J. B., Montecino, J. M., Lobos, G. A., & Rojas, L. A. (2008). Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. *Acta Horticulturae*, 770, 193-197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.22>
- Rylski, J., & Spigelman, M. (1986). Effect of shading on plant development, yield and fruit quality of sweet pepper grown under conditions of high temperature and radiation. *Scientia Horticulturae*, 29, 31-35. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(86\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(86)90028-2)
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2017). *Planeación agrícola nacional, 2017-2030. Fresa Mexicana*. Gobierno de México. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255626/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030- parte_tres.pdf
- Seeram, N. P. (2008). Berry fruits for cancer prevention: current status and future prospects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(3), 630-635. <https://doi.org/10.1021/jf072504n>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). *Panorama Agroalimentario 2020*. Gobierno de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (marzo de 2024). *Berries, frutillas, frutos rojos, bayas mexicanas... entre lo común y lo biológico*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap/articulos/berries-frutillas-frutos-rojos-bayas-mexicanas-entre-lo-comun-y-lo-biologico-para-identificar-estos-frutos-que-se-posicionan-en-el-mercado-nacional-e-internacional?idiom=es>
- Shahak, Y. (2008). Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Horticulturae*, 770, 161-168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>

- Sivakumar, D., Jifon, J., & Soundy, P. (2018). Spectral quality of photo-selective shade nettings improves antioxidants and overall quality in selected fresh produce after postharvest storage. *Food Review International*, 34(3), 290-307. <https://doi.org/10.1080/87559129.2017.1298124>
- Stamps, R. H., (2009). Use of colored shade netting in horticulture. *HortScience*, 44(2), 239-241. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.239>
- Stevenson, D. & Scalzo, J. (2012). Anthocyanin composition and content of blueberries from around the world. *Journal of Berry Research*, 2, 179-189. <http://dx.doi.org/10.3233/JBR-2012-038>
- Taghavi, T., Siddiqui, R., & Rutto, L. K. (2019). The effect of preharvest factors on fruit and nutritional quality in strawberry. In Asao T., Asaduzzaman Md. (Eds.). *Strawberry pre and post harvest management techniques for higher fruit quality*. (pp. 1-22). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.84619>
- Taiz, L., & Zieger, E. (2006). *Plant physiology*. Sinauer Associates. Inc. Publishers.
- Takeda, F., Glenn, D. M., Callahan, A., Slovin, J., & Stutte, G. W. (2010). Delaying flowering in short-day strawberry transplants with photoselective nets. *International Journal of Fruit Science*, 10, 134-142. <http://dx.doi.org/10.1080/15538362.2010.492331>
- Velpoorte, R., & Alfermann, A. W. (2000). *Metabolic engineering of plant secondary metabolism*. Kluwe Academic Publishers.
- Viršilė, A., Olle, M., & Duchovskis, P. (2017). LED lighting in horticulture. In Gupta, S. D. (Ed.), *Light emitting diodes for agriculture*, (pp. 113-147). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_7
- Wang, J. & Wang, H. (2014). Effects of shade on strawberries in hydroponic cultivation. *Acta Horticulturae*, 1049(114), 733-736. [10.17660/ActaHortic.2014.1049.114](http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.114)
- Wang, R., Eguchi, M., Gui, Y., & Iwasaki, Y. (2020). Evaluating the effect of light intensity on flower development uniformity in strawberry (*Fragaria x ananassa*) under early induction conditions in forcing culture. *HortScience*, 55(5), 670-675. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14917-20>
- Warner, R., Wu, B-S., MacPherson, S., & Lefsrud, M. (2021). A review of strawberry photobiology and fruit flavonoids in controlled environments. *Frontiers in Plant Science*, 12, 611893. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.611893>
- Whitelam, G. C., & Halliday, K. J. (2007). *Light and plant development*. Blackwell Publishing.
- Zhao, Y. (2007). *Berry fruit value added products for health promotion*. CRC Press.
- Zhao, D., Hao, Z., & Tao, J. (2012). Effects of shade on plant growth and flower quality in the herbaceous peony (*Paeonia lactiflora* Pall.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 61, 187-196. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.10.005>
- Zhen S., van Iersel M., & Bugbee B. (2021). Why far-red photons should be included in the definition of photosynthetic photons and the measurement

of horticultural fixture efficacy. *Frontiers in Plant Science*, 12, 693445.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.693445>

Zoratti, L., Jaakola, L., Häggman, H., & Giongo, L. (2015). Modification of Sunlight Radiation through Colored Photo-Selective Nets Affects Anthocyanin Profile in *Vaccinium spp.* Berries. *PLoS ONE*, 10(8), Article e0135935. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135935>

**III. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL E INTERCAMBIO DE
GASES EN HOJAS DE FRESA CV. CAMINO REAL BAJO MALLA
SOMBRA DE COLORES**

CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL E INTERCAMBIO DE GASES EN HOJAS DE FRESA

CV. CAMINO REAL BAJO MALLA SOMBRA DE COLORES

3.1. RESUMEN

El uso de malla sombra negra en los cultivos ha aumentado debido a su propiedad para aliviar el exceso de irradiación solar; por otra parte, la malla sombra de color puede alterar la calidad de luz que reciben las plantas modificando su desarrollo y crecimiento. En este sentido se propone analizar las condiciones ambientales que se generan con el uso de mallas sombra de colores negra, verde, azul, beige y un testigo sin malla en un cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv. Camino Real y determinar su influencia sobre el intercambio de gases en las hojas. Se caracterizó la calidad y cantidad de luz transmitida por las mallas, se registraron parámetros ambientales y de sustrato (humedad relativa, densidad del flujo de fotones fotosintéticos, temperatura y pH del sustrato), se midió el intercambio de gases en las hojas (asimilación de CO₂, conductividad estomática, transpiración, CO₂ intercelular, temperatura de la hoja e índice de clorofila). La malla sombra negra disminuyó la temperatura ambiental 3 °C, aumentó la humedad relativa 17 % y en las hojas incrementó 61 % la conductancia estomática en comparación con el testigo. La DFFF y el pH del sustrato tuvieron mayor influencia sobre el intercambio de gases en la hoja.

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch., calidad de luz, conductancia estomática, fotosíntesis.

ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION AND GAS EXCHANGE IN STRAWBERRY LEAVES CV. CAMINO REAL UNDER COLORED SHADE NETS

3.2. ABSTRACT

The use of black shade nets in crops has increased due to its properties to alleviate excess radiation, on the other hand, colored shade nets can alter the quality of light received by the plants changing their development and growth. The objective of this study was to determine the environmental conditions generated by the use of black, green, blue and amber shade nets in a strawberry crop (*Fragaria x ananassa* Duch.) cv. Camino Real and to determine its influence on leaf gas exchange. The quality and quantity of light transmitted by the color nets was characterized, environmental (relative humidity, PPFD and temperature) and substrate parameters (pH) were recorded and leaf gas exchange was measured (CO₂ assimilation, stomatal conductance, transpiration, intercellular CO₂, leaf temperature and chlorophyll index). The black shade net decreased ambient temperature by 3 °C, increased relative humidity by 17 % and increased stomatal conductance in leaves 61 % compared to the control plants. The PAR and pH had the greatest influence on gas exchange in the leaf.

Index words: *Fragaria x ananassa* Duch., light quality, photosynthesis, stomatal conductance.

3.3. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de mallas en los cultivos ha aumentado debido a su bajo costo y a sus propiedades para modificar el microclima (Shahak, 2014). La malla sombra negra convencional da protección física, reduce la depresión fotosintética y cierre de estomas, producto de altas temperaturas ocasionado por radiación excesiva (Shahak, 2014). Las mallas sombra de color pueden alterar la cantidad y calidad de la luz que reciben las plantas, ya que modifican el espectro de radiación transmitida, lo que cambia su desarrollo y crecimiento (Retamales *et al.*, 2008; Stamps, 2009), modifican el contenido de pigmentos foliares y fitoquímicos de los frutos, así como el rendimiento y tiempo de cosecha (Arthurs *et al.*, 2013). Las investigaciones en torno al uso de mallas de color son limitadas (Aras y Eşitken, 2019) y los resultados obtenidos son variables, debido al uso de distintos tipos de mallas y de fabricantes (Díaz-Pérez y St. John, 2019), aunado a la falta de caracterización del ambiente de crecimiento (Arthurs *et al.*, 2013), esto sugiere que la respuesta fisiológica involucrada aun no es entendida por completo, ya que depende de varios factores, entre ellos la especie y el cultivar.

Al reducir la radiación por el uso de mallas, es posible modificar la temperatura de la planta, aire, suelo, humedad relativa y la velocidad del viento (Stamps, 1994), lo cual repercute en el intercambio de gases en la hoja, transpiración, respiración y fotosíntesis; a su vez, la actividad fotosintética en la hoja puede estar limitada por otros factores como luz, temperatura, agua del suelo, humedad, temperatura o concentración de CO₂ en el aire (Pessarakli, 2018). Todo lo anterior tiene influencia sobre la anatomía foliar, distribución de biomasa y rendimiento del fruto (Damián-Nava *et al.*, 2009). El intercambio de gases en la hoja y la pérdida de agua está restringido y modulado principalmente por los estomas (Pessarakli, 2021), procesos que determinan el desarrollo y crecimiento vegetal y pueden ser estimados por medio de la tasa de asimilación de CO₂, transpiración y conductancia estomática, estos indicadores

brindan información acerca de la respuesta fisiológica de crecimiento de la planta bajo determinadas condiciones ambientales (Choi, 2021) y su evaluación, indicaría si la producción bajo mallas de colores favorece el desarrollo óptimo del cultivo.

El cultivo de fresa es originario de zonas templadas, aunque se ha establecido en los trópicos y subtrópicos (Hancock, 2020), el cambio climático y su efecto adverso en la producción de frutos (Manja y Aoun, 2019) ha propiciado la producción de este cultivo bajo mallas, en zonas con mayor radiación (Neri *et al.*, 2012) debido a su bajo costo de implementación, comparado con el vidrio o el plástico de invernadero (Arthurs *et al.*, 2013). México es uno de los principales productores y exportadores de fresa, en los últimos años se han incrementado los estándares de calidad, por lo cual es importante considerar tecnologías que mejoren el desarrollo de la planta y calidad del fruto, como se reporta con las mallas de color en jitomate, pimiento, manzana, naranja y arándano (Aras y Eşitken, 2019), pero ha sido poco estudiado en fresa. De acuerdo con Kanno *et al.* (2022), es importante conocer los mecanismos fisiológicos y el comportamiento morfológico del cultivo de fresa, así como la respuesta al ambiente donde se desarrolla, con el propósito de mejorar su productividad; por lo cual, los objetivos de este estudio fueron conocer las condiciones ambientales que se generan en el sustrato y en la planta con el uso de malla sombra de colores y determinar si estas condiciones ambientales influyen en el intercambio de gases de la hoja de plantas de fresa cv. Camino Real.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en un invernadero con cubierta de cristal (ubicado en los 19° 20' N y 98° 53' O, a una altitud de 2240 m.) en la temporada otoño-invierno de 2021. Se establecieron plantas de fresa cv. Camino Real en contenedores de 5 L, en un sistema hidropónico abierto. Se usó como sustrato una mezcla de turba:agrolita (70:30 v/v); a una densidad de 11 plantas m². Los riegos se realizaron tres

veces por semana con solución nutritiva compuesta por 7.22 meq L⁻¹ de NO₃⁻, 0.44 meq L⁻¹ de H₂PO₄⁻, 0.20 meq L⁻¹ de SO₄⁻², 3.51 meq L⁻¹ de K⁺, 3.81 meq L⁻¹ de Ca⁺², 0.4 meq L⁻¹ de Mg⁺², 2.7 mg L⁻¹ de Fe, 0.6 mg L⁻¹ de Mn, 0.1 mg L⁻¹ de Zn, 0.05 mg L⁻¹ de Cu, 0.11 mg L⁻¹ de B y 0.05 mg L⁻¹ de Mo; con pH de 6 y CE de 1.7 dS m⁻¹.

A los 25 días después del trasplante (ddt) las plantas se cubrieron con malla sombra (con un factor de sombreo del 80 %) de color negro, verde, azul, beige y sin malla sombra (testigo), lo que originó cinco tratamientos. Cada malla se colocó a una altura de 1.5 m cubriendo también los costados. Dentro de cada malla sombra y en el testigo, en días claros, al medio día solar (12:00 pm), se registraron los parámetros ambientales: temperatura del ambiente y humedad relativa con un datalogger RC-51H (Elitech Technology, California, EE. UU.), temperatura del sustrato con un termómetro para suelo (TFA Dostmann, Wertheim, Alemania) a 20 cm de profundidad y densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) con un medidor LGBQM2 (Hydrofarm, California, EU). Se midió el espectro de transmitancia dentro de cada malla, con un radiómetro multiespectral PS-300 (Apogee Instruments Inc., Utah, EE. UU.) a los 70 ddt. Se midió el pH del sustrato con un medidor HI981030 (Hanna Instruments Inc., EU) una vez por semana a 15 cm de profundidad.

A los 130 ddt se realizó una medición de intercambio de gases en las hojas con un analizador de gases infrarrojo LI-6400XT (LI-COR Biosciences, Nebraska, EE. UU.); además, se realizó la medición del índice de clorofila (IC) con un medidor SPAD (Minolta 502; Konica Minolta Inc., Osaka, Japón) en el foliolo central de una hoja madura y totalmente expandida, las mediciones se hicieron en tres plantas seleccionas al azar, por tratamiento.

El diseño experimental fue completamente al azar con 18 repeticiones para las variables ambientales y 9 para el intercambio de gases por tratamiento, cada unidad experimental consistió en una planta por maceta. Con los datos se realizó una prueba de Kruskal-Wallis y sus comparaciones

múltiples (prueba de Dunn) (Conover, 1999), se consideraron diferencias significativas cuando $p \leq 0.05$. Para explorar la relación entre variables ambientales y su efecto sobre el intercambio de gases en la hoja. Se realizaron pruebas de regresión múltiple (Montgomery *et al.*, 2012) y correlación canónica (Díaz, 2007) entre grupos de variables con el programa SAS versión 9 (SAS Institute, 2002) y Minitab® 19 (Minitab Inc.).

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. Calidad y transmitancia de las mallas de color

La transmitancia fue mayor en la malla beige en comparación de la malla negra y verde, pero esta fue constante a lo largo del espectro comprendido entre 350 y 930 nm (Figura 1). Por otra parte, la malla de color azul presentó un pico de transmitancia en la región de 475 nm y otro en la región de 825 a 1000 nm, así como una transmitancia en la región de 550 a 750 nm similar a la malla de color verde, lo que indica que esta malla modificó la calidad de luz. De acuerdo con Stamps (2009), la malla sombra de color puede modificar no solo la cantidad, sino también la calidad de la radiación que reciben las plantas, ya que se puede modificar la absorción de varias bandas espectrales. El resultado obtenido con la malla azul concuerda con Arthurs *et al.* (2013) al reportar un espectro con dos picos de mayor transmitancia en la región de 475 y 850 nm.

3.5.2. Variables ambientales

Existió un efecto significativo de la malla negra y verde sobre la DFFF ($p \leq 0.05$), esta se redujo 82 y 80 %, respectivamente, en comparación con el testigo (Cuadro 1), el efecto de la malla azul y beige fue menor al de la malla negra y verde y en comparación al testigo existió una reducción de 73 % y 71 %; esta disminución es mayor a lo publicado por otros autores que reportaron decrementos del 55 al 60 % (Arthurs *et al.*, 2013) con mallas de color negro en comparación con el testigo. De acuerdo con

Hancock (2020) el punto de saturación de luz en fresa se encuentra entre 800 y 1000 $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$, en este estudio no se alcanzó el punto de saturación en las mallas de color, pero en el testigo sí, esto es importante ya que si no existe suficiente luz en el medio, el crecimiento es lento; pero cuando existe un exceso de luz las hojas se pueden saturar y la fotosíntesis no incrementa (fotoinhibición), existe cierre de estomas y la planta no crece, por lo que la eficiencia fotosintética es mayor a bajos niveles de radiación (Pessarakli, 2018). La reducción de la DFFF en este estudio se debe al porcentaje de sombra de las mallas de color (80 %), de acuerdo con los resultados anteriores las mallas no solo redujeron la cantidad, sino también modificaron el espectro de radiación, tal como lo menciona Stamps (2009).

No existió un efecto significativo entre la malla sombra beige, azul y el testigo ($p > 0.05$); la malla negra redujo la temperatura del ambiente 3 °C en comparación con el testigo (Cuadro 1). Esto coincide con Meena (2014) quien reportó una temperatura 6 % menor a la del testigo, con malla negra; Arthurs *et al.* (2013) registraron una disminución del 3 % al usar malla negra y un incremento del 8 % con malla azul, roja y perla, con relación a la del testigo. En este estudio la reducción de la temperatura puede estar relacionado con la menor cantidad de radiación transmitida por la malla negra (Figura 1) debido a que los hilos que la componen son opacos por lo que bloquean más radiación en comparación con el resto de mallas cuyos hilos que componen el tejido son traslucidos.

Existió un efecto significativo de la malla negra sobre la humedad relativa ($p \leq 0.05$), esta incrementó 17 % en comparación con el testigo (Cuadro 1), tendencia similar a la observada por Meena *et al.* (2014), quienes reportaron un incremento del 11 % con la malla de color negro en relación con el testigo. La malla sombra de color azul, beige y el testigo presentaron la humedad más baja, lo cual se relacionó con la mayor temperatura del ambiente reportada en estas mallas. La malla de color oscuro aumentó la humedad en comparación con las mallas de color claro y testigo, lo cual es consecuencia de una menor radiación transmitida.

Existió un efecto significativo de la malla negra, azul y beige sobre la temperatura del sustrato ($p \leq 0.05$), esta fue 11 % menor que en el testigo (Cuadro 1), esto coincide con Aras y Eşitken (2019), quienes reportaron temperaturas de 0.4 a 7 % mayores en el testigo (24.7 °C), lo que confirma la propiedad de las mallas de reducir la temperatura en los cultivos.

Existió un efecto significativo de la malla beige sobre el pH del sustrato ($p \leq 0.05$), este fue 12 % menor en comparación con el testigo (Cuadro 1), esto podría ser debido a que el sustrato del testigo está expuesto a una mayor radiación y temperatura en comparación con el de la malla beige, lo cual puede propiciar una mayor evaporación de agua de la solución nutritiva, acumulación de sales en el sustrato y por ende promover elevación del pH del medio.

Cuadro 1. Efecto de la malla sombra de color sobre variables ambientales y del sustrato medidas al medio día solar (12:00 pm) en fresa cv. Camino Real.

Malla sombra	DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	TAMB (°C)	HR (%)	TSUS (°C)	pH
Testigo	1113.3 $\pm$ 40 a [†]	29.3 $\pm$ 0.5 ab	39.8 $\pm$ 1.3 b	18 $\pm$ 0.8 a	6.0 $\pm$ 0.05a
Negro	192.7 $\pm$ 6.5 c	26.1 $\pm$ 0.5 c	46.8 $\pm$ 1.4 a	16 $\pm$ 0.5 b	5.8 $\pm$ 0.10 ab
Azul	293.7 $\pm$ 9.7 b	28.7 $\pm$ 0.5 ab	40.6 $\pm$ 1.4 b	16 $\pm$ 0.5 b	5.9 $\pm$ 0.08 ab
Verde	218.3 $\pm$ 8.4 c	27.7 $\pm$ 0.5 bc	41.6 $\pm$ 1.4 b	17 $\pm$ 0.5 ab	5.7 $\pm$ 0.12 ab
Beige	320.0 $\pm$ 11.2 b	29.5 $\pm$ 0.5 a	40.0 $\pm$ 1.2 b	16 $\pm$ 0.5 b	5.3 $\pm$ 0.10 b

Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de 18 repeticiones. [†]Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Kruskal Wallis, Dunn, $p \leq 0.05$). DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos (400 a 700 nm), TAMB: temperatura del ambiente, TSUS: temperatura del sustrato, HR: humedad relativa, pH: pH del sustrato.

3.5.3. Intercambio de gases en la hoja

No existió efecto significativo de la tasa fotosintética en la hoja entre las mallas y el testigo ($p>0.05$), pero la asimilación de CO₂ en la hoja de la malla negra fue 67 % mayor que en la malla azul y beige (Cuadro 2). Díaz-Pérez y St. John (2019) en un estudio con mallas de colores en pimiento (30 a 46 % de sombreo), reportaron que la asimilación de CO₂ fue 12 % mayor con la malla negra en comparación con el testigo, en este estudio, aunque la tendencia fue similar, no existieron diferencias significativas entre la malla negra y el testigo. De acuerdo con Lobos *et al.* (2012) las mallas pueden reducir la depresión fotosintética debida a altas temperaturas y cierre de estomas al medio día y mejorar el desempeño de la planta lo que aumentaría la asimilación de CO₂.

La conductancia estomática en la malla negra fue 61 % mayor a la de las plantas testigo, lo que corresponde con la mayor tasa fotosintética (Cuadro 2). Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron que la conductancia estomática en plantas bajo malla negra fue 32 % mayor que el testigo; Aras y Eşitken (2019) usaron malla negra (40 % sombreo) y reportaron un aumento del 1 % en la conductancia, lo que indicaría que con el resto de las mallas de color como en el testigo, las plantas estuvieron sometidas a condiciones que propiciaron un cierre de estomas en las hojas como mecanismo para evitar la pérdida de agua; de acuerdo con Caird *et al.* (2007) la conductancia estomática depende del contenido de agua del suelo y humedad relativa del aire. Kanno *et al.* (2022) proponen que el mecanismo que controla la apertura de los estomas es complejo, ya que no solo es afectado por condiciones externas (luz, potencial hídrico, estado de las células guarda); Flexas *et al.* (2008) mencionan que también hay señales internas hormonales.

Existió un efecto significativo de la malla verde y beige sobre la transpiración en la hoja ($p\leq 0.05$), esta fue aproximadamente 50 % menor en estas mallas en comparación con la malla negra, azul y testigo. La transpiración ejerce un efecto de enfriamiento en la planta a consecuencia de la evaporación de agua,

esto para mantener una temperatura por debajo de la temperatura ambiente, tanto la malla verde como la beige presentaron una humedad relativa baja, esto junto con una alta temperatura resulta en un alto déficit de presión de vapor por lo que la transpiración de las hojas debería aumentar en estas mallas, pero esto no sucedió.

Existió un efecto significativo de la malla negra, verde y beige sobre la concentración de CO₂ intercelular en la hoja ($p \leq 0.05$), esta fue 170 % mayor en comparación al testigo (Cuadro 2), esto concuerda con Díaz-Pérez y St. John (2019) que reportaron mayor concentración de CO₂ intercelular con la malla negra en comparación con el testigo. De acuerdo con Oguchi *et al.* (2005) la concentración de CO₂ intercelular en especies que crecen en alta luminosidad es menor que las que crecen en baja luminosidad; el resultado de este estudio puede deberse a que en el testigo las hojas están expuestas a mayor radiación y menor humedad relativa y los estomas pueden estar cerrados para evitar la pérdida de agua, lo que ocasiona disminución en la entrada de CO₂ al interior de la hoja ya que temperaturas por arriba de 30 o 40 °C pueden ocasionar el cierre de los estomas (Morales *et al.*, 2006). Pessarakli (2018) comenta que cuando los estomas se cierran, una disminución de CO₂ en el cloroplasto puede causar decremento del rendimiento fotoquímico del fotosistema II; además de una disminución en la actividad de enzimas como la nitrato reductasa y sacarosa fosfato sintasa, así como un incremento en la actividad de la ribulosa 1,5-bifosfato oxigenasa, lo cual llevaría a la planta a fotorrespiración.

La temperatura de la hoja en la malla de color verde y beige fue significativamente menor que en la malla negra y el testigo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 2), la temperatura fue 7 y 13 % menores que en la malla negra y testigo. Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron temperatura 7 % menor en plantas bajo malla negra en comparación con el testigo, aunque en este estudio la temperatura de la hoja en la malla negra fue similar estadísticamente al testigo, la tendencia del resto de las mallas sí fue a disminuir la temperatura de la hoja.

No existieron diferencias significativas entre el IC de las mallas y el testigo ($p>0.05$). el IC en las hojas de la malla azul fue 21 % mayor (Cuadro 2). Aras y Eşitken (2019) reportaron que no hubo diferencia significativa entre el índice de clorofila de las hojas de fresa del testigo y las que crecieron bajo malla de color negro. Choi (2021) y Zhang (2016), reportaron que las hojas que se encuentran en baja intensidad de luz tuvieron mayor concentración de clorofila en comparación con las hojas expuestas a alta intensidad de luz; aunque esto varía con la edad de la hoja y la especie (Casierra-Posada *et al.*, 2012), esta respuesta se considera una adaptación de las plantas para recibir mayor cantidad de luz cuando está limitado este recurso en el ambiente (Stagnari *et al.*, 2018).

Cuadro 2. Efecto de la malla sombra de color sobre variables de intercambio de gases e índice de clorofila medidas al medio día solar (12:00 pm) en hojas de fresa cv. Camino Real.

Malla sombra	TF ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Cest ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	Trans ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	Thoja (°C)	IC
Testigo	6.38 ± 0.15 ab [†]	0.036 ± 0.0 b	1.92 ± 0.09 ab	75.65 ± 1.70 c	32.2 ± 0.15 a	55.7 ± 1.45 ab
Negro	7.64 ± 0.56 a	0.058 ± 0.0 a	2.24 ± 0.13 a	200.61 ± 9.19 ab	30.3 ± 0.09 ab	56.5 ± 0.59 ab
Azul	4.32 ± 0.59 b	0.040 ± 0.0 b	1.33 ± 0.13 bc	127.38 ± 3.77 bc	29.7 ± 0.10 bc	58.9 ± 0.30 a
Verde	4.71 ± 0.63 ab	0.030 ± 0.01 b	0.90 ± 0.04 c	239.01 ± 3.92 a	29.0 ± 0.24 c	54.4 ± 1.86 ab
Beige	3.16 ± 0.70 b	0.044 ± 0.0 ab	0.64 ± 0.14 c	167.82 ± 6.68 ab	27.1 ± 0.24 d	48.5 ± 1.36 b

Datos expresados como la media ± error estándar de 9 repeticiones. [†]Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Kruskal Wallis, Dunn, $p\leq 0.05$). TF: tasa fotosintética, Cest: conductancia estomática, Trans: transpiración, CO₂: CO₂ intercelular, Thoja: temperatura de la hoja, IC: índice de clorofila.

3.5.4. Regresión múltiple: ambiente e intercambio de gases

La regresión múltiple entre parámetros de intercambio de gases en la hoja de fresa y parámetros ambientales y de sustrato mostró que la temperatura de la hoja (modelo 4) está representado el 85 % de la variación total de los datos e incluye tres parámetros (Cuadro 3).

La tasa fotosintética (modelo 1) y transpiración (modelo 2) son influidos por la conductancia estomática, la temperatura de la hoja y la concentración interna de CO₂, debido a que la conductancia estomática es regulada por la actividad estomática y es importante en el intercambio de gases como CO₂, O₂ y vapor de agua (Kosová *et al.*, 2021), los cuales también son influenciados por la temperatura. Weyers y Meidner (1990) proponen que los estomas responden a cambios en el ambiente y existe un gran número de interrelaciones entre factores ambientales (humedad, temperatura del ambiente, velocidad del viento, irradiancia, CO₂ ambiental y suministro de agua) y procesos fisiológicos conocidos por afectar a los estomas (transpiración, temperatura de la hoja, fotosíntesis, CO₂ intercelular o contenido de agua del mesófilo), lo que resulta en diferentes respuestas a una variable ambiental particular e interacciones complejas cuando dos o más factores varían al mismo tiempo; lo cual explicaría por qué la conductancia estomática puede estar presente en ambos modelos. Por otra parte, la temperatura de la hoja también está relacionada con el intercambio de gases, por ejemplo, Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron que el intercambio de gases en la hoja fue altamente influenciado por la temperatura, a mayor temperatura menor conductancia estomática, lo que ocasiona menor concentración de CO₂ intercelular y fotosíntesis.

En los modelos 3 y 4 la concentración de CO₂ y temperatura de la hoja son influenciados por la densidad del flujo de fotones fotosintéticos, pH, temperatura del sustrato y temperatura ambiental. La DFFF modifica la temperatura y humedad del ambiente, según Weyers y Meidner (1990) también el nivel de CO₂ intercelular puede ser modificado por la radiación de manera indirecta, al afectar la

fotosíntesis en el mesófilo, o de manera directa cuando actúa sobre las células guarda y por consiguiente ocurre el cierre de estomas. En cuanto al pH del medio de la raíz, éste influencia el equilibrio de oxido reducción, solubilidad, disponibilidad y transporte de iones en las membranas de las células epidérmicas y corticales de la raíz (Epstein y Bloom, 2005). Se ha reportado su relación con parámetros de intercambio de gases en la hoja, por ejemplo, Kang *et al.* (2011) observaron que el pH de la zona de la raíz estuvo asociado con el estrés osmótico, registraron una reducción en la tasa de transpiración, conductancia estomática y evapotranspiración en plántulas de jitomate; también Tang *et al.* (1993) reportaron que al elevar el pH de la solución nutritiva disminuyó la conductancia estomática y se intensificó el déficit de agua, lo que redujo la apertura de estomas y ocasionó pérdida del rendimiento. Wilkinson y Davies (1997) proponen que un incremento en el pH de la savia del xilema puede actuar como una señal de estrés entre las raíces y los brotes cuando estas están en contacto con suelo seco.

Cuadro 3. Regresión múltiple entre parámetros ambientales y de sustrato y de intercambio de gases en fresa cv. Camino Real.

	Modelo	R²	CV
1	TF = -7.40 + 100.45 (Cest) + 0.30 (Thoja)	0.70*	18.01
2	Trans = -7.36 + 24.58 (Cest) + 0.002 (CO ₂) + 0.24 (Thoja)	0.71*	26.30
3	CO ₂ = 341.10 - 0.14 (DFFF) + 9.67 (TSUS) - 51.97 (pH)	0.66*	22.14
4	Thoja = 17.64 + 0.003 (DFFF) - 0.36 (TAMB) + 3.68 (pH)	0.85*	2.66

TF: tasa fotosintética, Cest: conductancia estomática, Trans: transpiración, CO₂: CO₂ intercelular, Thoja: temperatura de la hoja, DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos, TAMB: temperatura del ambiente, TSUS: temperatura del sustrato, pH: pH del sustrato. *: $p \leq 0.01$. e.e.: error estándar de la media de la variable respuesta.

3.5.5. Correlación canónica: ambiente e intercambio de gases

El análisis entre el grupo de parámetros “Ambiente” y “Hoja” mostró que la correlación de ambas variables canónicas fue altamente significativa ($p \leq 0.0001$) con $r = 0.93$ (Figura 2), e indicó que los parámetros ambientales están directamente relacionados con la actividad de intercambio de gases en la hoja. Los factores ambientales que tuvieron una mayor influencia sobre el intercambio de gases en la hoja son la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (0.83) y el pH del sustrato (0.69), estos factores a su vez influyen en mayor grado a la temperatura de la hoja (0.98), transpiración (0.55) y concentración de CO₂ intercelular (-0.77) en la hoja de fresa; aunque la tasa fotosintética (0.39) y el índice de clorofila (0.20) también son parámetros influenciados, esta fue menor en ellos. Este resultado concuerda con el análisis de regresión múltiple, resultando que las variables ambientales más influyentes fueron la densidad del flujo de fotones fotosintéticos y pH del sustrato.

3.6. CONCLUSIONES

El uso de malla sombra tuvo un efecto sobre los parámetros ambientales y de intercambio de gases en la hoja de fresa, la malla sombra negra redujo la temperatura ambiental, aumento la humedad relativa e incrementó la conductancia estomática en comparación con el testigo.

El análisis de regresión múltiple y correlación canónica coincidieron en que las variables ambientales con mayor influencia sobre la asimilación de CO₂, transpiración, concentración de CO₂ intercelular y temperatura de la hoja, independientemente del color de la malla, fueron la DFFF y pH del sustrato.

3.7. LITERATURA CITADA

- Aras S. and A. Eşitken (2019)** Physiological effects of photoselective nets in strawberry plant. *Journal Of Agriculture and Nature*. 22:342-346, <https://doi.org/10.18016/ksutarimdoga.vi.552218>
- Arthurs S. P., R. H. Stamps and F. F. Giglia (2013)** Environmental modification inside photoselective shadehouses. *HortScience*. 48:975-979, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.975>
- Caird M. A., J. H. Ricards and L. A. Donovan (2007)** Nighttime stomatal conductance and transpiration in C₃ and C₄ plants. *Plant Physiology*. 143:4-10, <https://doi.org/10.1104/pp.106.092940>
- Casierra-Posada F., O. F. Ávila-León y D. H. Riascos-Ortíz (2012)** Cambios diarios del contenido de pigmentos fotosintéticos en hojas de caléndula bajo sol y sombra. *Temas agrarios*. 17:60-71.
- Choi H. G. (2021)** Correlation among phenotypic parameters related to the growth and photosynthesis of strawberry (*Fragaria x anannassa* Duch.) grown under various light intensity conditions. *Frontiers in Plant Science*. 12:1-15, <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647585>
- Conover W. J. (1999)** Practical nonparametric statistics. Wiley. New York. 584 p.
- Damián-Nava A., I. Ramírez-Ramírez, C. B. Peña-Valdivia, G. Díaz-Villaseñor y V. A. González Hernández (2009)** Características del intercambio de gases en hojas de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 15:119-126.
- Díaz M. L. G. (2007)**. Estadística multivariada: inferencia y métodos. Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 570 p.
- Díaz-Pérez J. C. and K. St. John (2019)** Bell pepper (*Capsicum annun* L.) under colored shade nets: plant growth and physiological responses. *HortScience*. 54:1795-1801, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14233-19>
- Epstein E. and A. J. Bloom (2005)** Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. Sinauer Associates Inc. Sunderland Massachusetts, USA. 400 p.

- Flexas J., J. Bota, F. Loreto, G. Cornic and T. D. Sharkey (2008)** Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C₃ plants. *Plant Biology*. 6:269-279, <https://doi.org/10.1055/s-2004-820867>
- Hancock J. F. (2020)** Strawberries. CABI Publishing. New York, USA. 275 p.
- Kang Y. I., J. M. Park, S. H. Kim, N. J. Kang, K. S. Park, S. Y. Lee and B. R. Jeong (2011)** Effects of root zone pH and nutrient concentration on the growth and nutrient uptake of tomato seedlings. *Journal of Plant Nutrition*. 34:640-652, <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.540621>
- Kanno K., T. Sugiyama, M. Eguchi, Y. Iwasaki and T. Higashide (2022)** Leaf photosynthesis characteristics of seven japanese strawberry cultivars grown in a greenhouse. *The Horticulture Journal*. 91:8-15, <https://doi.org/10.2503/hortj.UTD-237>
- Kosová K., P. Vítámvás and I. T. Prášil (2021)** Physiological Adaptations in Temperate Crops to Environmental Constraints during the Growing Season. *In: Handbook of Plant and Crop Physiology*. M. Pessarakli (ed.). CRC Press, Taylor Francis Group. Boca Ratón Florida, USA. pp:428-443.
- Lobos G. A., J. B. Retamales, J. F. Hancock, J. A. Flore, N. Cobo and A. del Pozo (2012)** Spectral irradiance, gas exchange characteristics and leaf traits of *Vaccinium corymbosum* L. ‘Elliott’ grown under photo-selective nets. *Environmental and Experimental Botany*. 75:142-149, <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.006>
- Manja K and M. Aoun (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>
- Meena R. K., A. Vashisth, R. Singh, B. Singh and K. M. Manjaih (2014)** Study on change in microenvironment under different colour shade nets and its impact on yield of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Journal of Agrometeorology*. 16:104-111, <https://doi.org/10.54386/jam.v16i1.1493>

- Montgomery D., E. A. Peck and G. G. Vining (2012)** Introduction to linear regression análisis. Wiley. New Jersey. 645 p.
- Morales D., P. Rodríguez, J. A. Dell’Amico, A. Torrecillas y M de J. Sánchez-Blanco (2006)** Efecto de altas temperaturas en algunas variables del crecimiento y el intercambio gaseoso en plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. CV. Amalia). *Cultivos Tropicales*. 27:45-48.
- Neri D., G. Baruzzi, F. Massetani and W. Faedi (2012)** Strawberry production in forced and protected culture in Europe as a response to climate change. *Canadian Journal of Plant Science*. 92:1021-1036, <https://doi.org/10.4141/cjps2011-276>
- Oguchi R., K. Hikosaka and T. Hirose (2005)** Leaf anatomy as a constraint for photosynthetic acclimation: differential responses in leaf anatomy to increasing growth irradiance among three deciduous trees. *Plant, Cell and Environment*. 28:916-927, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01344.x>
- Pessarakli M. (2018)** Handbook of Photosynthesis. Third edition. CRC Press. New York. 846 p. <https://doi.org/10.1201/9781315372136>
- Pessarakli M. (2021)** Handbook of Plant and Crop Physiology. Fourth edition. CRC Press, New York. 1173 p.
- Retamales J. B., J. M. Montecino, G. A. Lobos, and L. A. Rojas (2008)** Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. *Acta Horticulturae*. 770:193-197.
- SAS institute (2002)** SAS/STAT. User’s Guide. Released 9.0. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina. USA.
- Shahak Y. (2014)** Photosensitive netting: an overview of the concept, research and development and practical implementation in agriculture. *Acta Horticulturae*, 1015:155-162, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1015.17>

- Stagnari F., C. Di Mattia, A. Galieni, V. Santarelli, S. D'Egidio, G. Pagnani and M. Pisante (2018)** Light quantity and quality supplies sharply affect growth, morphological, physiological and quality traits of basil. *Industrial Crops and Products*, 122:277-289, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.073>
- Stamps R. H. (1994)** Evapotranspiration and nitrogen leaching during leatherleaf fern production in shadehouses. Special Publication SJ94-SP10. St Johns River Water Management District, Palatka Florida, USA. 103 p.
- Stamps R. H. (2009)** Use of colored shade netting in horticulture. *HortScience*. 44:239-241, <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.239>
- Tang C., B. T. Cobley, S. Mokhtara, C. E. Wilson and H. Greenway (1993)** High pH in the nutrient solution impairs water uptake in *Lupinus angustifolius* L. *Plant and Soil*. 155:517-519, <https://doi.org/10.1007/BF00025097>
- Wilkinson S. and W. J. Davies (1997)** Xylem sap pH increase: a drought signal received at the apoplastic face of the guard cell that involves the suppression of saturable abscisic acid uptake by the epidermal symplast. *Plant Physiology*. 113:559-573, <https://doi.org/10.1104/pp.113.2.559>
- Weyers J. D. B. and H. Meidner (1990)** Methods in Stomatal Research. Longman Scientific & Technical, England. 233 p.
- Zhang H., H. Zhong, J. Wang, X. Sui and N. Xu (2016)** Adaptive changes in chlorophyll content and photosynthetic features to low light in *Physocarpus amurensis* Maxim and *Physocarpus opulifolius* “Diabolo”. *PeerJ*. 4:e2125, <https://doi.org/10.7717/peerj.2125>

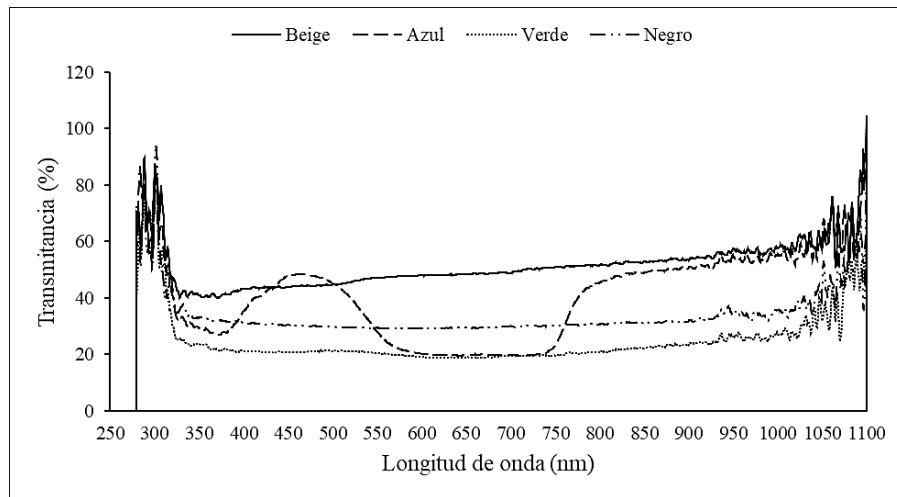


Figura 1. Transmitancia medida bajo malla sombra de color al medio día solar (12:00 pm). Los datos son la relación en % entre la radiación medida fuera y dentro de las mallas.

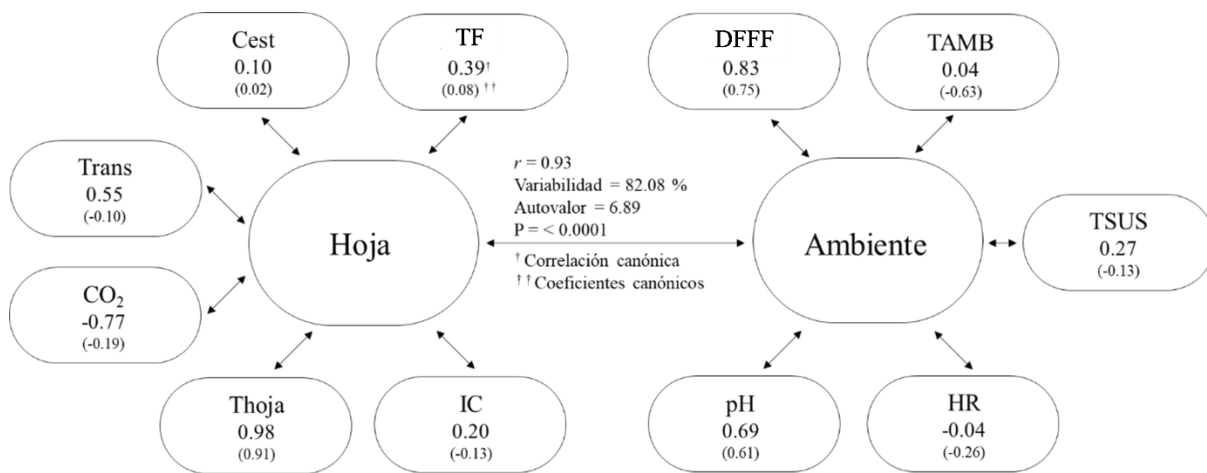


Figura 2. Correlación canónica entre el primer par de variables canónicas y la correlación simple con sus respectivas variables originales. DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos, TAMB: temperatura del ambiente, TSUS: temperatura del sustrato, HR: humedad relativa, pH: pH del sustrato, TF: tasa fotosintética, Cest: conductancia estomática, Trans: transpiración, CO₂: CO₂ intercelular, Thoja: temperatura de la hoja, IC: índice de clorofila.

**IV. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, INTERCAMBIO DE GASES
Y FISIOLOGÍA DE HOJAS DE FRESA CV. ALBIÓN BAJO
MALLAS DE COLOR**

CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL, INTERCAMBIO DE GASES Y FISIOLOGÍA DE HOJAS DE FRESA CV. ALBIÓN BAJO MALLAS DE COLOR

4.1. RESUMEN

Las mallas de color o foto-selectivas filtran la radiación solar y modifican la calidad de luz que reciben las plantas, también modifican los factores ambientales y estimulan respuestas fisiológicas en la planta, lo que puede repercutir en el intercambio de gases en la hoja, y a su vez puede influenciar la anatomía foliar. El objetivo de este estudio fue definir como las mallas de color modifican las condiciones ambientales, el intercambio de gases, la concentración de azúcares, pigmentos y anatomía de la hoja de la planta de fresa cv. Albión. Se caracterizó la calidad de luz transmitida por las mallas, las condiciones ambientales de crecimiento, el intercambio de gases, así como, parámetros de anatomía y pigmentos en la hoja. Entre las mallas de color, la malla sombra verde y negra disminuyeron la densidad del flujo de fotones fotosintéticos en 77 %, el número de capas de parénquima en empalizada 50 %, un 8 % el grosor de la hoja, así como 46 % el número de estomas y 20 % el contenido de clorofila total. La malla verde, negra y beige disminuyeron la tasa fotosintética 36 % y aumentaron la concentración de CO₂ intercelular en la hoja 6 %, también la malla verde y beige disminuyeron 27 % la concentración de azúcares solubles totales.

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch., calidad de luz, fotosíntesis, conductancia estomática, clorofila.

ENVIRONMENTAL CHARACTERIZATION, GAS EXCHANGE AND LEAF PHYSIOLOGY IN STRAWBERRY PLANTS CV. ALBION UNDER COLORED SHADE NETS

4.2. ABSTRACT

Colored or photo selective shade nets filter solar radiation and modify the quality of light received by plants, which can alter the environmental factors and stimulate physiological responses in the plant that in turn affect leaf gas exchange and leaf anatomy. The objective of this study was to determine the effect of colored shade nets on the environmental conditions, the gas exchange, the sugar concentration, the pigments and the leaf anatomy of strawberry cv. Albion. The quality of light transmission through the colored nets, environmental growth conditions, gas exchange, and leaf anatomy and pigment parameters were characterized. Among the colored nets, green and black shade nets decreased the photosynthetic photon flux density by 77 %, palisade parenchyma layers by 50 %, leaf thickness by 8 %, number of stomata by 46 %, total chlorophyll content by 20 %. Green, black and beige nets decreased the photosynthetic rate 36 % and increased the intercellular CO₂ concentration 6 %, also green and beige nets decreased total soluble sugars 27 %.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch., Light quality, photosynthesis, stomatal conductance, chlorophyll.

4.3. INTRODUCCIÓN

El cultivo de fresa es muy importante a nivel mundial, ya que el fruto posee un alto valor económico y nutricional; la fresa es originaria de zonas templadas, sin embargo, se ha establecido también en las zonas de los trópicos y subtrópicos (Hancock, 2020). Debido al aumento de temperatura, resultado del cambio climático, el cual puede ocasionar efectos adversos en la fenología de las plantas y producción de frutos (Campoy et al., 2011; Manja & Aoun, 2019), se ha promovido el establecimiento de este cultivo bajo malla sombra como una alternativa de producción, ya que resulta de menor costo de implementación, comparado con otras cubiertas como el vidrio o el plástico para invernadero (Arthurs et al., 2013), sobre todo en zonas con mayor radiación (Neri et al., 2012).

El uso de mallas en la agricultura puede proveer protección a los cultivos contra radiación excesiva, vientos o plagas (Shahak, 2008), la malla sombra negra usada de manera convencional, modifica la cantidad de radiación que recibe la planta. Por otra parte, las mallas de color o mallas foto-selectivas debido a su diseño, densidad de tejido, color y aditivos pueden filtrar la radiación solar y modificar la calidad de luz, al promover la transmisión de longitudes de onda específicas (Stamps, 2009; Whitlam & Halliday, 2007), lo que puede resultar en la estimulación de respuestas fisiológicas como la fotosíntesis y la fotomorfogénesis. Al reducir la radiación, también es posible modificar los factores ambientales donde se desarrolla la planta, como la temperatura del aire, del suelo y de la planta, la humedad relativa y la velocidad del viento (Stamps, 1994; Stamps, 2009), lo cual puede repercutir en el intercambio de gases en la hoja, transpiración, respiración y fotosíntesis de la planta. Todo lo anterior tiene influencia sobre la anatomía foliar, distribución de biomasa y rendimiento del fruto (Damián-Nava et al., 2009).

El intercambio de gases en la hoja y la pérdida de agua en la planta está restringido y modulado principalmente por los estomas (Webb & Mansfield, 1992), procesos que determinan el desarrollo y crecimiento vegetal y pueden

ser estimados por medio de la tasa de asimilación de CO₂, transpiración y conductancia estomática; estos indicadores brindan información sobre la respuesta fisiológica de crecimiento de la planta a determinadas condiciones ambientales (Choi, 2021) y su evaluación, puede indicar si la producción bajo las mallas de color puede favorecer el desarrollo óptimo del cultivo.

A pesar de que se ha reportado que la malla sombra de color puede cambiar el desarrollo y crecimiento de la planta (Retamales et al., 2008; Stamps, 2009), así como modificar el contenido de pigmentos foliares y fitoquímicos de los frutos, el rendimiento y el tiempo de cosecha (Arthurs et al., 2013) estas investigaciones son limitadas (Aras & Eşitken, 2019) y los resultados obtenidos son variables, debido a los distintos tipos de mallas empleadas y a su fabricación (Díaz-Pérez & St. John, 2019). Por lo anterior el objetivo de este estudio fue determinar cómo las mallas de color modifican las condiciones ambientales, el intercambio de gases de la planta; conocer su efecto en la concentración de azúcares, pigmentos y en la anatomía de la hoja de fresa cv. Albión; así como definir si alguna malla de color en especial puede favorecer su crecimiento y desarrollo del cultivo.

4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1. Establecimiento del cultivo

El experimento se realizó en un invernadero con cubierta de cristal ubicado en los 19° 20' N y 98° 53' O, a una altitud de 2240 m. en la temporada primavera-invierno de 2022. Se establecieron plantas de fresa cv. Albión (de día neutro) en contenedores de plástico de 5 L, en un sistema hidropónico abierto.

Se usó como sustrato una mezcla de turba:agrolita (70:30 v/v), los riegos se realizaron tres veces por semana con 800 mL de solución nutritiva al 60 % (pH de 6 y CE de 1.7 dS m⁻¹) procurando un drenaje del 25 %. Se empleó agua de grifo para preparar la solución nutritiva, considerando su composición iónica y la solución nutritiva contenía 9 me L⁻¹ de NO₃⁻, 0.39 meq L⁻¹ de H₂PO₄⁻, 0.26 meq L⁻¹ de SO₄⁻², 4.43 meq L⁻¹ de K⁺, 5.83 meq L⁻¹ de Ca⁺², 1.94 meq L⁻¹ de Mg⁺² y

3.24 ppm Fe-EDTA, 0.14 ppm Zn-EDTA, 0.05 ppm Cu-EDTA, 0.73 ppm Mn-EDTA, 0.05 ppm Mo-EDTA, 0.13 ppm B-EDTA.

4.4.2. Espectro de luz transmitida y variables ambientales

A los 25 días después del trasplante (ddt) las plantas se cubrieron con malla (80 % sombra) color negro, verde, azul, beige y se estableció un testigo sin malla. Cada malla se colocó a una altura de 1.5 m cubriendo los costados, bajo cada malla se colocó un ventilador de aire Man® modelo Freal 2020 (CDMX, México) que mantenía un flujo de aire medido con un anemómetro Steren® HER 440 (CDMX, México) a una velocidad de 0.15 y 0.25 m s⁻¹, los ventiladores de aire encendían durante las horas de mayor temperatura en el invernadero (de 11 a 16 h.). Al medio día solar (12:00 pm), se registró el espectro de irradiancia en cada malla, con un radiómetro multiespectral PS-300 (Apogee Instruments Inc., Utah, EE. UU.) y se registraron las variables ambientales siguientes: densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) en días con cielo despejado con un medidor LGBQM2 (Hydrofarm, California, EE. UU.), temperatura del ambiente y humedad relativa con un datalogger RC-51H (Elitech Technology, California, EE. UU.) y temperatura del sustrato con un termómetro para suelo (TFA Dostmann, Wertheim, Alemania), el cual se introdujo a 20 cm de profundidad. Se midió el pH y CE del drenaje con un medidor HI981030 y HI98331 (Hanna Instruments Inc., EE. UU.), respectivamente una vez por semana.

4.4.3. Variables de intercambio de gases en la hoja

A los 50 ddt, en el foliolo central de una hoja madura y totalmente expandida de nueve plantas por tratamiento, se realizó una medición de intercambio de gases en las hojas con un analizador de gases infrarrojo LI-6400XT (LI-COR Biosciences, Nebraska, EE. UU.); además, se realizó la medición del índice de clorofila con un medidor SPAD (Minolta 502; Konica Minolta Inc., Osaka, Japón).

4.4.4. Azúcares solubles totales, variables anatómicas y pigmentos en la hoja

Se cuantificaron los azúcares solubles totales en la hoja por el método de antrona (Witham et al., 1971) a partir de 3 g de hoja fresca, la cual fue obtenida a partir de la selección del foliolo central de la hoja madura en 10 plantas por tratamiento. Se calculó la concentración de azúcares a partir de una curva patrón de glucosa (hasta 250 μg de glucosa mL^{-1}) ($y = 0.0042x + 0.0442$; $R^2 = 0.989$). Las lecturas fueron tomadas en un espectrofotómetro Thermo Spectronic Genesys 10 UV (New York, EE. UU.) a 600 nm.

Con ayuda de un bisturí se realizaron 6 cortes anatómicos de hoja madura de aprox. 5 x 5 mm de la parte media de la hoja, ubicada entre la vena central y el borde a partir de la selección del foliolo central de 3 hojas provenientes de 3 plantas por tratamiento, los cortes fueron colocados en fijador FAA (50 % etanol a 96 % + 5 % ácido acético glacial + 10 % de formaldehído a 37 % + 35 % agua) por una semana, posteriormente fueron colocados en GAA (25 % Glicerol + 50 % etanol + 25 % agua) para su fijación permanente, luego fueron incluidos en parafina (Paraplast McCormick, Alemania) en un histokinette Leica® (modelo 2000, Alemania). Con un micrótopo rotatorio (Leica® 820, Alemania) se obtuvieron cortes de 10 μm , los cuales fueron preparados para su observación siguiendo la metodología descrita por Avitia (1996). A partir de estos cortes anatómicos se contabilizó el número de capas del parénquima en empalizada y el grosor de la hoja con ayuda de un micrómetro objeto y ocular en un microscopio (Carl Zeiss® Axiostar, Alemania) con aumento de 40x, empleando nueve repeticiones por tratamiento.

La densidad estomática (número de estomas mm^{-2}) se midió a partir de la impresión con barniz transparente en el envés de 2 hojas por tratamiento, eligiendo el foliolo central de la hoja madura, posteriormente se despegó esta calca y se contabilizó la cantidad de estomas por campo en el microscopio (Carl Zeiss® Axiostar, Alemania) con un aumento de 40X, obteniendo 12 observaciones por tratamiento.

Se determinó el contenido de clorofila a, b, total y carotenoides en 0.1 g de hoja fresca proveniente de 9 plantas por tratamiento. Se seleccionó el foliolo central de la hoja madura, se cortó y se maceró con acetona a 80 % y se dejó reposar durante 24 horas; posteriormente se realizaron las determinaciones en un espectrofotómetro Thermo Spectronic Genesys 10 UV (New York, EE. UU.) a 470, 645 y 663 nm empleando el método descrito por la Association of official analytical chemists (1980) y Witham et al. (1971).

4.4.5. Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y un testigo, con 18 repeticiones para las características ambientales y nueve para características de intercambio de gases y características fisiológicas de la hoja por tratamiento; la unidad experimental consistió en una planta por maceta. Se realizó una prueba de Kruskal-Wallis (Conover, 1999) para las variables ambientales y de intercambio de gases, un análisis de varianza (ANOVA) (Gutiérrez & de la Vara, 2008) para las variables de anatomía y pigmentos en la hoja, excepto para la variable número de capas de parénquima en empalizada y estomas (Kruskal-Wallis); así como sus comparaciones múltiples (prueba de Tukey y Dunn) (Conover, 1999) con el programa SAS versión 9 y Minitab® 19, se consideraron diferencias significativas cuando $p \leq 0.05$.

4.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.5.1. Espectro de luz transmitida

De acuerdo con la Figura 1, la malla de color azul transmitió una mayor cantidad de luz con longitud de onda azul (30 %) y una menor cantidad de luz roja (19 %) en comparación con el resto de las mallas de color y el testigo. Tanto en la malla negra, verde, beige y el testigo la luz de color verde y roja tuvieron la mayor transmisividad (26 y 24 %), seguida por luz azul y roja lejana (22 %) y por último la luz UV-B y UV-A se transmitieron en las mallas en

cantidades menores al 5 % en comparación al resto de las longitudes en el intervalo de 280 a 800 nm. De acuerdo con Castellano et al. (2008), las propiedades radiométricas de las mallas que afectan la producción en agricultura, son la transmisividad, el factor de sombreo, reflectividad y la capacidad para modificar la calidad de la radiación, entre ellas la más importante es la transmisión de la DFFF que va de 400 a 700 nm, que está relacionada con la fotosíntesis y el crecimiento de las plantas.

En este estudio, la malla azul transmitió menos radiación de luz roja (600 a 700 nm), lo cual puede repercutir en el desarrollo de las plantas, ya que este tipo de radiación forma parte de la DFFF y posee el más alto rendimiento cuántico, mientras que la luz azul y verde son consideradas menos eficientes para la fotosíntesis (Kim et al., 2020). De acuerdo con Stamps (2009) las mallas de color pueden modificar la relación rojo/rojo lejano que es detectada por los fitocromos, la cantidad de luz para activar fotoreceptores de luz azul/UV-A o fototropinas; en este estudio, la malla azul presentó una relación rojo/rojo lejano baja y azul/rojo alta en comparación con el resto de las mallas de color y el testigo (Figura 1), lo que indicaría que la malla azul puede influir en la morfología, fisiología y composición del fruto, tal como lo reportaron Thwe et al. (2020) quienes usaron mallas de color azul y rojo en un cultivo de *Solanum lycopersicum* Mill. y encontraron que una relación azul/rojo alta mejoró el desarrollo reproductivo, pero limitó el crecimiento de órganos en la planta.

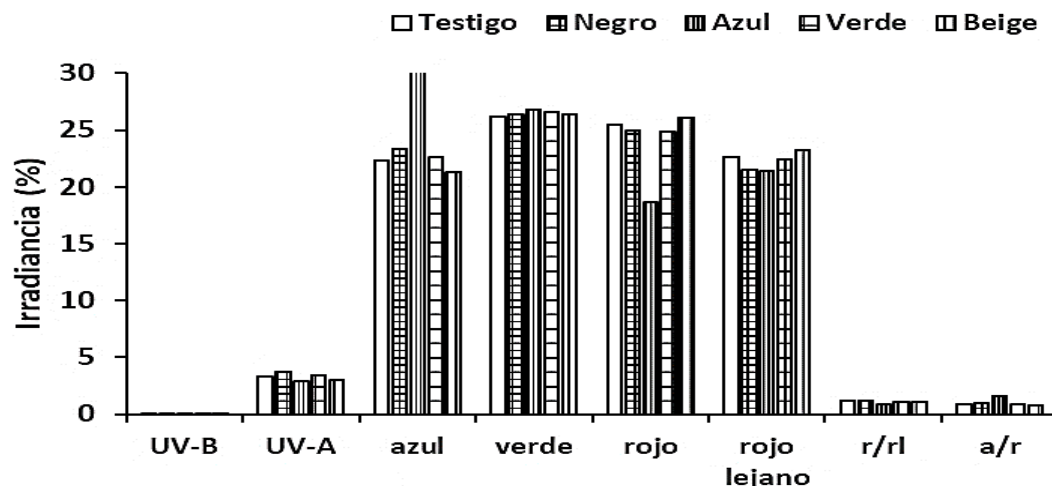


Figura 1. Distribución de la irradiancia espectral de 280 a 800 nm en % (en relación con el total) medida bajo malla sombra de color en fresa cv. Albión.

4.5.2. Variables ambientales

El análisis estadístico mostró un efecto significativo de las mallas de color sobre las variables ambientales, donde se desarrollaron las plantas de fresa (Cuadro 1). La DFFF recibida por las plantas disminuyó aproximadamente 77 % en la malla negra y verde (iguales estadísticamente) y 62 % en la beige y azul (iguales estadísticamente), en comparación con el testigo; esta reducción se debe principalmente al porcentaje de sombreo y a las características propias de las mallas como su color, ya que de acuerdo con Shahak (2008), las mallas oscuras pueden reducir la cantidad de luz que transmiten hacia las plantas debido a que sombrean por igual en toda la banda del espectro electromagnético reduciendo la DFFF, también Ayala-Tafoya et al. (2011) y Oren-Shamir et al. (2001) señalaron que la malla de color negro, debido a que los hilos que la componen son opacos, sólo se transmite la radiación que pasa a través de los orificios del tejido; Arthurs et al. (2013) e Ilić et al. (2017) reportaron decrementos de la DFFF del 55 al 60 % y del 50 % con mallas de color negro, en comparación con el testigo; de acuerdo con Stamps (2009) a diferencia de las mallas negras, las mallas de color transmiten una mayor radiación y esta se filtra de manera selectiva, como fue el caso de la malla azul y beige en este estudio.

Cuadro 1. Efecto de la malla sombra de color sobre variables ambientales y del sustrato en fresa cv. Albión.

Malla Sombra	DFFF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	TAMB (°C)	HR (%)	TSUS (°C)	DpH	DCE
Testigo	1452 $\pm$ 37 a [†]	36.5 $\pm$ 0.7 a	28.5 $\pm$ 1.5 b	30.7 $\pm$ 0.7 a	6.0 $\pm$ 0.1 a	1.5 $\pm$ 0.2 a
Negro	348 $\pm$ 11 c	33.2 $\pm$ 0.5 c	41.2 $\pm$ 1.9 a	24.5 $\pm$ 0.6 c	6.0 $\pm$ 0.1 a	1.4 $\pm$ 0.2 a
Azul	507 $\pm$ 13 b	35.4 $\pm$ 0.6 ab	38.2 $\pm$ 1.7 a	26.0 $\pm$ 0.5 bc	6.1 $\pm$ 0.1 a	1.6 $\pm$ 0.2 a
Verde	323 $\pm$ 9 c	33.1 $\pm$ 0.5 c	38.5 $\pm$ 2.2 a	27.8 $\pm$ 0.6 b	6.1 $\pm$ 0.1 a	1.2 $\pm$ 0.2 a
Beige	593 $\pm$ 16 b	34.9 $\pm$ 0.4 bc	38.5 $\pm$ 1.8 a	27.3 $\pm$ 0.4 b	6.1 $\pm$ 0.1 a	1.4 $\pm$ 0.2 a

Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de 18 repeticiones. [†]Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Kruskal-Wallis, Dunn, $p \leq 0.05$). DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos, TAMB: temperatura del ambiente, TSUS: temperatura del sustrato, HR: humedad relativa, DpH: pH del drenaje, DCE: conductividad eléctrica del drenaje.

La temperatura del ambiente fue 3 °C menor bajo las mallas negra, verde y beige en comparación con el testigo ($p \leq 0.05$), esto se debe a que el porcentaje de sombreado que reduce la radiación hacia el cultivo también reduce la temperatura del ambiente como mencionan Shahak et al. (2004). Manja y Aoun (2019) mencionan que el efecto de las mallas sobre la temperatura aun no es bien entendido, ya que se reportaron resultados contradictorios debido al microclima específico que genera cada tipo de malla y la manera en que se coloca sobre el cultivo; Arthurs et al. (2013) reportaron un incremento de temperatura dentro de las mallas de color en comparación con la malla negra y el testigo, debido a una mayor resistencia al viento, ellos proponen que debido a que las mallas de color contienen hilos que son parcialmente transparentes, se emplea mayor cantidad de estos hilos para el crear un factor de sombra similar a la malla negra, lo cual resulta en poros pequeños con un área más reducida; Pérez et al. (2006) también reportaron que dentro de una casa sombra cerrada por los costados las temperaturas durante el día suelen ser mayores que afuera.

La humedad relativa fue aproximadamente 10 % mayor bajo las mallas de color en relación con el testigo ($p \leq 0.05$), entre las mallas no existieron diferencias significativas. La temperatura del sustrato se redujo 6 °C en la malla negra y azul, y 3 °C en la malla verde y beige en con el testigo ($p \leq 0.05$). No existieron

diferencias significativas en el pH y CE del drenaje entre tratamientos ($p>0.05$). De acuerdo con Castellano et al. (2008) la permeabilidad de una malla es la habilidad de transmitir el aire a través de ella y junto con la porosidad influyen el clima bajo la malla, entonces estas características pueden modificar la velocidad del aire, humedad y temperatura, Wachsmann et al. (2014) reportaron que el uso de mallas puede aumentar la humedad relativa debido a que estas reducen la velocidad del viento, lo que restringe el intercambio de aire y aumenta el vapor de agua debido a la transpiración del cultivo.

En este estudio tanto la malla negra como la verde fueron las que disminuyeron más la DFFF y la temperatura ambiental en comparación con la malla azul cuyo comportamiento fue más parecido al testigo. De acuerdo con Stamps (2009) las mallas, independientemente del color, reducen la radiación que llega a las plantas, a mayor nivel de sombreado mayor radiación será bloqueada, lo que también influye en la temperatura (del aire, planta y suelo) y la humedad relativa.

4.5.3. Variables de intercambio de gases en la hoja

Existieron diferencias significativas en las variables de intercambio de gases de la hoja de fresa (Cuadro 2). La tasa fotosintética en las hojas cultivadas bajo la malla negra, verde y beige (efecto igual estadísticamente) fue 36 % menor, en comparación con el testigo y la malla azul (efecto igual estadísticamente). Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron en un estudio con mallas de colores en *Capsicum annum* L. (30 a 46 % de sombreado) que la tasa fotosintética fue entre 12 y 16 % mayor en mallas de color negro, rojo y plata, en comparación con el testigo; en este estudio la disminución de la tasa fotosintética bajo las mallas puede ser debido al porcentaje de sombreado del 80 %, que redujo la intensidad de luz transmitida hacia las plantas y la cual está relacionada con la fotosíntesis, también puede ser atribuido al propio sistema de producción en invernadero de cristal, ya que Hancock (2020) reportó un intervalo de tasa fotosintética de 15 a 25 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en *F. × ananassa* Duch. cultivada en

campo, los cuales son aproximadamente del doble que los obtenidos en este estudio.

Cuadro 2. Efecto de la malla sombra de color sobre variables de intercambio de gases en hojas de fresa cv. Albión.

Malla sombra	TF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Cest ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Trans ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	CO ₂ ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	Thoja (°C)
Testigo	11.8 ± 0.2 a [†]	0.14 ± 0.0 a	4.99 ± 0.15 a	208 ± 4.0 b	35.0 ± 0.25 a
Negro	7.4 ± 0.2 b	0.12 ± 0.0 a	3.39 ± 0.10 b	224 ± 5.4 a	33.3 ± 0.12 ab
Azul	8.3 ± 0.4 a	0.11 ± 0.0 a	3.63 ± 0.14 b	220 ± 6.3 b	33.5 ± 0.20 a
Verde	7.4 ± 0.1 b	0.09 ± 0.0 b	3.44 ± 0.10 b	228 ± 2.7 a	33.6 ± 0.20 a
Beige	7.6 ± 0.2 b	0.11 ± 0.0 a	3.21 ± 0.12 b	229 ± 3.6 a	32.4 ± 0.14 b

Datos expresados como la media ± error estándar de 9 repeticiones. [†]Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Kruskal-Wallis, Dunn, $p \leq 0.05$). TF: tasa fotosintética, Cest: conductancia estomática, Trans: transpiración, CO₂: CO₂ intercelular, Thoja: temperatura de la hoja.

El efecto de la malla verde sobre la conductancia estomática fue inferior ($p \leq 0.05$) a los demás tratamientos, esta fue 26 % menor con la malla verde en comparación al testigo (Cuadro 2). Lobos et al. (2012) proponen que las mallas pueden reducir la depresión fotosintética o reducción en la fijación de carbono que ocurre al medio día debido a altas temperaturas y el cierre de estomas, lo que reduce la conductividad estomática, en este estudio las mallas no modificaron la conductancia, sólo la malla verde la redujo en comparación con el testigo, tendencia contraria a lo reportado por otros autores que han reportado un aumento en la conductancia estomática en plantas cultivadas bajo mallas pero sin efecto significativo del color; Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron una conductancia de 39 a 59 % mayor que el testigo en plantas de *C. annum* L. bajo mallas de color con porcentaje de sombreo de 30 a 46 % y Aras y Eşitken (2019) en *F. x ananassa* Duch. reportaron aumentos de 1 % en comparación al testigo usando mallas con 40 % sombra.

La transpiración fue aproximadamente 32 % menor en las mallas (efecto igual estadísticamente) en comparación con el testigo, entre las mallas no existieron diferencias significativas (Cuadro 2), la menor transpiración bajo las mallas de color puede estar relacionado con la mayor humedad relativa y menor

temperatura generada por estas (Cuadro 1) en comparación con el testigo lo que ocasionó un déficit de presión de vapor bajo por lo cual la transpiración de la hoja disminuyó en las mallas.

La concentración de CO₂ en las hojas de las plantas cultivadas en la malla negra, verde y beige (efecto igual estadísticamente) fue 6 % mayor en comparación con el testigo y la malla azul (Cuadro 2), este comportamiento es contrario al resultado obtenido en la variable tasa fotosintética, lo que puede estar relacionado con una menor actividad fotosintética en las plantas cultivadas bajo estas mallas, como la tasa fotosintética fue mayor en la malla azul y el testigo, la concentración de CO₂ en la hoja fue menor. Esta tendencia es similar a lo mencionado por Díaz-Pérez y St. John (2019) quienes reportaron una concentración de CO₂ de 8 a 12 % mayor con mallas de color en comparación con el testigo y con Avendaño-Abarca et al. (2023) en *F. x ananassa* Duch cultivada bajo distintas proporciones de luz verde y azul, observaron que una alta tasa fotosintética estuvo asociada a una baja concentración de CO₂ interna en la hoja y a una alta conductancia estomática, también corresponde con Oguchi et al. (2005) quienes reportaron que la concentración de CO₂ intercelular es menor en especies que crecen en mayor luminosidad que las que crecen en baja luminosidad.

La temperatura de la hoja fue 2.5 °C menor en las plantas cultivadas en la malla beige en comparación con el testigo ($p \leq 0.05$), no existieron diferencias en la temperatura de las hojas cultivadas bajo la malla negra, verde y azul con el testigo ($p > 0.05$) (Cuadro 2). Díaz-Pérez y St. John (2019) reportaron que la temperatura de la hoja de *C. annum* L. fue de 0.8 a 2 °C menor en plantas bajo mallas de color en comparación con el testigo, Aras y Eşitken (2019) reportaron que no existieron diferencias en la temperatura de la hoja en *F. x ananassa* Duch. cultivada bajo mallas de color en comparación con el testigo. Stamps (2009) indicó que las mallas pueden afectar la transpiración, fotosíntesis, respiración y otros procesos, ya que reducen el movimiento y recambio del viento, este movimiento de viento depende de la porosidad y la ubicación física

de la malla en relación con las plantas y puede ser modificada por la hora del día o la temporada.

En este estudio, sólo los parámetros de tasa fotosintética y concentración de CO₂ en la hoja de fresa se vieron influidos principalmente por la malla sombra de color azul, lo cual puede ser resultado de una mayor transmisión de DFFF sobre las plantas cultivadas en esta malla, comparado con el resto de las mallas de color, tal como lo menciona Hancock (2020) que en general mayores niveles de luz se traducen en mayores tasas de asimilación de CO₂. También puede estar relacionado con la mayor cantidad de luz azul transmitida por esta malla en comparación con el resto, ya que se ha reportado que la luz azul funciona como una señal para la apertura de los estomas, lo cual tiene efecto sobre los parámetros de intercambio de gases como la fotosíntesis, transpiración, concentración interna de CO₂ en la hoja y conductancia estomática (Inoue & Kinoshita, 2017; Taíz & Zieger, 2006).

4.5.4. Azúcares solubles totales y variables anatómicas de la hoja

El análisis de varianza indicó que existen diferencias significativas en la cantidad de azúcares solubles totales y variables anatómicas en las hojas de la planta de fresa (Cuadro 3). La concentración de azúcares solubles totales en las hojas cultivadas en la malla verde y beige fue 27 % menor en comparación con el testigo y la malla azul ($p \leq 0.05$), por lo que las plantas que crecieron en un ambiente con mayor DFFF generaron mayor cantidad de azúcares solubles totales en las hojas, lo cual corresponde con una mayor tasa fotosintética en las hojas del testigo y de la malla azul (Cuadro 2). En el caso de la malla beige, aunque tuvo una DFFF igual a la malla azul, estos no generaron gran cantidad de azúcares solubles totales, quizá debido a una menor tasa fotosintética (Cuadro 2).

Cuadro 3. Efecto de la malla sombra de color sobre azúcares solubles totales y variables anatómicas en hojas de fresa cv. Albión.

Malla sombra	AST (g 100 g ⁻¹ de p.f.)	NCP	GSR (μm)	NEST (mm ²)
Testigo	3.45 ± 0.11 a [†]	2 ± 0.00 a	120.50 ± 1.28 bc	136.26 ± 5.24 a
Negro	2.72 ± 0.13 bc	1 ± 0.17 b	110.22 ± 3.51 d	79.48 ± 4.51 c
Azul	3.11 ± 0.14 ab	2 ± 0.00 a	127.78 ± 1.84 ab	105.98 ± 2.01 ab
Verde	2.22 ± 0.09 d	1 ± 0.00 b	114.72 ± 2.78 cd	68.13 ± 2.75 c
Beige	2.59 ± 0.08 cd	2 ± 0.00 a	132.50 ± 1.44 a	94.62 ± 3.30 b

Datos expresados como la media ± error estándar de 9 repeticiones. [†]Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (prueba Dunn para el número de capas de parénquima y número de estomas, y Tukey para el resto, $p \leq 0.05$). AST: azúcares solubles totales, NCP: número de capas de parénquima en empalizada, GSR: grosor de hoja, NEST: número de estomas.

El número de capas de parénquima en empalizada en las hojas de las plantas del testigo, malla azul y beige (efecto estadísticamente igual) fue el doble, en comparación con las hojas cultivadas en la malla negra y verde (Cuadro 3), en consecuencia, el grosor de las hojas también fue mayor en las plantas que crecieron en la malla beige y azul (10 y 6 % respectivamente) ($p \leq 0.05$), en la malla negra fueron 8 % menores en comparación con el testigo (Cuadro 3 y Figura 2), por lo que las hojas de las plantas que crecieron con menor DFFF desarrollaron hojas más delgadas comparado con las mallas que transmitieron mayor radiación, este resultado concuerda con Ilić et al. (2017), quienes reportaron que el grosor de la hoja de *C. annuum* L. cultivada bajo mallas de color negro y perla al 40 % sombra fue 16 % menor comparado con el testigo, por otra parte, Larcher (2003) y Pallardy (2008) indicaron que las plantas que se desarrollan en menor cantidad de luz emplean cambios morfológicos que ayudan a maximizar el uso de la luz en el medio, por lo que las plantas adaptadas a la sombra tienen una mayor superficie foliar y área foliar específica, lo que resulta en hojas más delgadas en comparación con plantas adaptadas a mayor luminosidad.

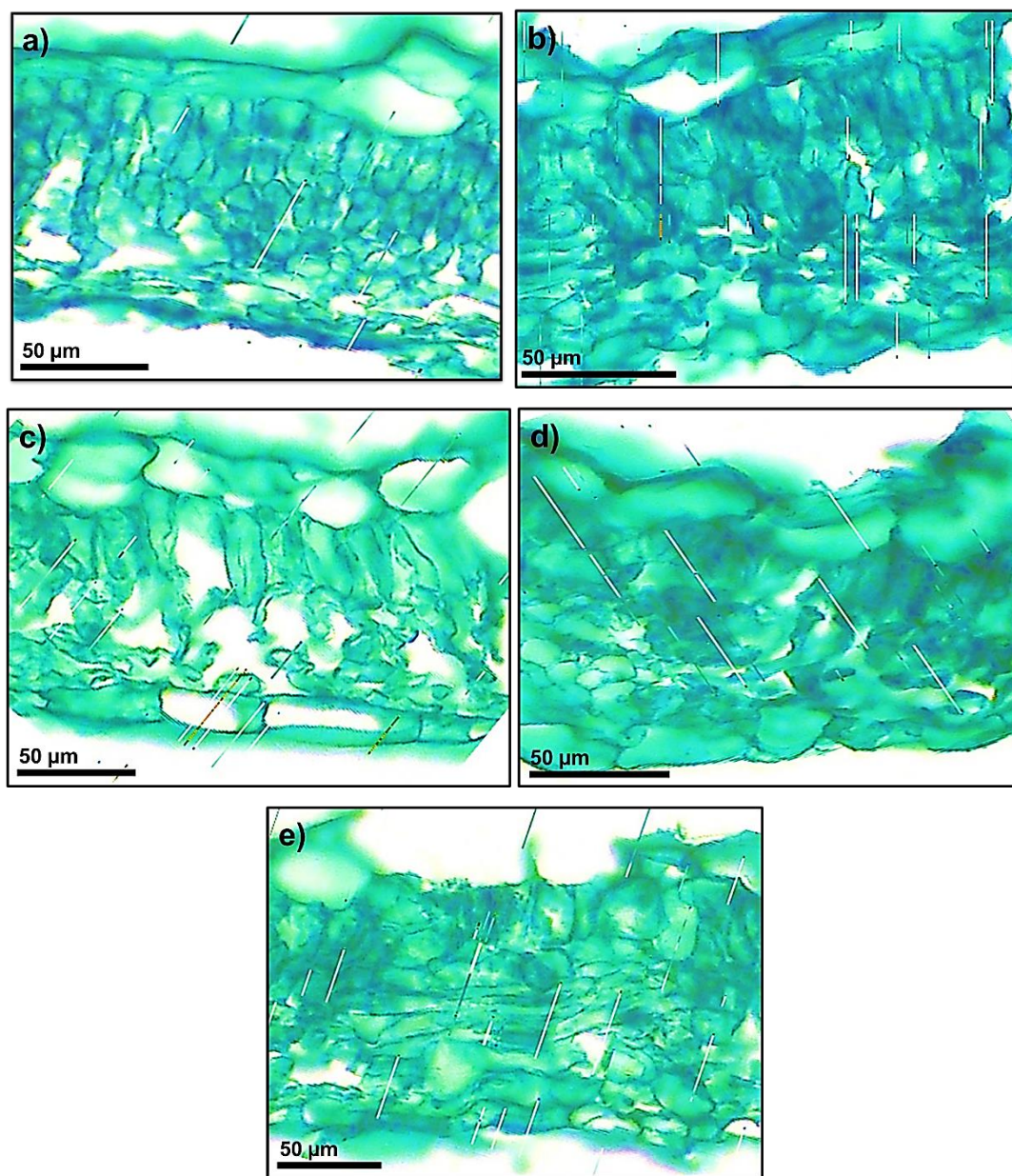


Figura 2. Cortes anatómicos de la hoja de fresa cv. Albión (40x) cultivada bajo malla sombra de colores. a) malla negra, b) malla azul, c) malla verde, d) malla beige y e) testigo.

El número de estomas de las hojas cultivadas en la malla beige fue 31 % menor y en la malla negra y verde (efecto estadísticamente igual) fue 46 % menor en comparación con el testigo (Cuadro 3). Aunque todas las plantas que crecieron bajo mallas de color tuvieron menor frecuencia estomática en comparación al testigo, las hojas de las plantas que crecieron en las mallas que transmitieron mayor irradiancia, como la azul y beige, así como en el testigo, tuvieron mayor

frecuencia de estomas en comparación con la malla negra y verde. Yang et al. (2022) reportaron que en la hoja de *F. x ananassa* Duch. expuesta a una menor intercepción de luz, existió un decremento del 5 % en la frecuencia de estomas, siendo estos de mayor tamaño en comparación con las hojas que estuvieron expuestas a una mayor intercepción de luz y que tuvieron estomas de menor tamaño. Asimismo, Pallardy (2008) reportó que las hojas que crecen en la sombra tienen pocos estomas por unidad de área foliar pero de mayor tamaño. Sack y Buckley (2016) señalaron que la frecuencia y tamaño de los estomas son considerados indicadores de aclimatación y adaptabilidad de las plantas a diferentes condiciones, una mayor frecuencia de estomas en la hoja disminuye el riesgo de daño por estrés y de acuerdo con Kardel et al. (2010) una mayor frecuencia de estomas pequeños abiertos puede ser una estrategia para tener mayor intercambio de gases, aunque en este estudio no se consideró el tamaño de los estomas, se observó una tendencia similar a la reportada por estos autores donde la malla negra y verde presentaron menor frecuencia estomática, pero estos eran más grandes en comparación con la malla azul y beige y el testigo.

4.5.5. Pigmentos en la hoja

El análisis estadístico mostró que existieron diferencias significativas en el contenido de pigmentos foliares entre las distintas mallas de color (Cuadro 4). El índice de clorofila en las hojas fue 7 % menor en las mallas de color (efecto estadísticamente igual) en comparación con el testigo. Entre mallas no existieron diferencias significativas; el contenido de clorofila a fue 22 % menor en las hojas cultivadas en malla verde en comparación con el testigo ($p \leq 0.05$) y entre las mallas de color fue 18 % mayor en la malla azul en comparación con la malla verde y negra. La clorofila b en las hojas provenientes de las mallas de color fue 23 % menor que el testigo ($p \leq 0.05$), entre mallas no existieron diferencias significativas (Cuadro 4).

La clorofila total en las mallas de color fue 13 % menor que el testigo ($p \leq 0.05$) y entre las mallas, la malla azul fue 22 % mayor en comparación con la malla

negra y verde. De acuerdo con Rajapakse y Shahak (2007), la clorofila a y b tienen una mayor absorción en la región rojo (600-700 nm) y azul (400-500 nm) con un pico cerca de 660 y 430 nm, respectivamente, y poca absorción en la región verde (500-600 nm), por lo que luz de color rojo o azul puede mejorar la fotosíntesis y con ello su productividad, lo que coincide con la mayor tasa fotosintética en las hojas cultivadas bajo la malla azul.

En este estudio en general el contenido de clorofila en las hojas cultivadas bajo mallas de color fue menor en comparación con el testigo, tendencia contraria a la reportada por otros autores como Casierra-Posada et al. (2014a), Casierra-Posada et al. (2014b) y Díaz-Pérez y St. John (2019) al usar cubiertas plásticas de color sobre un cultivo de *Fragaria* sp. cv. Chandler y *C. annuum* L. Los autores señalaron que el contenido de clorofila en las hojas que crecen con menor intensidad de luz es mayor, ya que requieren clorofila adicional para la captura de radiación difusa. Taiz y Zieger (2006), proponen que las hojas de sombra suelen tener más clorofila total, una relación clorofila b/a mayor y son usualmente más delgadas que las hojas al sol, ya que estas tienen células en empalizada más largas. Por otra parte, Aras y Eşitken (2019) y Zermeño-González et al. (2019) reportaron que no hubo diferencia significativa entre el contenido de clorofila de las hojas de *F. x ananassa* Duch. y *C. annuum* L. al ser cultivados bajo cubiertas de color rojo, negro y un testigo o estas diferencias sólo se presentaron en la etapa temprana de crecimiento de la planta.

Cuadro 4. Efecto de la malla sombra de color sobre pigmentos en hojas de fresa cv. Albión.

Malla sombra	ICI (SPAD)	A (mg g de tejido⁻¹)	B (mg g de tejido⁻¹)	TOT (mg g de tejido⁻¹)	CAR (mg g de tejido⁻¹)
Testigo	46.70 ± 0.33 a	1.35 ± 0.05 ab	0.64 ± 0.06 a	1.99 ± 0.06 a	5.03 ± 0.12 ab
Negro	43.28 ± 0.20 b	1.20 ± 0.05 bc	0.46 ± 0.02 b	1.66 ± 0.07 c	4.75 ± 0.16 ab
Azul	43.30 ± 1.04 b	1.39 ± 0.05 a	0.55 ± 0.02 ab	1.95 ± 0.06 ab	5.24 ± 0.17 a
Verde	43.56 ± 0.40 b	1.05 ± 0.04 c	0.49 ± 0.02 b	1.54 ± 0.06 c	4.46 ± 0.17 b
Beige	44.05 ± 0.25 b	1.25 ± 0.04 ab	0.48 ± 0.01 b	1.73 ± 0.05 bc	4.87 ± 0.14 ab

Datos expresados como la media ± error estándar de 9 repeticiones. †Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$). ICI: índice de clorofila, A: Clorofila a, B: clorofila b, TOT: clorofila total, CAR: carotenoides.

No existieron diferencias significativas en la concentración de carotenoides en las hojas de las plantas cultivadas bajo las mallas de color y el testigo ($p>0.05$), pero entre las mallas de color, el contenido de carotenoides en las hojas bajo la malla azul fue 17 % mayor en comparación con la malla verde, cuyos efectos son significativos ($p\leq 0.05$) (Cuadro 4). Casierra-Posada et al. (2014a) reportaron que no existieron diferencias significativas en hojas de *Fragaria* sp. cv. Chandler cultivadas entre cubiertas plásticas de color amarillo, azul, rojo, verde, transparente y el control, por otra parte, Ilić et al. (2017) reportaron un mayor contenido de carotenoides en hojas de *Lactuca sativa* L. en plantas cultivadas bajo mallas de color en comparación con el control.

Los carotenoides funcionan como agentes fotoprotectores, ya que la membrana fotosintética puede ser dañada fácilmente, debido a una gran cantidad de energía absorbida por los pigmentos como las clorofilas, entonces esta energía no puede almacenarse y necesita ser liberada, cuando esto no sucede puede reaccionar con oxígeno molecular, formando oxígeno singulete ($^1O_2^*$), el cual es extremadamente reactivo y puede dañar algunos componentes celulares como lípidos. Los carotenoides ejercen su función fotoprotectora, ya que apaciguan el estado excitado de la clorofila, al disipar la energía luminosa (Taiz & Zieger, 2006), es posible que el menor contenido de carotenoides en las hojas cultivadas bajo la malla verde sea debido a la menor cantidad de DFFF que transmitió esta malla en comparación con el resto, ya que un exceso de radiación puede generar especies reactivas de oxígeno, sobre todo en el fotosistema I (Taiz & Zieger, 2006).

4.6. CONCLUSIONES

Las mallas de color modificaron las características ambientales, de intercambio de gases, anatomía y pigmentos fotosintéticos de la hoja de la planta de fresa: la malla sombra verde y negra disminuyeron la DFFF, el número de capas de parénquima en empalizada y el grosor de la hoja, así como el número de estomas y el contenido de clorofila total. La malla verde, negra y beige

disminuyeron la tasa fotosintética y aumentaron la concentración de CO₂ intercelular en la hoja, también la malla verde disminuyó la concentración de azúcares solubles totales.

4.7. LITERATURA CITADA

- Association of Official Analytical Chemists. (1980). *Official Methods of Analysis*. 13th edition. Association of Official Analytical Chemists.
- Aras, S., & Eşitken, A. (2019). Physiological effects of photoselective nets in strawberry plant. *Journal Of Agriculture and Nature*, 22(2), 342-346. <https://doi.org/10.18016/ksutarimdog.vi.552218>
- Arthurs, S. P., Stamps, R. H., & Giglia, F. F. (2013). Environmental modification inside photoselective shadehouses. *HortScience*, 48(8), 975-979. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.975>
- Avendaño-Abarca, V. H., Alvarado-Camarillo, D., Valdez-Aguilar, L. A., Sánchez-Ortíz, E. A., González-Fuentes, J. A., & Cartmill, A. D. (2023). Response of strawberry to the substitution of blue light by green light in an indoor vertical farming system. *Agronomy*, 13(1), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010099>
- Avitia, G. E. (1996). *Anatomía precigótica y postciogótica en relación al aborto de óvulos y semillas en Spondias purpurea L.* [Tesis de Doctorado. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Botánica. Colegio de Postgraduados].
- Ayala-Tafoya, F., Zatarain-López, D. M., Valenzuela-López, M., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T de J., Díaz-Valdés, T., y Osuna-Sánchez J. A., 2011. Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 403-410. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792011000400403&script=sci_arttext
- Campoy, J. A., Ruiz, D., & Egea, J., 2011. Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context: A review. *Scientia Horticulturae*, 130(2), 357-372. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.07.011>
- Casierra-Posada, F., Matallana-Díaz, Y. A., Zapata-Casierra, E. (2014a). Growth of bell pepper plants (*Capsicum annuum*) affected by coloured covers. *Gesunde Pflanzen*, 66(4), 149-155. <https://doi.org/10.1007/s10343-014-0328-7>
- Casierra-Posada, F., Peña-Olmos, J.E., y Zapata-Casierra, E. (2014b). Contenido de pigmentos en hojas de fresa (*Fragaria* sp.) expuestas a diferente calidad de luz. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1), 87-94. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-42262014000100010&script=sci_arttext
- Castellano, S., Mugnozza, G. S., Russo, G., Briassoulis, D., Mistrionis, A., Hemming, S., & Waaijenberg, D. (2008). Plastic nets in agriculture: a

- general review of types and applications. *Applied. Engineering in Agricultural and Biological Engineers*, 24(6), 799-808. <https://doi.org/10.13031/2013.25368>
- Choi, H. G. (2021). Correlation among phenotypic parameters related to the growth and photosynthesis of strawberry (*Fragaria x anannassa* Duch.) grown under various light intensity conditions. *Frontiers in Plant Science*, 12, 647585. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.647585>
- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics*. Wiley.
- Damián-Nava, A., Ramírez-Ramírez, I., Peña-Valdivia, C. B., Díaz-Villaseñor, G., y González-Hernández, V. A. (2009). Características del intercambio de gases en hojas de guayabo (*Psidium guajava* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 15(2), 119-126. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1027-152X2009000200003&script=sci_abstract&tlng=pt
- Díaz-Pérez, J. C., & St. John, K. (2019). Bell pepper (*Capsicum annum* L.) under colored shade nets: plant growth and physiological responses. *HortScience*, 54(10), 1795-1801. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14233-19>
- Hancock, J. F. (2020). *Strawberries*. Second edition. CABI Publishing.
- Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L., Barać, S., Mastilović, J., Kevrešan, Ž., & Fallik, E. (2017). Effect of shading by coloured nets on yield and fruit quality of sweet pepper. *Zemdirbyste-Agriculture*, 104(1), 53-62. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.008>
- Inoue, S-I., & Kinoshita, T. (2017). Blue Light Regulation of stomatal opening and the plasma membrane H⁺-ATPase. *Plant Physiology*, 174(2), 531-538. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00166>
- Kardel, F., Wuyts, K., Babanezhad, M., Vitharana, U. W. A., Wuytack, T., Potters, G., & Samson, R., 2010. Assessing urban habitat quality based on specific leaf area and stomatal characteristics of *Plantago lanceolata* L. *Environmental Pollution*, 158(3), 788-794. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.10.006>
- Kim, H. J. Yang, T., Choi, S., Wang, Y-J., Lin, M-Y., & Liceaga, A. M. (2020). Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108985>
- Larcher, W. (2003). *Physiological plant ecology. Ecophysiological and stress physiology of functional groups*. Springer.
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., Flore, J. A., Cobo, N., del Pozo, A. (2012). Spectral irradiance, gas exchange characteristics and leaf traits of *Vaccinium corymbosum* L. 'Elliott' grown under photo-selective nets. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.09.006>
- 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>
- Neri, D., Baruzzi, G., Massetani, F., Faedi, W. (2012). Strawberry production in forced and protected culture in Europe as a response to climate change.

- Canadian Journal of Plant Science*, 92(6), 1021-1036.
<https://doi.org/10.4141/cjps2011-276>
- Oguchi, R., Hikosaka, K., & Hirose, T. (2005). Leaf anatomy as a constraint for photosynthetic acclimation: differential responses in leaf anatomy to increasing growth irradiance among three deciduous trees. *Plant, Cell and Environment*, 28, 916-927.
<https://doi.org/10.1111/j.13653040.2005.01344.x>
- Oren-Shamir, M., Gussakovsky, E. E., Shpiegel, E., Nissim-Levi, A., Ratner, K., Ovadia, N., Giller, Y. E., & Shahak, Y. (2001). Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76, 353-361. <https://doi.org/10.1080/14620316.2001.11511377>
- Pallardy, S. G. (2008). Physiology of woody plants. Academic press, Elsevier.
- Pérez, M., Plaza, B. M., Jiménez, S., Lao, M. T., Barbero, J., & Bosch, J. L. (2006). The radiation spectrum through ornamental net houses and its impact on the climate generated. *Acta Horticulturae*, 719, 631-636.
https://www.actahort.org/books/719/719_73.htm
- Rajapakse, N. C., & Shahak, Y. (2007). 12 Light-quality manipulation by horticulture industry. In Whitelam, G. C., & Halliday, K. J., (Eds). *Light and plant development* (pp. 290-312). Blackwell Publishing.
- Retamales, J. B., Montecino, J. M., Lobos, G. A., & Rojas, L. A. (2008). Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. *Acta Horticulturae*, 770, 193-197.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.22>
- Sack, L., & Buckley, T. N., (2016). The developmental basis of stomatal density and flux. *Plant Physiology*, 171(4), 2358-2363.
<https://doi.org/10.1104/pp.16.00476>
- Shahak, Y., Gussakovsky, E. E., Cohen, Y., & Lurie, S. (2004). Color nets: a new approach for light manipulation in fruit trees. *Acta Horticulturae*, 636, 609-616. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.636.76>
- Shahak, Y. (2008). Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Horticulturae*, 770, 161-168.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>
- Stamps, R. H. (1994). Evapotranspiration and nitrogen leaching during leatherleaf fern production in shadehouses. Special Publication SJ94-SP10. St Johns River Water Management District.
- Stamps, R. H. (2009). Use of colored shade netting in horticulture. *HortScience*, 44(2), 239-241. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.239>
- Taiz, L. & Zieger, E., 2006. Plant physiology, fourth edition. Sinauer Associates Inc.
- Thwe, A. A., Kasemsap, P., Vercambre, G., Gay, F., Phattaralerphong, J., & Gautier, H. (2020). Impact of red and blue nets on physiological and morphological traits, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.). *Scientia Horticulturae*, 264, 109185.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109185>

- Wachsmann, Y., Zur, N., Shahak, Y., Ratner, K., Giler, Y., Schlizerman, L., & Giladi, B. (2014). Photoselective anti-hail netting for improved citrus productivity and quality. *Acta Horticulturae*, 1015, 169-176. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1015.19>
- Webb, A. A. R., & Mansfield, T. A. (1992). How do stomata work?. *Journal of Biological Education*, 26(1), 19-26, <https://doi.org/10.1080/00219266.1992.9655238>
- Whitelam, G. C., & Halliday, K. J. (2007). Light and plant development. Blackwell Publishing.
- Witham, F. H., Blaydes, D. F., & Devlin, R. M. (1971). *Experiments in plant physiology*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Yang, J., Song, J., & Jeong, B. R., 2022. Side lighting enhances morphophysiology and runner formation by upregulating photosynthesis in strawberry grown in controlled environment. *Agronomy*, 12(1), 24. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010024>
- Zermeño-González, A., Claveria-Cigarrero, G. L., Melendes-Alvarez, A. I., Ramírez-Rodríguez, H., Munguía-López, J. P., Campos-Magaña, S. G., y Cadena-Zapata, M. (2019). La cubierta plástica y su relación con la radiación, crecimiento y rendimiento de un cultivo de pimiento morrón (*Capsicum annuum* L.). *Agrociencia*, 53(5), 709-723. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1838>

**V. NUTRACEUTICAL QUALITY OF STRAWBERRY (*Fragaria x
ananassa* Duch.) FRUITS FROM PLANTS CULTIVATED UNDER
COLORED SHADE NETS**

Nutraceutical quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) fruits from plants cultivated under colored shade nets

5.1. ABSTRACT

Colored shade nets alter the spectral quality reaching plants, influencing specific physiological reactions and the phytochemical composition of fruits. The present study aimed to investigate how different colored shade nets (black, blue, green, and beige) affect the quality and phytochemical content of 'Albion' strawberry fruits, which are known for their organoleptic, nutraceutical properties and antioxidant capacity. The results showed that the fruit's response was influenced by the color of the net. Fruits from plants grown under the blue and beige nets had 42 % higher total soluble sugars and blue net had 86 % more anthocyanins compared to the control plants. The fruits harvested from the beige net showed an increase of 24 % in titratable acidity and 4 % more phenolic compounds than control. In conclusion, blue and beige nets could serve as an alternate production strategy to enhance the quality and nutraceutical content of strawberry fruits.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch., photoselective net, anthocyanins, antioxidant capacity, phenolic compounds.

Calidad nutraceutica de frutos de fresa (*Fragaria x ananassa* Duch.) en plantas cultivadas bajo malla sombra de color

5.2. RESUMEN

Las mallas de color modifican la calidad del espectro que reciben las plantas y promueven respuestas fisiológicas específicas, así como cambios en el contenido fitoquímico de los frutos. El objetivo de este estudio fue determinar cómo los diferentes colores de mallas (negro, azul, verde y beige) afectan la calidad y contenido fitoquímico del fruto de fresa cv. Albión; los cuales son conocidos por sus propiedades nutraceuticas y organolépticas y capacidad antioxidante. Los resultados indicaron que la respuesta en el fruto dependió del color de la malla, los frutos de las plantas cultivadas bajo la malla azul y beige desarrollaron 42 % mayor concentración de azúcares solubles totales y la malla azul 86 % mayor cantidad de antocianinas comparado con las plantas control. Los frutos obtenidos en la malla beige presentaron 24 % más acidez titulable y 4 % más compuestos fenólicos que el control. Se puede concluir que, la malla azul y beige podrían ser una mejor alternativa para mejorar la calidad y contenido nutraceutico en frutos de fresa.

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch., malla fotoselectiva, antocianinas, capacidad antioxidante, compuestos fenólicos.

5.3. INTRODUCTION

Strawberry is a fruit characterized by its delicate flavor and high vitamin content (Zoratti et al. 2015). The plant is cultivated in regions from the Arctic to the tropics (Hancock, 2020) and the fruit contains a diversity of organoleptic and nutraceutical properties, including ascorbic acid and phenolic compounds which possess a strong antioxidant capacity that are beneficial for reducing the risk of neurodegenerative and cardiovascular diseases (Seeram, 2008; Stevenson and Scalzo, 2012). Strawberries are considered a functional food (Giampieri et al., 2014) and are a rich source of phenolic compounds. It is crucial to do research aimed at enhancing the concentration of these chemicals and other nutraceuticals in the fruit, as even a slight increase can yield significant health advantages (Anttonen et al., 2006). Shade nets in agriculture offer protection to crops from extreme radiation, winds, or pests (Shahak, 2008). Black shade nets alter the amount of radiation plants receive, while color or photo-selective nets can modify light quality and enhance the transmission of specific wavelengths (Stamps, 2009; Whitelam and Halliday, 2007), potentially affecting physiological responses like photosynthesis and photomorphogenesis. These color nets can also increase the amount of photosynthetically active radiation (PAR) or photosynthetic photon flux density (PPFD) within the range of 400 - 700 nm (Stamps, 2009; Whitelam and Halliday, 2007).

Research has shown that modifying the level of UV light in growth environments can enhance the growth and development of plants (Retamales et al., 2008; Stamps, 2009), increase yield and harvest time (Arthus et al., 2013), and increase the phytochemical and pigment content of crops (Ordidge et al., 2010). Differences in the reduction of PAR and the spectrum of transmitted irradiance towards the crop have been observed based on the color of the net (Arthurs et al., 2013). Retamales et al. (2008) found that utilizing colored nets altered the reproductive and vegetative patterns of *Vaccinium corymbosum* L., resulting in a 44 % increase in yield with white nets, 25 % with gray nets, and 32 % with red nets. Lobos et al. (2009) found that using white, black, and red nets with varying levels of shade (25 %, 50 %, and 75 %, respectively) resulted in an increase in fruit weight and a consistent

decrease as shade percentage increased in *Vaccinium corymbosum* L. compared to the control group. They concluded that the color of the nets changed the plant's physiology, potentially affecting the timing of harvest. Wang and Wang (2014) discovered that as the shading percentage increased, there was a 20 % longer duration in the flowering stage and a 13 % greater maturation of strawberry fruits, however, there were no significant effects in firmness, total soluble solids, ascorbic acid, and titratable acidity. The variability in research results suggests that the physiological responses of plants to light quality and intensity depend on the type, color, and spectral composition of the net (Kotilainen et al., 2018).

This study examined the impact of various colored shade nets (black, blue, green, and beige) on the quality and nutraceutical content of strawberry fruits cv. Albion, and evaluate if this technology could be a feasible production method to improve these fruit characteristics.

5.4. MATERIALS AND METHODS

5.4.1. Plant material and growing conditions.

The study was conducted in a glass greenhouse in the spring-winter season of 2022, with an average temperature of 36 °C and a relative humidity of 32 % at noon. Strawberry plants (cv. Albion) were placed in 5-L containers in an open soilless system. The substrate consisted of a 70 %:30 % v/v mixture of sphagnum peat and perlite. Plants were set at a density of 11 plants per square meter. Three times a week, plants were hand-watered with 800 mL of a nutrient solution (pH 6.0, electrical conductivity 1.7 dS m⁻¹). Tap water was used to prepare the nutrient solution, considering its ion composition; the nutrient solution contained 9 meq L⁻¹ NO₃⁻, 0.39 meq L⁻¹ H₂PO₄⁻, 0.26 meq L⁻¹ SO₄⁻², 4.43 meq L⁻¹ K⁺, 5.83 meq L⁻¹ Ca⁺², 1.94 meq L⁻¹ de Mg⁺² and 3.24 ppm Fe-EDTA, 0.14 ppm Zn-EDTA, 0.05 ppm Cu-EDTA, 0.73 ppm Mn-EDTA, 0.05 ppm Mo-EDTA, 0.13 ppm B-EDTA.

5.4.2. Temperature, relative humidity and spectral irradiance underneath the shade nets

On the 25 th day after transplant (dat), the plants were covered with shade nets (80 % shade) of various colors (black, green, blue, and beige), while a control group without a shade net was also set up. Above the plants, nets were positioned at a height of 1.5 meters, covering the lateral walls as well. Temperature and relative humidity were recorded underneath each net using a datalogger (RC-51H from Elitech Technology, California, USA). Spectral irradiance was recorded at 70 dat in each net at noon on a clear sky day using a multispectral radiometer (PS-300, Apogee Instruments Inc., Utah, USA) (Table 1). An experimental design with four treatments and a control was implemented, utilizing 15 replications per treatment; a one-plant container was the experimental unit.

Table 1. Temperature, relative humidity and spectral irradiance ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$) measured under the colored shade nets assessed.

Variable	No net	Black	Blue	Green	Beige
Air temperature ($^{\circ}\text{C}$) [†]	36.53 $\pm$ 0.7	33.20 $\pm$ 0.5	35.45 $\pm$ 0.6	33.10 $\pm$ 0.5	34.95 $\pm$ 0.4
Relative humidity (%) [†]	28.55 $\pm$ 1.5	41.21 $\pm$ 1.9	38.21 $\pm$ 1.7	38.46 $\pm$ 2.2	38.50 $\pm$ 1.8
Ultraviolet-B (280-320 nm)	0.71	0.15	0.11	0.04	0.09
Ultraviolet-A (320-400 nm)	43.44	14.51	16.38	12.61	21.05
Blue light (400-500 nm)	293.80	90.25	171.78	82.75	150.06
Green light (500-600 nm)	343.91	101.98	151.53	97.16	185.41
Red light (600-700 nm)	335.19	96.32	105.66	90.61	183.88
Far red light (700-800 nm)	297.24	82.89	120.99	81.98	163.77

[†]Data are expressed as mean $\pm$ standard error of 18 replications.

5.4.3. Fruit physical characterization

Five plants were selected randomly for each treatment. All fruits were harvested when they reached a bright red color covering three-quarters of the fruit. The length and width of the fruit were measured using a digital vernier caliper (Stereon®, México city, México). The roundness index was calculated by dividing the length by the diameter of each fruit (Martínez-Bolaños et al., 2008). Firmness was measured at the equatorial diameter using a penetrometer equipped with a 1.9 mm wide tip (model FT O2, Qa Supplies®).

5.4.4. Fruit chemical characterization

The total soluble sugar concentration was measured using the anthrone technique (Witham et al., 1971) in 15 fruits per treatment. The measurements were taken using a spectrophotometer (model Thermo Spectronic Genesys 10 UV, New York, USA) at a wavelength of 600 nm. The total soluble solids were measured using a digital refractometer (PAL-1 Atago®, Saitama, Japan) on 20 harvested fruits per treatment. The pH and titratable acidity of the fruit were measured from 10 fruits per treatment that had previously been blended in 50 mL of distilled water. The pH was measured using a CONDUCTRONIC potentiometer (model PC45, Puebla, Mexico) and titratable acidity using the AOAC (1980) method with acidity percentage calculated based on citric acid. The TSS/TA ratio was also calculated.

5.4.5. Fruit nutraceutical quantification

A methanolic extract was prepared from a sample of 15 fruits per treatment. Strawberry pulp (1 g) was crushed in 10 mL of aqueous methanol solution at 80 % v/v. The mixture was homogenized and sonicated (BRANSON 2510 sonicator, Danbury, CT, USA) for 15 min, allowed to rest for 24 h, and then centrifuged at 1400 x g for 10 min (Chang et al., 2002).

5.4.5.1 Phenolics compounds

An aliquote of the methanolic extract (250 µL) was mixed with 250 µL of Folin-Ciocalteu reagent (0.2 N) and 2 mL of Na₂CO₃ (0.7 M). The mixture was left to incubate for 2 h at room temperature in the absence of light. The absorbance was determined at 765 nm (Thermo Spectronic Genesys 10 UV spectrophotometer, New York, USA). The phenols concentration was determined using a gallic acid standard curve ($y = 0.0060x + 0.0389$; $R^2 = 0.991$) and expressed as mg gallic acid equivalents per 100 g fresh weight (mg GAE 100 g⁻¹ FW) following the Waterman and Mole (1994) technique.

5.4.5.2. *Flavonoids*

A 500 μ L aliquot of the methanolic extract was mixed with 1.5 mL of 95 % ethanol, 100 μ L of 10 % AlCl_3 , 100 μ L of CH_3COOK (1 M), and 2.8 mL of distilled water. The mixture was incubated for 30 min at room temperature, and the absorbance was measured at 415 nm. Flavonoid content was quantified using a standard curve of quercetin ($y = 0.006x - 0.0026$; $R^2 = 0.996$) as reported by Chang et al. (2002). The results were quantified as milligrams of quercetin equivalents per 100 grams of fresh weight (mg QE 100 g^{-1} FW).

5.4.5.3. *Anthocyanins*

Two test tubes were prepared with 0.1 mL of the methanolic extract. A 0.025 N KCl solution (5 mL) at pH 1 was added to one test tube, and a 0.4 M $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ solution (5 mL) at pH 4.5 was added to the second test tube. The reaction was allowed to stabilize for 15 min, and then the absorbance was measured at 510 and 700 nm in both mixtures. The concentration of anthocyanins was measured in mg of cyanidin-3-glucoside equivalents per 100 g of fresh weight (mg CGE 100 g^{-1} FW) (Giusti and Wrolstad, 2001).

5.4.5.4. *Acid ascorbic*

The method 967.21 from AOAC (1995) was utilized. A sample of 0.5 g of fresh fruit was prepared for each treatment replicate, the concentration of ascorbic acid was calculated using a standard curve equation ($y = -0.0038x + 0.2205$; $R^2 = 0.991$) at a wavelength of 515 nm (AOAC, 1995). The results were quantified in milligrams of ascorbic acid equivalents per 100 grams of fresh weight (mg ASCE 100 g^{-1} FW).

5.4.5.5. *Antioxidant capacity*

The antioxidant capacity was determined with the ABTS method (Re et al., 1999). A trolox (6-hydroxy-2,5,7,8-tetramethylchromane-2-carboxylic acid) standard curve ($y = -0.2274x + 0.6746$; $R^2 = 0.993$) was utilized at a wavelength of 734 nm, the results were expressed as μ M trolox equivalents per 100 g of fresh weight (μ M TE 100 g^{-1} FW).

5.4.6. Statistical analysis

A completely randomized experimental design was used with four treatments and a control, with nine replicates for the physical, chemical and nutraceutical characteristics of the fruit; the experimental unit consisted of one plant per pot. Analysis of variance (ANOVA) (Gutiérrez and de la Vara, 2008) and mean comparisons were performed using Tukey's test ($p \leq 0.05$) with SAS version 9 software, correlations and principal component analysis (PCA) (Díaz, 2007) were conducted using Minitab® 19 software.

5.5. RESULTS

5.5.1. Fruit physical characterization

Fruits from plants covered with colored nets exhibited significant variations in the diameter, roundness index, and firmness compared to the fruits from the control plants ($p \leq 0.05$) (Table 2). Fruits harvested from colored nets had a diameter approximately 39 % smaller than those from the control group, with no significant impact on length. The decreased diameter caused a rise in the roundness index, leading to the production of elongated fruits. Fruits collected from plants under the blue and green nets had a 12 % drop in firmness compared to the control.

Table 2. Physical characteristics in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.

Variable	No net	Black	Blue	Green	Beige
Ecuatorial diameter (mm)	39.23 ± 2.59 a	24.19 ± 0.55 b	24.36 ± 0.25 b	23.35 ± 0.58 b	24.33 ± 0.39 b
Length (mm)	32.03 ± 0.55 a	32.42 ± 0.93 a	31.35 ± 0.56 a	30.87 ± 0.99 a	31.23 ± 0.53 a
Roundness index	0.88 ± 0.06 b	1.34 ± 0.03 a	1.28 ± 0.02 a	1.32 ± 0.03 a	1.28 ± 0.01 a
Firmness (N)	1.42 ± 0.03 a	1.34 ± 0.01 ab	1.24 ± 0.03 b	1.26 ± 0.04 b	1.35 ± 0.04 ab

Data are expressed as mean ± standard error of nine replications. Different letters in the same row indicate significant statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2. Fruit chemical characterization

Fruits from plants grown beneath blue, beige, and green nets exhibited an increase of 42 %, 28 %, and 22 % in total soluble sugars compared to those planted without any net ($p \leq 0.05$) (Table 3). There was no significant effect in sugar content between fruits cultivated under the black net and those grown without a net. The total soluble solids in fruits harvested from blue and beige nets was similar to that of the control group ($p \leq 0.05$) and 23 % higher than in fruits harvested with black and green nets. All fruits harvested from the nets, regardless of color, had a greater titratable acidity in comparison to fruits from the control treatment. The titratable acidity of fruits obtained from the beige net was 24 % higher than that from the other nets ($p \leq 0.05$). The pH of fruits from the control and blue net were similar, while the fruits under the black and green nets were 5 % and 9 % more acidic than the control, respectively. Fruits from beige, green, and black nets had a TSS/TA ratio 26 % lower than control fruits, whereas fruits from blue nets had a ratio 11 % lower ($p \leq 0.05$). The data indicates a correlation between the far red light passing through colored nets (Table 1) and the levels of total soluble sugars, total soluble solids, and pH in strawberry fruit. These parameters showed an increase with greater exposure to far red light, reaching a peak near $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ before decreasing (Fig. 1). However, titratable acidity and the TSS/TA ratio consistently increased even when far red light exceeded $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Fig. 1).

Table 3. Chemical characteristics in strawberry fruits cv. Albion cultivated under colored shade nets.

Variable	No net	Black	Blue	Green	Beige
Total soluble sugars (g 100 g ⁻¹ FW)	2.63 ± 0.16 c	2.62 ± 0.12 c	3.73 ± 0.13 a	3.21 ± 0.12 b	3.36 ± 0.07 ab
TSS (°Brix)	7.00 ± 0.09 a	5.63 ± 0.07 b	6.94 ± 0.13 a	5.60 ± 0.07 b	6.78 ± 0.06 a
TA (%)	1.00 ± 0.03 c	1.11 ± 0.01 b	1.10 ± 0.01 b	1.08 ± 0.02 b	1.24 ± 0.01 a
pH	2.58 ± 0.04 a	2.44 ± 0.03 bc	2.50 ± 0.02 ab	2.35 ± 0.02 c	2.48 ± 0.01 b
TSS/TA	7.07 ± 0.31 a	5.06 ± 0.06 c	6.25 ± 0.15 b	5.15 ± 0.06 c	5.47 ± 0.06 c

Data are expressed as mean ± standard error of nine replications. Different letters in the same row indicate significant statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$). TSS: total soluble solids, TA: titratable acidity, TSS/TA: TSS/TA ratio.

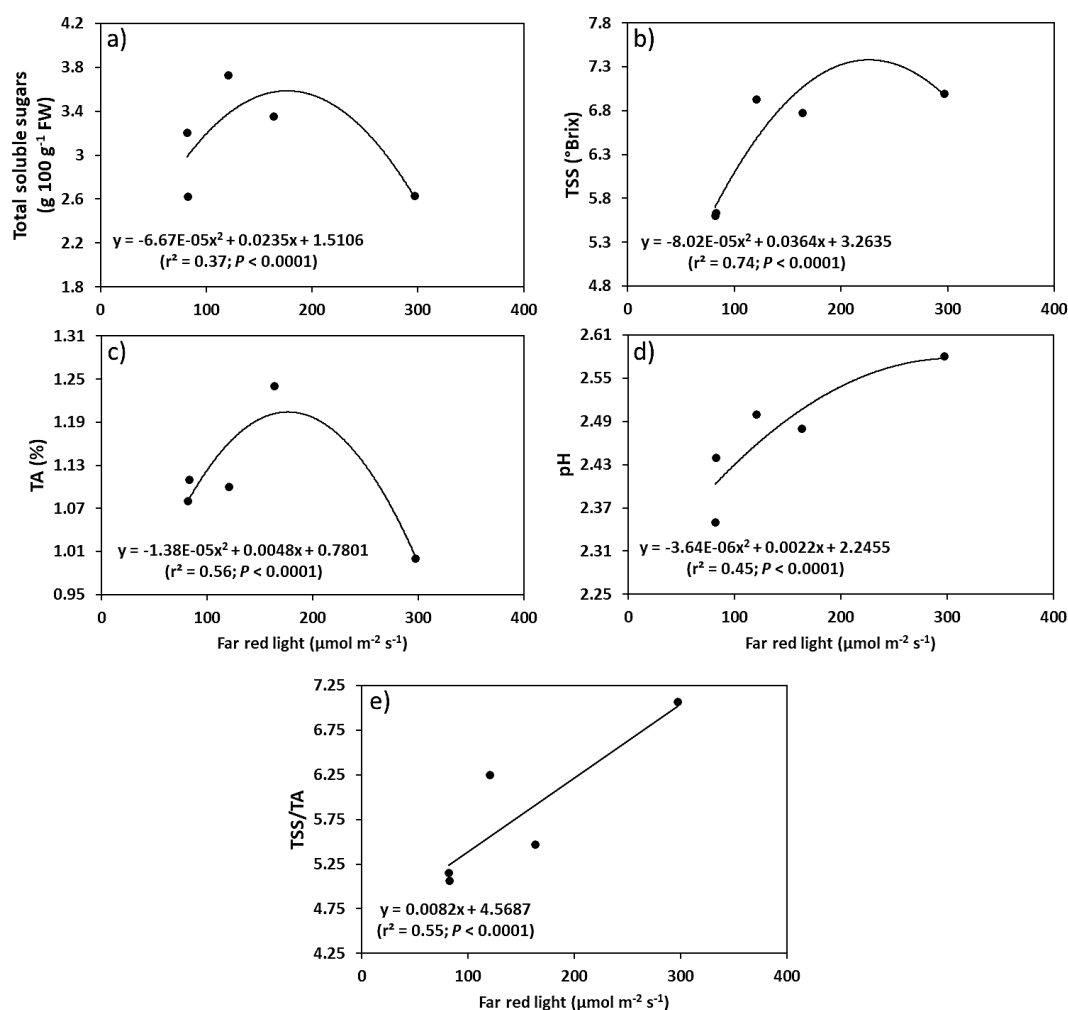


Fig. 1. Chemical characterization in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets as influenced by far red light (700 - 800 nm). a) Total soluble sugars, b) Total soluble solids, c) Titratable acidity, d) pH and e) TSS/TA ratio.

5.5.3. Fruit nutraceutical quantification

Differences in nutraceutical concentrations in strawberry fruits were observed between treatments (Fig. 2). Fruits grown with beige net had a total concentration of phenolic compounds that was 4 % higher than that of the control and 5 % higher than that of fruits obtained from black and blue nets ($p \leq 0.05$). No significant effects in flavonoid concentration were observed between the control fruits

and those harvested from nets, however, fruits from the beige and green nets were around 41 % higher in flavonoids than with the blue net (Fig. 2b). The anthocyanin concentration in fruits grown with the blue net was 86 % higher than that of the control, 54 % higher than with beige net, and 95 % higher than with green and black nets ($p \leq 0.05$) (Fig. 2c). The color of the nets did not promote the buildup of ascorbic acid in the fruits; these levels were half of those found in the control fruits (Fig. 2d). The antioxidant capacity of fruits from plants grown under black and green nets was similar to that of control fruits and 29 % higher than fruits from plants grown under blue and beige nets (Fig. 2e).

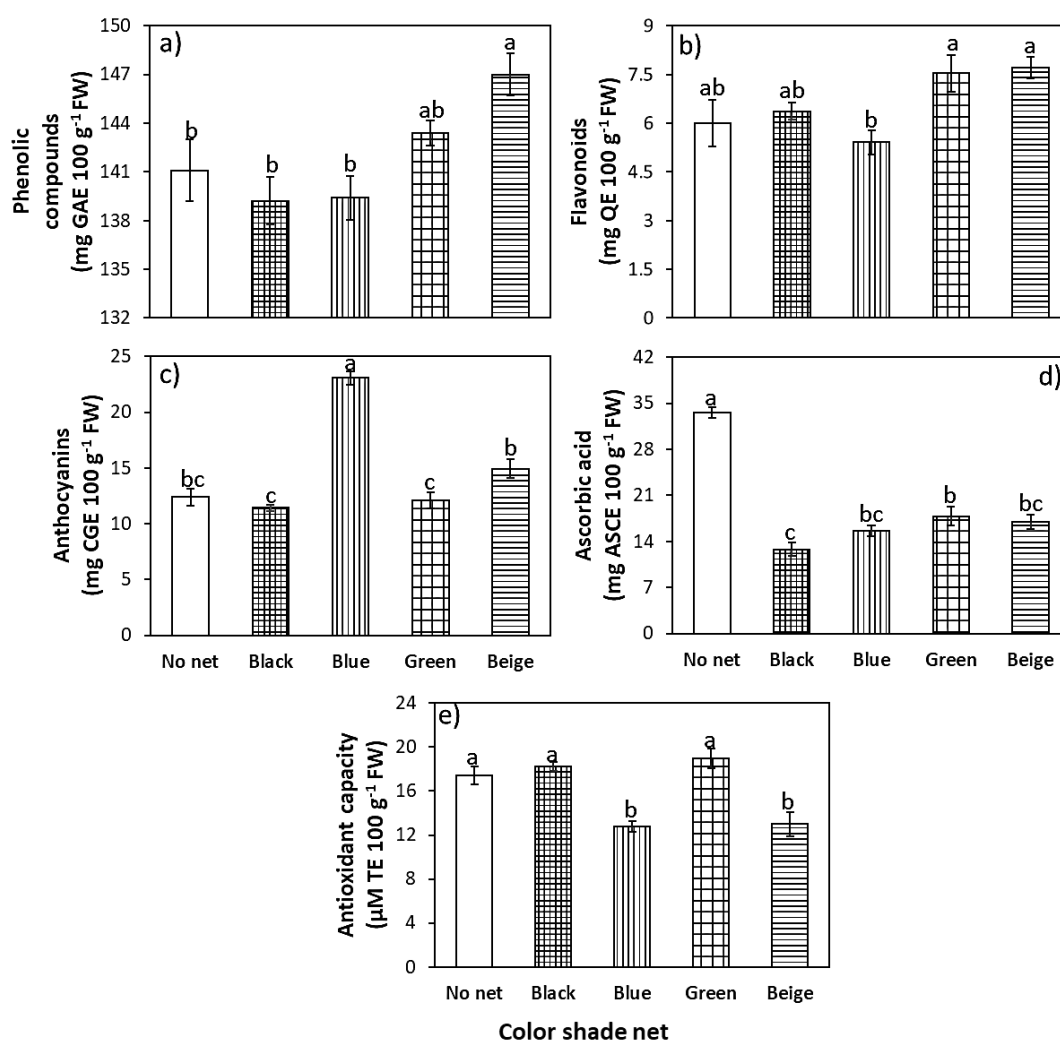


Fig. 2. Antioxidants concentration in strawberry fruit cv. Albion cultivated under varying colored shade nets. a) Phenolic compounds, b) Flavonoids, c) Anthocyanins, d) Ascorbic acid, and e) Antioxidant

capacity. Data are expressed as mean $\pm$ standard error of nine replications. Different letters indicate significant statistical differences (Tukey, $p \leq 0.05$). GAE: Gallic acid equivalents, QE: Quercetin equivalents, CGE: Cyanidin-3-glucoside equivalents, ASCE: Ascorbic acid equivalents, TE: Trolox equivalents.

5.5.4. Correlation and PCA between nutraceuticals

Pearson's correlation analysis showed a negative association ($r = -0.63$) between anthocyanin content in the fruit and antioxidant capacity, and a positive correlation ($r = 0.55$) between phenolic compounds concentration and flavonoid concentration (Table 4). PCA showed that the first three principal components have eigenvalues of 1.95, 1.34 and 0.97, respectively. The first component accounted for 39 % of the variation was negatively represented by anthocyanins (-0.55) and positive with antioxidant capacity (0.53) and flavonoids (0.48) in the fruit. The second component accounted for 26 % of the variance and was positively represented by phenols (0.57) and flavonoids (0.51). The third component accounted for 19 % of the variance and was negatively represented by ascorbic acid (-0.85). Three components accounted for 85 % of the overall variation (Fig. 3).

Table 4. Pearson correlation coefficients (r) between antioxidant compounds in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.

	Ascorbic acid	Anthocyanins	Phenolic compounds	Flavonoids
Anthocyanins	-0.181	-	-	-
Phenolic compounds	0.089	-0.122	-	-
Flavonoids	-0.120	-0.235	0.550**	-
Antioxidant capacity	0.148	-0.636**	0.025	0.270

** $p \leq 0.01$.

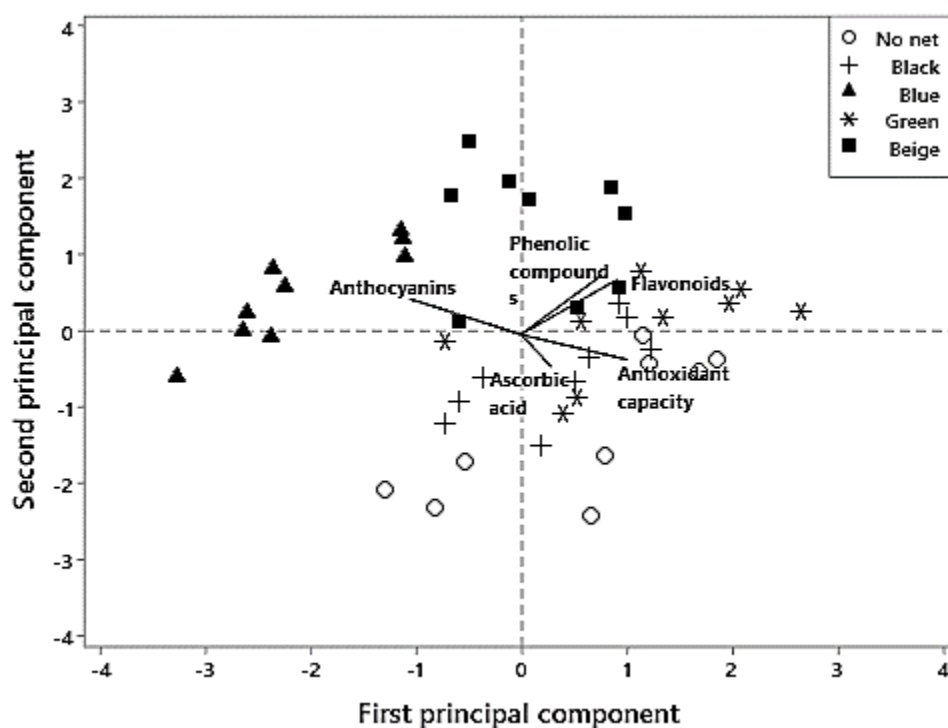


Fig. 3. Principal component analysis of antioxidants in strawberry fruit cv. Albion cultivated under colored shade nets.

5.6. DISCUSSION

5.6.1. Fruit physical characterization

The plants grown under shade netting were found to have fruits of elongated shapes and lower firmness compared to the control group (Table 2), which are important attributes for market acceptance. Montero (1996) states that firmness is crucial for the quality of strawberry fruit, since a reduction in firmness can render them more vulnerable to pathogens. The findings of this study align with Retamal-Salgado et al. (2017), who observed a decrease in firmness by 30 % to 90 % in fruits of *Vaccinium corymbosum* L. grown in the field compared to the control group when the shade was increased using a black net, suggesting that using nets to reduce light exposure can lead to a shorter postharvest life.

5.6.2. Fruit chemical characterization

The blue and beige nets led to fruits with elevated levels of total soluble sugars and total soluble solids (Table 3). The soluble sugars obtained in this study were lower than those reported by Giampieri et al. (2014) and Basu et al. (2014), who found 4.89 % and 4.56 % in strawberry fruit, respectively. The total soluble solids content of fruits from the control plants and those under the blue and beige net fell within the recommended range of 6 % to 9 % as proposed by Dale and Luby (1991) for strawberries. Total soluble solids quantify the concentration of sucrose and organic acids. Studies indicate that using shade nets to reduce radiation intensity may result in lower levels of total soluble solids in *Vaccinium corymbosum* L. (Lobos et al., 2013). Zoratti et al. (2015) found a 12 % decrease in the yield of *Vaccinium corymbosum* L. fruits when grown under a black net (90 % shade) compared to the control group. Fruits collected from green and black nets had the lowest total soluble solids levels in this study, possibly because of decreased radiation intensity reaching the plants.

This study demonstrates that the fruits produced under nets exhibited more titratable acidity compared to the control plants (Table 3). The readings fall within the range specified by Hancock (2020) of 0.29 % to 1.24 % citric acid in strawberry. Fruits grown under black, green, and beige nets exhibited a lower pH compared to the control and blue net fruits. The pH measured in this study was lower than the range of 3.4 to 3.7 reported by Nunes et al. (2021) for various strawberry fruit cultivars. Gunness et al. (2009) stated that pH plays a crucial role in the sensory characteristics of strawberry fruit by influencing the impression of sweetness, especially when the pH is less acidic. Research has shown that the pH of strawberry fruit rises when they reach higher levels of maturity in various cultivars such as Albion (Ornelas-Paz et al., 2013), Chandler, Oso Grande, and Sweet Charlie when grown in the field (Nunes et al., 2006). Additionally, the TSS/TA ratio was greater in control fruits and then the fruits from the blue net (Table 3); in general, the use of nets yielded acidic fruits. Simkova et al. (2024) stated that total soluble solids, titratable acidity and the sugars/acid ratio are highly correlated with the ripening of strawberry as sugars increase and titratable acidity decreases as the

fruit matures. Keutgen and Pawelzik (2007) comment that a balance between sweetness and acidity influences the flavor and thus it is important for its commercial implications, they identified a TSS/TA ratio between 8.5 and 14 as the optimal range for strawberries; all treatments in the study produced fruits that fell under this range, although these parameters may differ based on environmental conditions and the specific cultivar (Hancock, 2020).

Research has shown that far-red light can enhance the qualities of strawberry and tomato fruits (Kasperbauer et al., 2001 and Kim et al., 2020). Kim et al. (2020) found that the combination of far-red wavelength and red lighting enhanced total soluble solids and titratable acidity, as opposed to red light alone. Kasperbauer et al. (2001) discovered that an increase in the ratio of far-red wavelength light to red light received by strawberry fruit led to higher concentrations of sugars and organic acids; the authors suggested that this may be due to alterations in the phytochrome system and the functioning of the enzyme sucrose phosphate synthase as the fruit develop. Zhen et al. (2022) noted a synergy between far-red light photons and short wavelength photons. Studies have shown that far-red photons from LED light can enhance the photochemical efficiency and photosynthetic rate when combined with red/blue or white light (Zhen and van Iersel, 2017). In this study, probably a synergistic effect occurred in the control, beige, and blue net fruits that were exposed to a higher level of far-red wavelength light. This exposure may have resulted in increased carbohydrate production and translocation to the fruits, leading to elevated total soluble solids, as suggested by Kim et al. (2020) in *Solanum lycopersicum*.

5.6.3. Fruit nutraceutical quantification

Phenolic compounds varied between fruits from the shade nets and those from the control plants, being the fruits from the beige nets those with the highest phenol concentration (Figure 2). The total phenols measured in this study was within the range reported by Nunes et al. (2006) for different strawberry cultivars grown in the field (110, 70, and 90 mg de GAE 100⁻¹ g in strawberry fruits in Chandler, Oso Grande, and Sweet Charlie, respectively). However, it is lower than the concentration

observed by Ornelas-Paz et al. (2013) for organically cultivated fruits of Albion (209 mg de GAE 100-1 g). In both studies, the fruits were harvested when three-quarters of the fruit had become red.

Flavonoids in fruits grown under beige and green nets were around 41 % higher than those grown under blue nets (Figure 2). Zoratti et al. (2014) found that intense solar radiation high in the blue spectrum (400 - 500 nm), which is detected by phototropins, influences the biosynthesis of flavonoids in fruits. However, this response may vary depending on the interaction between light conditions and environmental factors. Additionally, Falcone et al. (2012) stated that exposure to UV-B radiation (280 - 320 nm) not only affects plant growth and development but also results in the production of reactive oxygen species. In response to this UV-B radiation, plants synthesize flavonoids to absorb it and to counteract the reactive oxygen species. Our results suggests that the strawberry plants cultivated under beige and green nets may have experienced stress conditions due to the quantity and ratio of UV-A and blue light that they received. Although the plants grown under the blue net received a higher intensity and quantity of short wavelength light (UV-B, UV-A, and blue), the fruits did not exhibit high flavonoid concentration but a lower concentration, probably these compounds was in the leaves (Cvetković et al., 2017; Kårlund et al., 2014).

The nets of blue color were associated with enhanced anthocyanin in the fruits (Figure 2). Jaakola (2013) and Zoratti et al. (2015) stated that alterations in light intensity, wavelength, temperature, and fruit maturity may cause the accumulation of anthocyanins in strawberry fruits. Anttonen et al. (2006) discovered that strawberry fruits of Korona cultivar grown in a glass greenhouse had a 9 % lower concentration of anthocyanin when the plant was subjected to a 32 % shadow, as opposed to full light exposure. Short wavelengths in the blue and UV spectrum are reported to enhance anthocyanin concentration when fruits are ripening (Zoratti et al., 2015). In the present study, the blue net transmitted higher levels of irradiance and blue and UV light, compared to other nets (Table 1).

The rise in anthocyanins detected in the fruits harvested under blue nets may have been due to the short wavelength light, and thus a higher photonic energy, transmitted by this color of net. The

excessively high blue radiation may have caused photo-oxidative stress in the plants, resulting in increased production of antioxidants for protection, as indicated by Alrifai et al. (2019), and the increase in anthocyanin levels in the fruits. Qian et al. (2016) observed that the accumulation of anthocyanin in fruits is influenced by light as it is required for their synthesis, and that light spectral quality can affect the process.

The present study showed that black and green nets decreased radiation transmission by 41 % in comparison to blue and beige nets (Table 1). Shahak (2008) stated that black nets are not selective because they block light across the entire electromagnetic spectrum, decreasing the amount of light reaching the plants. Ayala-Tafoya et al. (2011) and Oren-Shamir et al. (2001) suggested that black nets only allow radiation to pass through the tissue's openings because its thread structure is opaque. In contrast, colored nets are woven more tightly to create shade, resulting in increased radiation transmission and selective filtering (Stamps, 2009). The lower anthocyanin concentration in the fruits harvested using black and green nets may be attributed to a reduced intake of blue and UV radiation.

None of the colored nets tested studied in this experiment increased ascorbic acid in fruits as compared to the control plants this concentration was reduced by 50 %. According to Flieger et al. (2021), stressful conditions lead to the production of reactive oxygen species (ROS) in plants, which are responsible of damaging biomolecules such as membrane lipids, proteins, and nucleic acids. Plants have developed a defensive mechanism against these ROS by creating antioxidant substances like ascorbic acid to neutralize the negative impact of these free radicals. The present study showed that the control fruits contained the highest level of ascorbic acid, indicating that these plants were experiencing stressful conditions, however, the use of colored shade nets alleviated such stressful conditions caused by high solar intensity and temperature, as well as low relative humidity as their use was associated to 6 % drop in temperature and 37 % increase in relative humidity, compared to the control plants. Temperature and relative humidity are environmental conditions that significantly impact the growth of strawberries (Hancock, 2020), being the optimum range from of 18 to 24 °C (Gonzalez-

Fuentes et al., 2016) and 65 % to 75 %, respectively (Lieten, 2002) for maximum growth and development.

Fruits' antioxidant activity refers to the capacity they have to counteract or decrease oxidation produced by atoms or groups of atoms with unpaired electrons that steal electrons from stable molecules, known as free radicals (Niki, 2011). The results obtained suggest that the plants from the control, black net, and green net produced fruits with greater capacity to neutralize free radicals because they contained higher levels of certain antioxidants. The antioxidant capability observed in the control fruits may be linked primarily to the stress induced by the intense light and high temperature that the plants were subjected in comparison to plants under the colored nets, the control exhibited a high quantity of ascorbic acid (Figure 2d). Our results are consistent with Wang and Zheng (2001), as the antioxidant capacity was found to increase when exposed to temperatures ranging from 25 to 30 °C. The antioxidant capacity of black and green net fruits did not correlate with their levels of phenolic compounds, flavonoids, or ascorbic acid, suggesting that the antioxidant capacity may have been derived from other antioxidant substances not examined in this study, such as vitamin E, trace elements, flavones, flavonols, isoflavones, or carotenoids (Flieger et al., 2021).

The fruits collected from plants grown under the blue and beige nets exhibited a lower antioxidant capacity compared to those collected using black and green nets, however, phenols and anthocyanins were the main contributing chemicals in the blue and beige nets, respectively. Warner et al. (2021) comment that the secondary metabolites that are predominant in strawberry fruit and influence antioxidant capacity are phenolic compounds. This activity varies depending on the cultivar and maturation stage of the fruit (Hwang et al., 2019). The present study suggests that the antioxidant capacity of fruits obtained using colored nets may not be solely due to the concentration of a specific compound, as additional determinations like the FRAP and DPPH methods were not utilized (Šamec et al., 2016).

The strawberry fruits showed differences in nutraceutical content compared to the control due to the quantity and quality of light transmitted through the colored nets, which affects the activation of photoreceptors. Smith (2000) and Zoratti et al. (2014) indicate that the impact of light intensity, wavelength, photoperiod, and direction on plants is complex due to the interaction of various photoreceptors with distinct absorption peaks in certain wavelengths. Examples consist of phytochromes sensitive to red/far-red light, cryptochromes and phototropins responsive to blue/UV-A light, and UVR8 sensitive to UV-B light. These components can trigger various signal transduction pathways that control and stimulate morphological and physiological reactions, enabling the plant to adjust to diverse environmental circumstances. In our study, the plants grown under blue and beige nets, as well as the control group, were exposed to higher levels of UV-A and blue light compared to plants grown under green and black nets, so that it is probable that in the former group, cryptochromes, phototropins, and UVR8 receptors played a role in the production of secondary metabolites like flavonoids (flavonols, anthocyanins, and proanthocyanidins).

5.6.4. Correlation and PCA between nutraceuticals

As flavonoids are a subset of phenolic compounds, the content of phenols and flavonoid showed a positive correlation. Previous research has indicated a favorable relationship between phenol concentration and antioxidant ability (Hwang et al., 2019). There was a tendency for a positive correlation between phenolics compounds and flavonoids, and a negative correlation between antioxidant capacity with anthocyanins, was observed. Similar findings were reported in previous studies by Young-Jun and Shin (2015) and Hwang et al. (2019). The negative correlation between anthocyanins and the antioxidant capacity suggests that as anthocyanin concentration increased, the nutraceutical content and antioxidant capacity decreased. The color of the nets was associated with the concentration of nutraceuticals; the black and green nets enhanced the antioxidant capacity and flavonoid concentration, while the blue net favored anthocyanin concentration and the beige net

mainly favored phenolic compounds and flavonoid concentrations, which is connected with the tendencies shown by nutraceuticals as affected by far-red light.

5.7. CONCLUSIONS

Fruit quality was affected by the color of the shade nets. Fruits harvested from plants grown under the blue and beige nets showed higher total soluble sugars and blue anthocyanins, whereas those harvested with the beige net had increased concentrations of titratable acidity and phenolic compounds. A negative correlation was found between anthocyanin concentration and antioxidant capacity in the fruits; however, this correlation was not consistent with the concentration of a specific biomolecule. Other methods are recommended to accurately assess this capacity. The study suggests that using blue and beige nets could serve as an alternate production strategy to enhance the quality and nutritional properties of Albion strawberry fruit.

Funding sources

This work was supported by the Instituto de Horticultura at Universidad Autónoma Chapingo and the Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT).

Conflict of interest

No potential conflict of interest was reported by the authors.

5.8. REFERENCES

- Alrifai, O., Hao, X., Marcone, M.F., Tsao, R., 2019. Current Review of the Modulatory Effects of LED Light on Photosynthesis of Secondary Metabolites and Future Perspectives of Microgreen Vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 67: 6075-6090. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00819>
- Anttonen, M.J., Hoppula, K.I., Nestby, R., Verheul, M.J., Karjalainen, R.O., 2006. Influence of Fertilization, Mulch Color, Early Forcing, Fruit Order, Planting Date, Shading Growing Environment,

- and Genotype on the Contents of Selected Phenolics in Strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) Fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 54: 2614-2620. <https://doi.org/10.1021/jf052947w>
- AOAC, Association of Official Analytical Chemists., 1980. Official Methods of Analysis. 12th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. USA. 1018 p.
- AOAC, Association of Official Analytical Chemists., 1995. Official Methods of Analysis. 16th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. USA. 2490 p.
- Arthurs, S.P., Stamps, R.H., Giglia, F.F., 2013. Environmental modification inside photoselective shadehouses. *HortScience*. 48: 975-979. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.975>
- Ayala-Tafoya, F., Zatarain-López, D.M., Valenzuela-López, M., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T de J., Díaz-Valdés, T., Osuna-Sánchez J.A., 2011. Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra Latinoamericana*. 29: 403-410.
- Basu, A., Nguyen, A., Betts, N.M., Lyons, T.J., 2014. Strawberry as a functional food: An evidence-based review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 54: 790-806. <https://doi.org/10.1080/10408398.2011.608174>
- Chang, C.C., Yang, M.H., Wen, H.M., Chern, J.C., 2002. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods. *Journal of Food and Drug Analysis*. 10: 178-182 [https://doi.org/10.1016/S1040-2051\(02\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S1040-2051(02)00024-6)
- Cvetković, D.J., Stanojević, L.P., Stanković, M.Z., Cakić, M.D., Savić, S.R., Miljković, M.D., 2017. Antioxidant activity of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) leaves. *Separation Science and Technology*. 52: 1039-1051. <https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1281305>
- Dale, A., Luby, J.J., 1991. The Strawberry into the 21st Century: proceedings of the third North American Strawberry Conference. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 288 p.
- Díaz M. L. G. (2007). Estadística multivariada: inferencia y métodos. Departamento de Estadística, Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. 570 p.
- Falcone, F, M.L., Rius, S.P., Casati, P., 2012. Flavonoids: Biosynthesis, biological functions, and biotechnological applications. *Frontiers in Plant Science*. 3: 1-15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2012.00222>
- Fernández E. R., Trapero A., Domínguez J. 2010. Experimentación en agricultura. Consejería de Agricultura y Pesca, Servicio de Publicaciones y Divulgación. Sevilla. España. 350 p.
- Flieger, J., Flieger, W., Baj, J., Maciejewski, R., 2021. Antioxidants: Classification, Natural Sources, Activity/Capacity Measurements, and Usefulness for the Synthesis of Nanoparticles. *Materials*. 14: 1-54. <https://doi.org/10.3390/ma14154135>

- Giampieri, F., Alvarez-Suarez, J.M., Battino, M., 2014. Strawberry and human health: Effects beyond antioxidant activity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 62: 3867-3876. <https://doi.org/10.1021/jf405455n>
- Giusti, M.M., Wrolstad, R.E., 2001. Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 00:F1.2.1-F1.2.13, <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>
- Gonzalez-Fuentes, J.A., Shackel, K., Lieth, J.H., Alborno, F., Benavides-Mendoza, A., Evans, R.Y., 2016. Diurnal root zone temperature variations affect strawberry water relations, growth, and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 203: 169-177. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.03.039>
- Gunness, P., Kravchuk, O., Nottingham, S.M., D'Arcy, B.R., Gidley, M.J., 2009. Sensory analysis of individual strawberry fruit and comparison with instrumental analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 52: 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2008.11.006>
- Gutiérrez P. H., de la Vara S., R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición. Mc Graw Hill. México. 545 p.
- Hancock, J.F., 2020. Strawberries. CABI Publishing. New York, USA. 275 p.
- Hwang, H., Kim, Y., Shin, Y., 2019. Influence of ripening stage and cultivar on physicochemical properties, sugar and organic acid profiles, and antioxidant compositions of strawberries. *Food Science and Biotechnology*. 28: 1659-1667. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00610-y>
- Jaakola, L., 2013. New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits. *Trends in Plant Science*. 18: 477-483. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2013.06.003>
- Kasperbauer, M.J., Loughrin, J.H., Wang, S.Y., 2001. Light Reflected from Red Mulch to Ripening Strawberries Affects Aroma, Sugar and Organic Acid Concentrations. *Photochemistry and Photobiology*. 74: 103-107. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2001\)0740103LRFRMT2.0.CO2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2001)0740103LRFRMT2.0.CO2)
- Kårlund, A., Salminen, J.P., Koskinen, P., Ahern, J.R., Karonen, M., Tiilikka, K., Karjalainen, R.O., 2014. Polyphenols in Strawberry (*Fragaria x ananassa*) Leaves Induced by Plant Activators. *Journal of Agricultural Food Chemistry*. 62: 4592-4600. <https://doi.org/10.1021/jf405589f>
- Keutgen, A. y Pawelzik, E., 2007. Modifications of taste-relevant compounds in strawberry fruit under NaCl salinity. *Food Chemistry*. 105: 1487-1494. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.033>
- Kim, H., Yang, T., Choi, S., Wang, Y., Lin, M., Liceaga, A.M., 2020. Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*. 261: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108985>
- Kotilainen, T., Robson, T.M., Hernández, R., 2018. Light quality characterization under climate screens and shade nets for controlled-environment agriculture. *PLoS ONE*. 13: e0199628. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199628>

- Lieten, P., 2002. The effect of humidity on the performance of greenhouse grown strawberry. *Acta Horticulturae*, 567: 479-482. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2002.567.101>
- Lobos, G.A., Retamales, J.B., del Pozo, A., Hancock, J.F., Flore, J.A., 2009. Physiological Response of *Vaccinium corymbosum* 'Elliott' to Shading Nets in Michigan. *Acta Horticulturae*. 810: 465-470. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.810.60>
- Lobos, G.A., Retamales, J.B., Hancock, J.F., Flore, J.A., Romero-Bravo, S., del Pozo A. 2013. Productivity and fruit quality of *Vaccinium corymbosum* cv. Elliott under photo-selective shading nets. *Scientia Horticulturae*. 153: 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.012>
- Martínez-Bolaños, M., Nieto-Angel, D., Téliz-Ortiz, D., Rodríguez-Alcazar, J., Martínez-Damian, M. T., Vaquera-Huerta, H., Carrillo-Mendoza, O., 2008. Comparación cualitativa de fresas (*Fragaria x ananassa* Duch.) de cultivares mexicanos y estadounidenses. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 14: 113-119.
- Montero, T.M., Mollá, E.M., Esteban, R.M., López-Andréu, F.J., 1996. Quality attributes of strawberry during ripening. *Scientia Horticulturae*. 65 :239-250. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(96\)00892-8](https://doi.org/10.1016/0304-4238(96)00892-8)
- Niki, E., 2011. Antioxidant capacity: Wich capacity and how to assess it?. *Journal Berry Research*. 1: 169-176. <https://doi.org/10.3233/BR-2011-018>
- Nunes, M.C.N., Brecht, J.K., Morais, A.M.M.B., Sargent, S.A., 2006. Physicochemical changes during strawberry development in the field compared with those that occur in harvested fruit during storage. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 86: 180-190. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2314>
- Nunes, G., Teixeira, F., Schwarz, K., Kopanski, C.C., Tadeu, V. de R.J., Freitas, E., Callegari, F.B., Novello, D., 2021. Influence of genetic variability on the quality of strawberry cultivars: sensorial, physical-chemical and nutritional characterization. *Acta Scientiarum Agronomy*. 43: 1-10. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v43i1.46862>
- Ordidge, M., García-Matías, P., Battey, N.H., Gordon, M.H., Hadley, P., John, P., Lovegrove, J.A., Vysini, E., Wagstaffe, A., 2010. Phenolic contents of lettuce, strawberry, raspberry, and blue berry crops cultivated under plastic films varying in ultraviolet transparency. *Food Chemistry*. 119: 1224-1227. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.08.039>
- Oren-Shamir, M., Gussakovsky, E.E., Shpiegel, E., Nissim-Levi, A., Ratner, K., Ovadia, N., Giller, Y.E., Shahak, Y., 2001. Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 76: 353-361. <https://doi.org/10.1080/14620316.2001.11511377>
- Ornelas-Paz, J. de J. Yahia, E.M., Ramírez-Bustamante, N., Pérez-Martínez, J.D., Escalante-Minakata, M. del P., Ibarra-Junquera, V., Acosta-Muñiz, C., Guerrero-Prieto, V., Ochoa-Reyes, E.,

2013. Physical attributes and chemical composition of organic strawberry fruit (*Fragaria x ananassa* Duch, Cv. Albion) at six stages of ripening. *Food Chemistry*. 138: 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.11.006>
- Qian, H., Liu, T., Deng, M., Miao, H., Cai, C., Shen, W., Wang, Q., 2016. Effects of light quality on main health-promoting compounds and antioxidant capacity of Chinese kale sprouts. *Food Chemistry*. 196:1232-1238. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.10.055>
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C., 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*. 26: 1231-1237, [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Retamales, J.B., Montecino, J.M., Lobos, G.A., Rojas, L.A., 2008: Colored Shading Nets Increase Yields and Profitability of Highbush Blueberries. *Acta Horticulturae*. 770: 193-197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.22>
- Retamal-Salgado, J., Vásquez, R., Fischer, S., Hirzel, J., Zapata, N., 2017. Decrease in artificial radiation with netting reduces stress and improves rabbit-eye blueberry (*Vaccinium virgatum* Aiton) 'Ochlockonee' productivity. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 77: 226-233. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392017000300226>
- Šamec, D., Maretić, M., Lugarić, I., Mešić, A., Salopek-Sondi, B., Duralija, B., 2016. Assessment of the differences in the physical, chemical and phytochemical properties of four strawberry cultivars using principal component analysis. *Food Chemistry*. 194: 828-834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.08.095>
- Seeram, N.P., 2008. Berry fruits for cancer prevention: current status and future prospects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 56: 630-635. <https://doi.org/10.1021/jf072504n>
- Shahak, Y., 2008. Photo-Selective Netting for Improved Performance of Horticultural Crops. A Review of Ornamental and Vegetable Studies Carried Out in Israel. *Acta Horticulturae*. 770: 161-168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>
- Simkova, K., Veberic, R., Hudina, M., Grohar, M. C., Pelacci, M., Smrke, T., Ivancic, T., Weber, N. C., Jakopic, J., 2024. Non-destructive and destructive physical measurements as indicators of sugar and organic acid contents in strawberry fruit during ripening. *Scientia Horticulturae*, 327, 112843. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.112843>
- Smith, H., 2000. Phytochromes and light signal perception by plants-an emerging synthesis. *Nature*, 407: 585-591. <https://doi.org/10.1038/35036500>
- Stamps, R.H., 2009. Use of Colored Shade Netting in Horticulture. *HortScience*. 44: 239-241. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.239>

- Stevenson, D., Scalzo, J., 2012. Anthocyanin composition and content of blueberries from around the world. *Journal of Berry Research*. 2: 179-189. <https://doi.org/10.3233/JBR-2012-038>
- Wang, J., Wang, H., 2014. Effects of Shade on Strawberries in Hydroponic Cultivation. *Acta Horticulturae*. 1049: 733-736. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.114>
- Wang, S. Y., Zheng, W., 2001. Effect of Plant Growth Temperature on Antioxidant Capacity in Strawberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 49: 4977-4982. <https://doi.org/10.1021/jf0106244>
- Warner, R., Wu, B-S., MacPherson, S., Lefsrud, M., 2021. A Review of Strawberry Photobiology and Fruit Flavonoids in Controlled Environments. *Frontiers in Plant Science*. 12:611893. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.611893>
- Waterman, P.G., Mole, S., 1994. Analysis of Phenolic Plant Metabolites. Blackwell Scientific Publications. Oxford. K. 238 p.
- Whitelam, G.C., Halliday, K.J., 2007. Light and Plant Development. Blackwell Publishing. New Delhi, India. 325 p.
- Witham, F.H., Blaydes, D.F., Devlin, R.M., 1971. Experiments in plant physiology. Van Nostrand Reinhold Company. New York, USA. 245 p.
- Young-Jun, K., Shin, Y., 2015. Antioxidant profile, antioxidant activity, and physicochemical characteristics of strawberries from different cultivars and harvest locations. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*. 58: 587-595. <https://doi.org/10.1007/s13765-015-0085-z>
- Zhen, S., van Iersel, M.W., 2017. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *Journal of Plant Physiology*. 209: 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.12.004>
- Zhen, S., van Iersel, M.W., Bugbee, B., 2022. Photosynthesis in sun and shade: the surprising importance of far-red photons. *New Phytologist*. 236: 538-546. <https://doi.org/10.1111/nph.18375>
- Zoratti, L., Jaakola, L., Häggman, H., Giongo, L., 2015. Modification of Sunlight Radiation through Colored Photo-Selective Nets Affects Anthocyanin Profile in *Vaccinium spp.* Berries. *PLoS ONE*. 10: e0135935. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135935>
- Zoratti, L., Karppinen, K., Escobar, A.L., Häggman, H., Jaakola, L., 2014. Light-controlled flavonoid biosynthesis in fruits. *Frontiers in Plant Science*. 5: 534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00534>

**VI. CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN
NUTRIMENTAL EN *Fragaria x ananassa* Duch. CV. ALBIÓN
CULTIVADA BAJO MALLAS DE COLOR**

CRECIMIENTO, RENDIMIENTO Y CONCENTRACIÓN NUTRIMENTAL EN *Fragaria x ananassa* Duch. CV. ALBIÓN CULTIVADA BAJO MALLAS DE COLOR

6.1. RESUMEN

El uso de mallas foto-selectivas permite modificar la calidad de radiación que reciben las plantas, promover respuestas fisiológicas en ellas y aliviar el estrés ambiental del cultivo incrementando el rendimiento. El objetivo de este estudio fue identificar si algún color de malla sombra puede ser considerado como una alternativa para mejorar la producción de fresa. Se midió el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental en plantas de fresa cv. Albión bajo malla sombra negra, verde, azul, beige y un testigo sin malla. Las plantas cultivadas en las mallas de color fueron 24 % más altas que el testigo. No hubo diferencias significativas en área foliar, largo del peciolo, diámetro del peciolo, largo de raíz y volumen de raíz entre las mallas y el testigo, pero las plantas cultivadas en la malla azul tuvieron 76 % mayor área foliar, 27 % largo de peciolo, 26 % mayor longitud y más del doble de volumen de raíz que el resto de las mallas. También presentaron 86 % mayor peso fresco y 107 % más peso seco total de la planta que en el resto de las mallas, pero estos fueron similares al testigo. Los días transcurridos de flor a fruto en la malla negra y verde fueron 33 % mayores que en el testigo, malla azul y beige. El rendimiento con la malla negra y verde fue 46 % y 62 % menor que el testigo. La concentración de K, Fe, Cu, Zn y Mn en las hojas dependió del color de la malla. De acuerdo con lo anterior se concluyó que en las mallas azul y beige se obtuvieron mejores características de crecimiento y rendimiento comparado con el resto de mallas, pero similares al de la planta testigo.

Palabras clave: *Fragaria x ananassa* Duch., Mallas foto-selectivas, peso seco, producción, nutrimentos.

Tesis de Doctorado en Ciencias en Horticultura, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Luis Alberto Aragón Ramírez

Director de Tesis: Dra. Ana María Castillo González

GROWTH, YIELD AND NUTRIENT CONCENTRATION IN *Fragaria x ananassa* Duch. CV. ALBION CULTIVATED UNDER COLORED SHADE NETS

6.2. ABSTRACT

The use of photo selective shade nets makes possible to modify the spectral quality received by the plants, promoting physiological responses and reducing the environmental stress of the crop, thus resulting in increased yield. The objective of this study was to identify if the color of the shade net could be considered as an alternative to improve strawberry production. Growth, yield and nutrient levels were measured in cv. Albion strawberry plants grown under black, green, blue and beige shade net and a control without net. Plants grown in shade nets were 24 % taller than control. There were no significant differences in leaf area, petiole length, petiole diameter, root length and root volume between the nets and control, but the blue net had 76 % greater leaf area, 27 % greater petiole length, 26 % greater root length and more than twice the root volume than the rest of nets, but these were similar to control. The days from flower to fruit were 33 % greater in the black and green nets than the control, blue and beige nets. Yield of the black and green nets was 46 % and 62 % less than control, respectively. The concentration of K, Fe, Cu, Zn and Mn depended on the color of the net. Based on the above, it was concluded that in the blue and beige nets better growth and yield characteristics were obtained in comparison to green or black nets, but similar to those of the control.

Keywords: *Fragaria x ananassa* Duch., Photoselective nets, dry weight, production, nutrients.

6.3. INTRODUCCIÓN

A nivel nacional el cultivo de la fresa es importante desde el punto de vista socioeconómico, debido a que genera empleo y divisas por ser un producto de exportación para su consumo en fresco, congelado y procesado (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2020). De acuerdo a datos reportados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024), México es uno de los principales países productores y exportadores, ocupa el tercer lugar en el ranking mundial de producción, los principales estados productores son Michoacán, Baja California y Guanajuato. Dentro de las principales investigaciones generadas en fresa, destacan las enfocadas a su nutrición, vida postcosecha, calidad y rendimiento de fruto (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2024). Debido a la alta demanda de los países importadores, los estándares de calidad se han elevado, por lo que los nuevos retos que enfrentará este cultivo en los próximos años, están relacionados con la implementación de estrategias de mantenimiento, mejoramiento de la sanidad vegetal y el desarrollo de nueva tecnología que permita mejorar la calidad del fruto e incrementar su rendimiento (Secretaría de Agricultura y Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, 2017).

El uso de mallas en la agricultura puede proveer a los cultivos protección contra radiación excesiva, vientos o plagas (Shahak, 2008), la malla sombra negra usada de manera convencional, modifica la cantidad de radiación que recibe la planta. Por otra parte, las mallas de color o foto-selectivas, pueden modificar la calidad de radiación y promover la transmisión de longitudes de onda específicas (Stamps, 2009; Whitelam & Halliday, 2007), lo que puede resultar en la estimulación de respuestas fisiológicas reguladas por la radiación como la fotosíntesis y la fotomorfogénesis. Dependiendo del grado de sombreo y el color de malla usado puede desencadenar cambios en el crecimiento de ramas, brotes, frutos y esto a su vez influir en el tiempo de cosecha y calidad de fruto (Retamales et al., 2008); también pueden aliviar el estrés ambiental del cultivo, incrementando los rendimientos y adelantando la cosecha (Lobos et al., 2009).

Se ha reportado que al modificar la cantidad de radiación UV, es posible incrementar el crecimiento y desarrollo de la planta (Retamales et al., 2008; Stamps, 2009), aumentar el rendimiento y tiempo de cosecha (Arthurs et al., 2013).

Las mallas de color son una herramienta relativamente nueva que puede ser usada para una gran variedad de propósitos por los productores; sin embargo, los efectos son variados y la respuesta en la planta puede diferir, algunos reportaron aumentos en el rendimiento y otros decrementos en la calidad de fruto o rendimientos similares al tratamiento control, esto sugiere que la respuesta fisiológica involucrada aun no es entendida por completo, ya que depende de varios factores y esta respuesta puede variar dependiendo del cultivar, área geográfica y prácticas culturales (Rylski & Spigelman, 1986). Lo anterior aunado a que existe información limitada sobre la distinta fabricación de las mallas o a que las condiciones ambientales de crecimiento no suelen ser reportados (Arthurs et al., 2013).

La importancia para el cultivo de fresa radica en que de acuerdo con la Dávalos et al. (2011), la competitividad y rentabilidad de la industria de fresa en México, dependerá de mejorar las técnicas de producción que permitan disminuir los costos y el establecimiento del cultivo en zonas con producción de mejor calidad durante las épocas de mayor demanda en el mercado mundial; por lo cual es importante conocer si es posible lograr un mejor desarrollo de la planta por medio del uso de tecnología más económica, como las de mallas de color que pueda repercutir en un mayor rendimiento y calidad de fruto. Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue determinar el efecto de mallas sombra de color en el crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental en plantas de fresa cv. Albión, e identificar si alguna malla puede ser considerada como una alternativa para mejorar la producción.

6.4. MATERIALES Y MÉTODOS

6.4.1. Establecimiento del cultivo

El experimento se realizó en un invernadero con cubierta de cristal de la Universidad Autónoma Chapingo Edo. de México, ubicado en los 19° 20' N y 98° 53' O, a una altitud de 2240 m., en la temporada primavera-invierno de 2022.

Se establecieron plantas de fresa cv. Albión de día neutro en contenedores de plástico de 5 L, en un sistema hidropónico abierto. Se usó como sustrato una mezcla de turba: agrolita (70:30 v/v) cuyo pH y CE iniciales eran 5.9 y 0.25 dS m⁻¹, los riegos se realizaron tres veces por semana con un volumen de 800 mL de solución nutritiva al 60 % (pH de 6 y CE de 1.7 dS m⁻¹) por contenedor, procurando un sobre riego del 25 %.

Se empleó agua de grifo para preparar la solución nutritiva, considerando su composición iónica; la solución nutritiva contenía 9 meq L⁻¹ de NO₃⁻, 0.39 meq L⁻¹ de H₂PO₄⁻, 0.26 meq L⁻¹ de SO₄⁻², 4.43 meq L⁻¹ de K⁺, 5.83 meq L⁻¹ de Ca⁺², 1.94 meq L⁻¹ de Mg⁺² y 3.24 mg L⁻¹ Fe-EDTA, 0.14 mg L⁻¹ Zn-EDTA, mg L⁻¹ Cu-EDTA, 0.73 mg L⁻¹ Mn-EDTA, 0.05 mg L⁻¹ Mo, 0.13 mg L⁻¹ B

6.4.2. Variables ambientales

A los 25 días después del trasplante (ddt) las plantas se cubrieron con malla (80 % sombra) color negro, verde, azul, beige y se estableció un testigo sin malla. Cada malla se colocó a una altura de 1.5 m cubriendo los costados, bajo cada malla se colocó un ventilador de aire Man® modelo Freal 2020 (CDMX, México) que mantenía un flujo de aire medido con un anemómetro Steren® HER 440 (CDMX, México) a una velocidad de 0.15 y 0.25 m s⁻¹, los ventiladores de aire encendían durante las horas de mayor temperatura en el invernadero (de 11 a 16 hrs.).

Se midió el espectro de irradiancia en cada malla, con un radiómetro multiespectral PS-300 (Apogee Instruments Inc., Utah, EE. UU.); las siguientes variables ambientales se registraron al medio día solar (12:00 pm) en días con cielo despejado: densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) con un

medidor LGBQM2 (Hydrofarm, California, EE. UU.), temperatura del ambiente y humedad relativa con un datalogger RC-51H (Elitech Technology, California, EE. UU.). Los datos obtenidos se muestran en el Cuadro 1 y Figura 1.

Cuadro 1. Temperatura, humedad relativa y radiación transmitida ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por las mallas de color en plantas de fresa cv. Albión al medio día solar (12:00 pm).

Variable	Testigo	Negro	Azul	Verde	Beige
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) [†]	36.5 $\pm$ 0.7	33.2 $\pm$ 0.5	35.4 $\pm$ 0.6	33.1 $\pm$ 0.5	34.9 $\pm$ 0.4
Humedad relativa (%) [†]	28.5 $\pm$ 1.5	41.2 $\pm$ 1.9	38.2 $\pm$ 1.7	38.5 $\pm$ 2.2	38.5 $\pm$ 1.8
DFFF [†]	1393 $\pm$ 156	347 $\pm$ 44	497 $\pm$ 54	317 $\pm$ 39	578 $\pm$ 68
RT (230 - 1100 nm)	2166	605	1055	571	1117
R/RL	1.13	1.16	0.87	1.11	1.12
AZ/RL	0.99	1.09	1.42	1.01	0.92

[†]Datos expresados como la media $\pm$ desviación estándar de 18 repeticiones. DFFF: densidad del flujo de fotones fotosintéticos, RT: radiación total, R/RL: balance rojo/rojo lejano, AZ/RL: balance azul/rojo lejano.

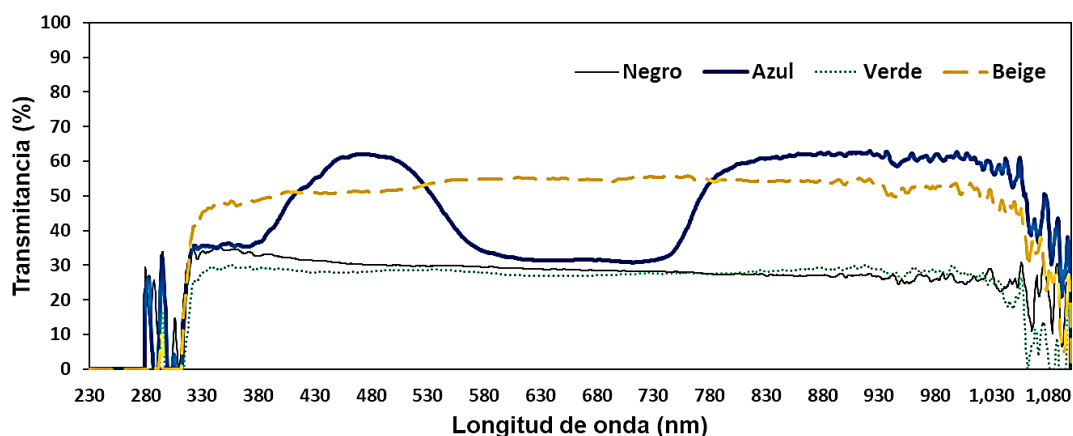


Figura 1. Transmitancia medida bajo malla sombra de color al medio día solar (12:00 pm). Los datos son la relación en % entre la radiación medida fuera y dentro de las mallas.

6.4.3. Variables de crecimiento de la planta

Al final del experimento (325 ddt) se seleccionaron cinco plantas al azar por tratamiento, en cada una se midió la altura de planta con un flexómetro (Truper®, Mex.), el área foliar con un medidor LICOR 3100 (Lincoln, EE. UU.) y el número de hojas; también con un vernier digital (Stereon®, CDMX, Mex) se midió el largo y el diámetro del peciolo, diámetro de la corona, longitud de la raíz. El volumen de raíz se midió con una probeta de vidrio (por desplazamiento de agua) y se contabilizó el número de estolones, así como los días de antesis hasta la cosecha de fruto.

Posteriormente se midió el peso fresco total de cada planta con una balanza digital OHAUS Scout Pro (Parsippany-Troy Hills, New Jersey, EE. UU.). La planta fue seccionada en estructuras (raíz, corona, hojas y estolones), las estructuras se secaron en una estufa con aire circulante BINDER® (modelo FED 115, Alemania) a 65 °C hasta peso constante y se registró el peso seco de la planta, hoja, corona, raíz y estolón. También se calculó el peso específico de las hojas con la relación del peso seco de la hoja y el área foliar (mg de hoja seca por cm²).

6.4.4. Variables de rendimiento

Durante el periodo de fructificación se cosecharon todos los frutos de cada planta por repetición y tratamiento cuando estos alcanzaron el color rojo brillante en tres cuartas partes del fruto, posteriormente con una balanza OHAUS Scout Pro (Parsippany-Troy Hills, New Jersey, EE. UU.) se registró el peso de los frutos por planta, el peso de fruto y se contabilizó el número de frutos por planta.

6.4.5 Determinación de nutrimentos

Se seleccionaron cinco plantas por tratamiento, las cuales fueron separadas en estructuras y agrupadas en: parte superior de la planta (foliolo + peciolo) y parte inferior de la planta (raíz + corona) para su análisis nutrimental. Se determinó la

concentración de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, B, Mn y Mo siguiendo la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999).

6.4.6. Diseño experimental y análisis estadístico

Se empleo un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos y un testigo, con cinco repeticiones para las variables de crecimiento, nueve repeticiones para el rendimiento de la planta y cinco repeticiones para la concentración de nutrimentos por tratamiento; la unidad experimental consistió en una planta por contenedor. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) (Gutiérrez & de la Vara, 2008) para las variables de crecimiento, rendimiento y concentración nutrimental, excepto para las variables número de hojas, número de estolones y número de frutos (Kruskal-Wallis, Conover, 1999), así como sus comparaciones múltiples (prueba de Tukey y Dunn) con el programa SAS versión 9 y Minitab® 19, se consideraron diferencias significativas cuando $p \leq 0.05$.

6.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.5.1. Crecimiento de la planta

La altura de las plantas cultivadas en la malla azul, negra, verde y beige fue en promedio 24 % mayor que en el testigo; entre las mallas, las plantas que crecieron en la malla de color azul fueron 16 % más altas que en la malla verde y beige ($p \leq 0.05$). El área foliar, largo del peciolo, diámetro del peciolo, largo de raíz y volumen de raíz de las plantas testigo fue igual estadísticamente que las plantas de las mallas de color, pero entre mallas si existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Cuadro 2). Las plantas cultivadas en la malla de color azul presentaron 76 % mayor área foliar que las plantas de la malla negra y verde ($p \leq 0.05$), 27 % mayor largo del peciolo que en la malla beige ($p \leq 0.05$), 26 % mayor largo de raíz que en la malla verde ($p \leq 0.05$) y más del doble del volumen de raíz que en las demás mallas ($p \leq 0.05$). Las plantas provenientes de la malla beige presentaron un número de hojas 35 % menor que las del testigo

($p \leq 0.05$) y un diámetro de peciolo 20 % mayor que en la malla verde ($p \leq 0.05$). En el caso del número de estolones, la malla azul y beige produjeron en promedio 67 % más estolones que en la malla verde y negra ($p \leq 0.05$), esta determinación en el testigo no se pudo realizar. Los días de flor a fruto en la malla negra y verde fueron 33 % mayores que en el testigo, malla azul y beige.

Cuadro 2. Características de crecimiento de las plantas de fresa cv. Albión cultivadas bajo malla sombra de color.

Variable	Testigo	Negro	Azul	Verde	Beige
ALT (cm)	10.7 ± 0.3 c	13.3 ± 0.2 ab	14.6 ± 0.4 a	13.1 ± 0.3 b	12.2 ± 0.4 b
AF (cm ²)	355.3 ± 16.4 ab	220.2 ± 25.9 b	410.1 ± 65.9 a	247.9 ± 5.4 b	268.6 ± 27.5 ab
NH	12.6 ± 0.8 a	9.0 ± 0.7 ab	11.0 ± 1.4 ab	9.0 ± 0.4 ab	8.2 ± 0.6 b
LP (mm)	8.7 ± 0.2 ab	8.6 ± 0.6 ab	10.0 ± 0.4 a	8.7 ± 0.3 ab	7.9 ± 0.2 b
DP (mm)	2.8 ± 0.1 ab	2.7 ± 0.2 ab	3.0 ± 0.1 ab	2.6 ± 0.1 b	3.2 ± 0.1 a
DC (mm)	15.3 ± 2.1 a	16.5 ± 1.5 a	19.1 ± 1.0 a	14.4 ± 0.7 a	19.0 ± 1.9 a
LR (cm)	19.2 ± 0.8 ab	20.2 ± 0.7 ab	20.6 ± 1.2 a	16.4 ± 0.5 b	19.6 ± 1.1 ab
VR (mL)	21.6 ± 5.8 ab	9.6 ± 0.4 b	34.2 ± 3.0 a	9.8 ± 1.1 b	11.6 ± 2.0 b
NE	ND	3.6 ± 0.2 b	6.4 ± 0.5 a	4.2 ± 0.2 b	6.6 ± 0.2 a
DFF	27.2 ± 0.7 c	36.2 ± 0.4 a	28.4 ± 0.2 c	33.0 ± 0.5 b	29.0 ± 0.0 c

Datos expresados como la media ± error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma fila indican diferencias estadísticas significativas (prueba de Dunn para NH y NE, y Tukey para el resto, $p \leq 0.05$). ALT: altura de la planta, AF: área foliar, NH: número de hojas, LP: largo de peciolo, DP: diámetro de peciolo, DC: diámetro de corona, LR: largo de raíz, VR: volumen de raíz, NE: número de estolones, DFF: días de flor a fruto, ND: no determinado.

No existieron diferencias significativas en el peso fresco, peso seco total de la planta, corona y estolones de las plantas testigo y las plantas cultivadas en las mallas de color; sin embargo, entre mallas existieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) (Figura 2). Las plantas cultivadas en la malla de color azul presentaron 86 % mayor peso fresco y 107 % más peso seco total de la planta que en el resto de las mallas, 73 % mayor peso seco de la corona que la malla negra y verde, 62 % mayor peso seco de la raíz que el testigo y más del doble que la malla negra y verde, el peso seco de la hoja fue 40 % menor en la malla negra comparado con el testigo y 109 % mayor en la malla azul en comparación con la malla negra, por último, el peso seco del estolón fue 67 % mayor en la malla beige que en el resto de las mallas ($p \leq 0.05$).

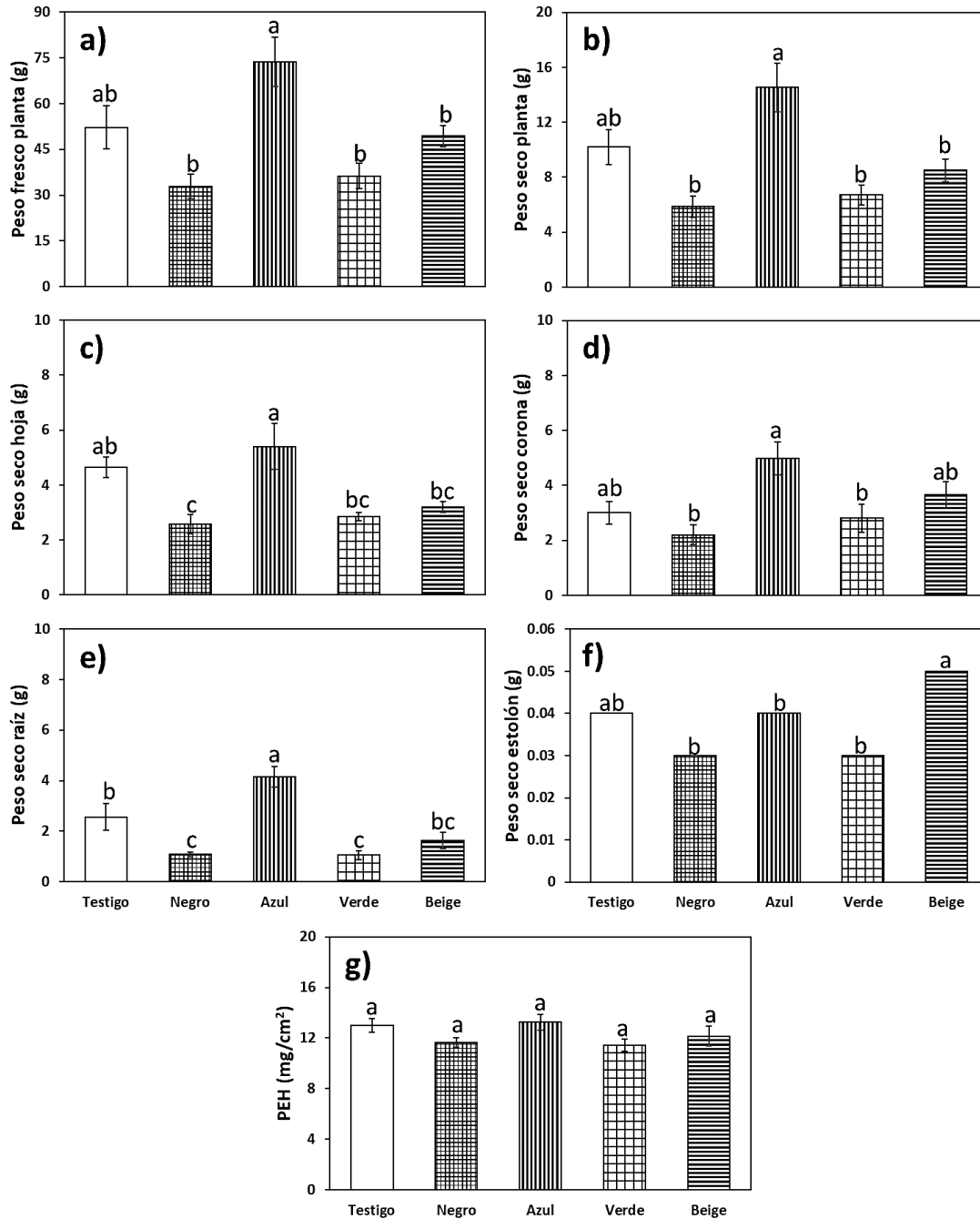


Figura 2. Características de crecimiento de la planta de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) Peso fresco de la planta, b) Peso seco de la planta, c) Peso seco de la hoja, d) Peso seco de la corona, e) Peso seco de la raíz, f) Peso seco del estolón y g) Peso específico de la hoja. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

En general, tanto el crecimiento y número de estolones producidos como el peso fresco y seco de la planta de fresa fue mayor en las plantas cultivadas bajo la malla azul, seguido por la malla beige en comparación al resto de las mallas; esto puede ser atribuido a la mayor densidad del flujo de fotones fotosintéticos transmitida por estas (Cuadro 1), la mayor DFFF puede reflejarse en la cantidad de fotosintatos y biomasa generada por las plantas, ya que, de acuerdo con Wu et al. (2011) y Macias-Rodríguez et al. (2002), las plantas de fresa requieren una gran cantidad de carbohidratos para el crecimiento vegetativo y reproductivo. La corona es un órgano de almacenaje de carbohidratos cuyo peso seco en este estudio fue mayor en la malla azul. Park et al. (2023), mencionan que al aumentar la DFFF es posible incrementar el crecimiento de la planta de fresa en el cv. Albión.

El comportamiento de la planta de fresa bajo la malla azul contrasta con lo reportado por Ayala-Tafoya et al. (2011) en plantas de *Capsicum annuum* L. cultivadas bajo malla azul, las cuales tuvieron menor crecimiento en comparación con mallas de color beige, negra y verde al 50 %, Shahak (2008) también reportaron que la malla azul causó enanismo y reducción del crecimiento en cultivos de follaje y flores de corte, los autores señalaron que este efecto puede ser debido a enriquecimiento/reducción de la banda espectral de luz azul, rojo y rojo lejano, asimismo, Shahak (2004) reportaron que la relación rojo/rojo lejano fue reducida de manera similar entre mallas de color rojo, gris, perla y blanco (0.81 en promedio), pero esta relación fue mayor en la malla azul (0.93).

Los resultados obtenidos en este estudio pueden estar relacionados con el balance rojo/rojo lejano en la malla azul, el cual puede variar debido a la composición de aditivos que usa cada fabricante. Cabe destacar que el balance de luz rojo/rojo lejano fue numéricamente similar entre las mallas de color y testigo (1.13 en promedio) (Cuadro 1) a excepción de la malla azul, en la cual fue numéricamente más baja, lo que indica que las plantas de la malla azul recibieron más luz del intervalo rojo lejano, por otra parte, también el balance

azul/rojo lejano fue numéricamente mayor en la malla azul (Cuadro 1) lo que puede activar la respuesta de los fotoreceptores involucrados en la estimulación de crecimiento por elongación y fototropismo como fitocromos y fototropinas (Zoratti et al., 2014) por medio de la acción de giberelinas (Rajapakse et al., 1999).

En cuanto al tiempo transcurrido de flor a fruto, este fue mayor en la malla negra y verde (34 días en promedio); en comparación con el tiempo transcurrido en el testigo, malla azul y beige (28 días en promedio) ($p \leq 0.05$) (Cuadro 2). Hancock (2020) señaló que el tiempo de maduración de fruto de fresa es de 30 días en promedio dependiendo la variedad y condiciones ambientales. En este estudio el atraso en la maduración de los frutos en la malla negra y verde puede ser debido a una menor radiación y temperatura en comparación con la malla azul, beige y testigo, tal como mencionan Wang y Zheng (2001), que mayores temperaturas causan maduración más rápida del fruto de fresa, ya que la superficie y color de pulpa es más roja y oscura.

De acuerdo a los resultados anteriores las plantas que crecieron bajo la malla de color azul y beige tienen un crecimiento similar al testigo excepto en la altura de la planta, en general la malla negra y verde no favorecieron el peso de la hoja y de la raíz, además de que retrasaron el tiempo de desarrollo y cosecha de fruto aproximadamente una semana. Este atraso en la maduración coincide con los reportes de Zoratti et al. (2015) al usar mallas de color, así como también con el estudio de Wang y Wang (2014) al aumentar el porcentaje de sombreo de 40 a 60 % en un cultivo de fresa, con Lobos et al. (2009) y Lobos et al. (2013) al aumentar 75 % sombra en comparación con 50 y 25 % en *Vaccinium corymbosum* L., cabe destacar que las mallas empleadas en este estudio poseen un 80 % de sombreo y de acuerdo con Wang y Wang (2014) un mayor sombreo puede limitar el crecimiento de la planta de fresa y reducir la tasa fotosintética disminuyendo el rendimiento, número de frutos y atrasar la maduración de fruto, en comparación con la radiación directa.

6.5.2. Rendimiento de la planta

Comparado con el testigo, las plantas que crecieron en la malla azul y beige tuvieron aproximadamente 18 % menor cantidad de fruto por planta, seguido por los frutos de la malla negra (55 %) y verde (71 %) ($p \leq 0.05$) (Figura 3a), mientras que el número de frutos producidos con la malla azul fue similar al obtenido en el testigo; sin embargo, el número de frutos con la malla negra y verde fue 46 % y 62 % menor, respectivamente (Figura 3c).

En este estudio el rendimiento fue influenciado principalmente por el número de frutos, ya que no existieron diferencias significativas en el peso del fruto entre tratamientos (Figura 3b). El rendimiento también estuvo limitado por el alto porcentaje de sombreo de las mallas (80 % sombra), ya que autores como Ayala-Tafoya et al. (2015), Díaz-Pérez et al. (2020) y Shahak et al. (2004) han reportado aumentos de 50 % en el rendimiento de *Capsicum annum* L., de 40 % en manzano y en duraznero de 15 a 30 % al usar mallas de colores con menores porcentajes de sombreo. También se ha reportado una disminución del rendimiento en fresa al usar malla con 57 % sombra (Wang & Wang, 2014) y en arándano con 35 y 50 % de sombra (Retamales et al., 2008).

Entre las mallas de color claro (azul y beige) tuvieron un rendimiento 124 % mayor al obtenido con las mallas oscuras (verde y negra) ($p \leq 0.05$), lo cual podría estar relacionado con la transmisión de radiación de las mallas, las cuales tuvieron una DFFF de $537 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en promedio en la malla azul y beige en comparación con $332 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en la malla verde y negra (Cuadro 1). Esto concuerda con lo reportado por Shahak (2008) en *Capsicum annum* L., donde se reportó un aumento del rendimiento de 20 a 30 % con mallas de color claro (rojo y perla) en comparación con malla oscura (negra). Por otra parte, Whitelam y Halliday (2007) señalaron que la productividad de algunos cultivos frutales, puede responder de manera negativa a la sombra, los resultados obtenidos por estos autores sugieren que una malla de color de bajo sombreo (30 % o menos) puede mejorar la producción de cultivos frutales.

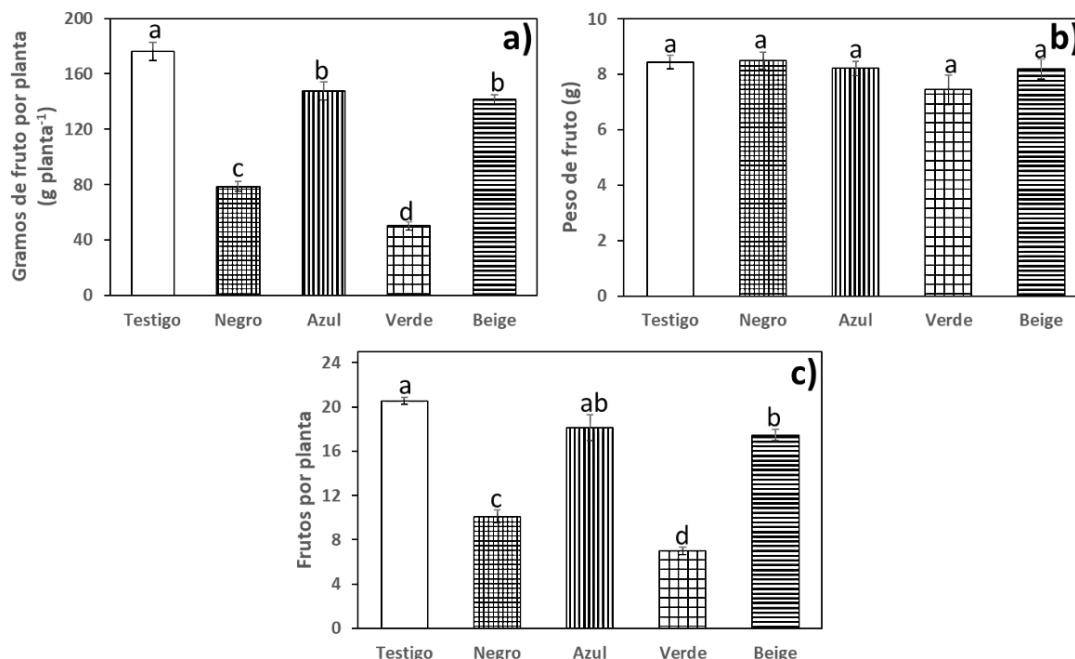


Figura 3. Rendimiento de fruto de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) gramos de fruto por planta, b) Peso del fruto y c) número de frutos por planta. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de nueve repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (prueba de Dunn para frutos por planta, y Tukey para el resto, $p \leq 0.05$).

6.5.3. Concentración nutrimental

La concentración de K en el foliolo y el peciolo de la planta de fresa fue 34 % menor en las plantas cultivadas bajo la malla beige, en comparación con las plantas de la malla negra y el testigo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 3), mientras que el Ca fue 24 % menor en las plantas de la malla azul comparado con el testigo ($p \leq 0.05$). No existieron diferencias significativas en la concentración de N, P y Mg entre tratamientos ($p > 0.05$).

Cuadro 3. Concentración de macronutrientes en hojas de fresa cv. Albi3n cultivada bajo malla sombra de color.

Malla sombra	(%)				
	N	P	K	Ca	Mg
Testigo	3.33 ± 0.2 a	0.32 ± 0.0 a	2.24 ± 0.2 a	0.63 ± 0.0 a	0.47 ± 0.0 a
Negro	3.47 ± 0.2 a	0.37 ± 0.0 a	2.11 ± 0.1 a	0.53 ± 0.0 ab	0.48 ± 0.0 a
Azul	2.68 ± 0.3 a	0.35 ± 0.1 a	1.92 ± 0.2 ab	0.48 ± 0.1 b	0.45 ± 0.1 a
Verde	2.96 ± 0.3 a	0.37 ± 0.1 a	1.72 ± 0.2 ab	0.50 ± 0.1 ab	0.49 ± 0.1 a
Beige	2.98 ± 0.3 a	0.34 ± 0.1 a	1.44 ± 0.2 b	0.51 ± 0.1 ab	0.50 ± 0.1 a

Datos expresados como la media ± error est3ndar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La concentraci3n de Fe en el foliolo y el peciolo de la planta fue 33 % menor en las plantas cultivadas bajo la malla negra y azul, en comparaci3n con el testigo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4). La concentraci3n de Cu fue 78 % mayor en las plantas con la malla negra en comparaci3n con el testigo y el resto de las mallas. El Mn fue 65 % mayor en las plantas de la malla negra y verde en comparaci3n con el testigo, malla azul y beige. En el caso de la concentraci3n de Zn, no existieron diferencias significativas entre las plantas de las mallas de color y el testigo, pero entre las mallas la concentraci3n fue 33 % menor en las plantas de la malla beige en comparaci3n con la malla negra y verde. No existieron diferencias significativas en la concentraci3n de B y Mo entre tratamientos ($p > 0.05$).

Cuadro 4. Concentraci3n de micronutrientes en hojas de fresa cv. Albi3n cultivada bajo malla sombra de color.

Malla sombra	(ppm)					
	Fe	Cu	Zn	B	Mn	Mo
Testigo	373 ± 26.5 a	2.6 ± 0.6 b	11.7 ± 1.5 ab	44.2 ± 1.7 a	100 ± 8.2 b	9.0 ± 1.7 a
Negro	245 ± 18.4 b	4.6 ± 0.4 a	16.7 ± 1.6 a	43.0 ± 2.1 a	182 ± 14.0 a	8.0 ± 0.8 a
Azul	256 ± 3.1 b	1.7 ± 0.3 b	12.7 ± 0.7 ab	34.3 ± 1.3 a	128 ± 2.1 b	6.6 ± 1.0 a
Verde	295 ± 3.3 ab	1.7 ± 0.3 b	16.7 ± 0.6 a	42.9 ± 1.5 a	211 ± 2.5 a	10.0 ± 1.1 a
Beige	305 ± 3.5 ab	1.7 ± 0.3 b	11.2 ± 0.6 b	31.2 ± 1.3 a	131 ± 0.6 b	13.2 ± 0.9 a

Datos expresados como la media ± error est3ndar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La concentración de K en la raíz y corona de la planta fue 20 % menor y de Mg fue 12 % menor en las plantas cultivadas bajo la malla azul, en comparación con la malla beige ($p \leq 0.05$) (Cuadro 5). No existieron diferencias significativas en la concentración de N, P y Ca entre tratamientos ($p > 0.05$).

Cuadro 5. Concentración de macronutrientes en la raíz y corona de la planta de fresa cv. Albi3n cultivada bajo malla sombra de color.

(%)					
Malla sombra	N	P	K	Ca	Mg
Testigo	2.25 ± 0.09 a	0.23 ± 0.01 a	0.47 ± 0.04 ab	0.37 ± 0.05 a	0.40 ± 0.02 ab
Negro	2.77 ± 0.19 a	0.28 ± 0.02 a	0.49 ± 0.03 ab	0.39 ± 0.02 a	0.39 ± 0.01 ab
Azul	2.35 ± 0.19 a	0.21 ± 0.09 a	0.43 ± 0.11 b	0.35 ± 0.10 a	0.37 ± 0.09 b
Verde	2.74 ± 0.17 a	0.27 ± 0.09 a	0.59 ± 0.15 ab	0.37 ± 0.14 a	0.44 ± 0.09 ab
Beige	2.40 ± 0.26 a	0.23 ± 0.05 a	0.63 ± 0.15 a	0.43 ± 0.09 a	0.45 ± 0.09 a

Datos expresados como la media ± error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

La concentración de Zn en la raíz y corona de la planta fue 60 % menor en las plantas cultivadas en la malla beige en comparación con el testigo ($p \leq 0.05$) (Cuadro 6). Entre mallas de color, las plantas cultivadas en la malla negra tuvieron una concentración de Fe 64 % mayor que en la malla beige, la concentración de Cu en la malla negra fue más del doble que en la malla verde y beige. La concentración de Zn en la malla negra fue más del doble que en la malla beige y también la concentración de Mn en la malla negra fue 61 % mayor que en la malla azul.

Cuadro 6. Concentración de micronutrientes en la raíz y corona de la planta de fresa cv. Albi3n cultivada bajo malla sombra de color.

(ppm)						
Malla sombra	Fe	Cu	Zn	B	Mn	Mo
Testigo	329 ± 32.0 ab	6.2 ± 0.6 ab	32.6 ± 4.4 ab	20.6 ± 1.2 a	33.1 ± 4.1 ab	11.5 ± 1.6 a
Negro	459 ± 32.0 a	11.4 ± 2.5 a	42.4 ± 2.8 a	19.4 ± 0.6 a	48.4 ± 6.0 a	12.4 ± 1.2 a
Azul	304 ± 4.4 ab	7.5 ± 0.6 ab	32.7 ± 1.4 ab	18.7 ± 0.7 a	30.1 ± 1.1 b	6.6 ± 1.0 a
Verde	331 ± 3.8 ab	3.3 ± 0.5 b	21.8 ± 1.6 bc	21.8 ± 0.6 a	47.5 ± 1.1 ab	9.4 ± 0.8 a
Beige	280 ± 4.5 b	2.9 ± 0.3 b	15.6 ± 0.6 c	18.8 ± 0.9 a	35.6 ± 1.4 ab	11.1 ± 1.0 a

Datos expresados como la media ± error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

A pesar de que la concentración de K y Ca en el foliolo y el peciolo de las plantas cultivadas en la malla beige y azul fue menor en comparación con el testigo, las concentraciones estuvieron en el intervalo de suficiencia reportado por Bennett (1994), Díaz et al. (2017) y Hancock (2020) para la planta de fresa.

Hubo un efecto variable en las mallas de color sobre la concentración de K, Fe, Cu, Zn y Mn, pero esta concentración fue constantemente menor en la malla azul y beige en comparación con el resto de mallas, lo cual puede estar relacionado con mayor cantidad de radiación, temperatura y menor humedad relativa del ambiente generado por estas mallas (Cuadro 1), Estos efectos sobre el ambiente pudieron haber impactado en el cierre de estomas y en la incorporación de estos nutrientes a la planta, ya que de acuerdo con Rodríguez, Trejo-Téllez y Alcántar (2013) estos iones pueden ser transportados por flujo de masas desde la solución del suelo hasta la raíz de la planta, por otra parte, Díaz-Pérez (2013) reportaron que el uso de mallas de color oscuro alivió el estrés por calor y modificó el ambiente de crecimiento, lo cual benefició la absorción de N, K, Ca, Mg, B y Mn en la planta de *Capsicum annum* L. cultivada bajo distintos porcentajes de sombreo. El efecto variable presentado entre nutrientes debido al efecto de la malla sombra en este estudio, también ha sido reportado por Jokar et al. (2021) en un cultivo de *Ficus carica* L. bajo condiciones de malla sombra de color azul y amarilla y por Díaz-Pérez (2014) en *Capsicum annum* L., los autores señalaron que aún existe información limitada sobre el efecto de la sombra y la nutrición mineral de cultivos.

Considerando el peso seco de la planta, la cantidad de P, K, Ca y Mg fue mayor en las hojas de las plantas cultivadas en la malla sombra azul y menor en las hojas cultivadas en la malla negra y verde ($p \leq 0.05$) (Figura 4), también la cantidad de N, P, Ca, Mg, Cu, Zn y B fue mayor en la raíz y corona (Figura 5), esto es debido a la mayor cantidad de peso seco producidos tanto en la hoja como en raíz y corona de la planta cultivada bajo la malla azul y a la menor cantidad de peso seco producido en la malla negra y verde (Figura 2).

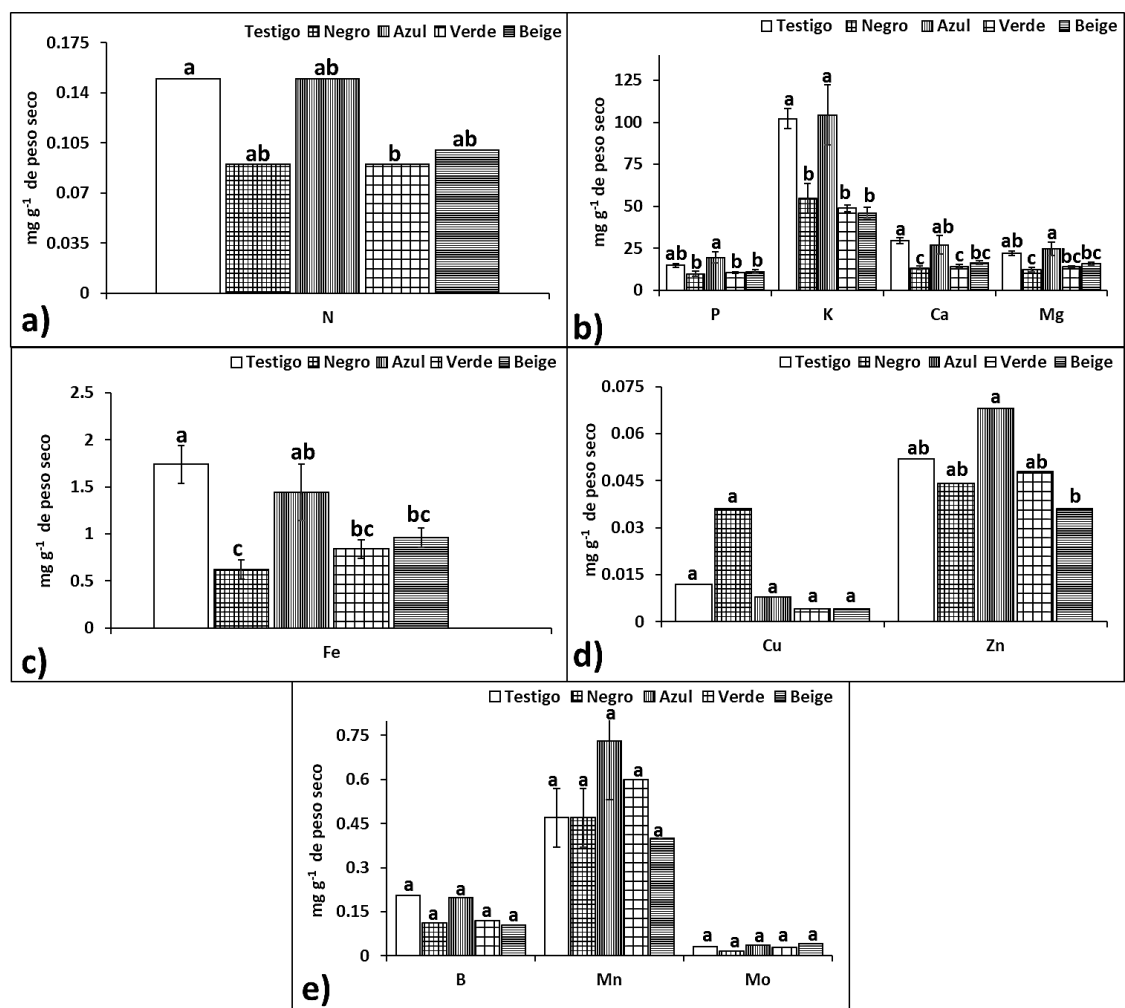


Figura 4. Nutrientes en mg por g de peso seco en hojas de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) N, b) P, K, Ca y Mg, c) Fe, d) Cu, Zn y e) B, Mn y Mo. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

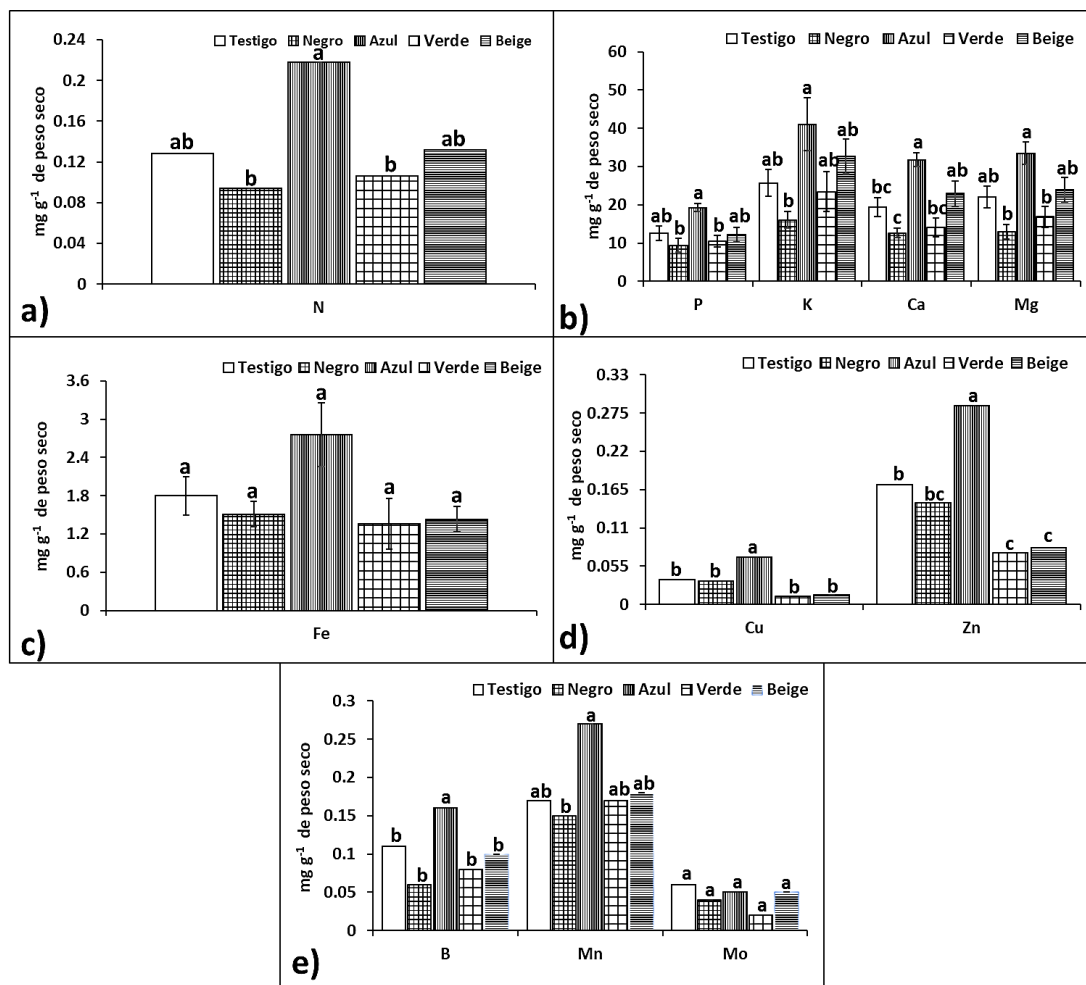


Figura 5. Nutrientes en mg por g de peso seco en la raíz y corona de fresa cv. Albión cultivada bajo malla sombra de color. a) N, b) P, K, Ca y Mg, c) Fe, d) Cu, Zn y e) B, Mn y Mo. Datos expresados como la media $\pm$ error estándar de cinco repeticiones. Letras distintas en la misma gráfica indican diferencias estadísticas significativas (Tukey, $p \leq 0.05$).

6.6. CONCLUSIONES

Con la malla azul y beige se obtuvieron mejores características de crecimiento y rendimiento de la planta en comparación con la malla negra y verde, pero similares al testigo, a pesar de que las concentraciones de K, Fe, Cu, Zn y Mn fueron menores en la malla azul y beige, estas estuvieron en el intervalo de suficiencia reportado para el cultivo.

6.7. LITERATURA CITADA

- Alcántar, G. G., & Sandoval, V. M. (1999). Manual de análisis químico de tejido vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Colegio de Postgraduados.
- Arthurs, S. P., Stamps, R. H., & Giglia, F. F. (2013). Environmental modification inside photoselective shadehouses. *HortScience*, 48(8), 975-979. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.8.975>
- Ayala-Tafoya, F., Zatarain-López, D. M., Valenzuela-López, M., Partida-Ruvalcaba, L., Velázquez-Alcaraz, T de J., Díaz-Valdés, T., y Osuna-Sánchez J. A. (2011). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra. *Terra Latinoamericana*, 29(4), 403-410. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792011000400403&script=sci_arttext
- Ayala-Tafoya, F., Sánchez-Madrid, R., Partida-Ruvalcaba, L., Yáñez-Juárez, M. G., Ruiz-Espinosa, H., Velázquez, A. T de J., Valenzuela-López, M., y Parra-Delgado, J. M. (2015). Producción de pimiento morrón con mallas sombra de colores. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(1), 93-99. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802015000100012&script=sci_arttext
- Bennett, W. F. (1994). Nutrient deficiencies and toxicities in crop plants. The American Phytopathological Society.
- Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics*. Wiley.
- Dávalos, G. P. A., Aguilar, G. R., Jofre, G. A. E., Hernández, R. A. R. y Vázquez, S. M. N. (2011). *Tecnología para sembrar viveros de fresa. Campo Experimental Bajío*, INIFAP.
- Díaz, E. L. F., Dávalos, G. P. A., Jofre G. A. E., y Martínez, M. T. O. (2017). Fresa, deficiencias y síntomas nutricionales “una guía visual para fertilizar”. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Díaz-Pérez, J. C. (2013). Bell Pepper (*Capsicum annum* L.) Crop as affected by shade level: microenvironment, plant growth, leaf gas exchange, and leaf mineral nutrient concentration. *HortScience*, 48(2), 175-182. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.48.2.175>
- Díaz-Pérez, J.C. (2014). Bell pepper (*Capsicum annum* L.) crop as affected by shade level: fruit yield, quality, and postharvest attributes, and incidence of *Phytophthora blight* (caused by *Phytophthora capsici* Leon.). *HortScience*, 49(7), 891-900. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.7.891>
- Díaz-Pérez, J. C., St. John, K., Yamin, K. M., Alvarado-Chávez, J. A., Cutiño-Jiménez, A. M., Bautista, J., Gunawan, G., & Nambeesan, S. U. (2020). Bell pepper (*Capsicum annum* L.) under colored shade nets: fruit yield, postharvest transpiration, color, and chemical composition. *HortScience*, 55(2), 181-187. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14464-19>
- Gutiérrez P. H. y de la Vara S., R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. Segunda edición. Mc Graw Hill.
- Hancock, J. F., (2020): Strawberries. CABI Publishing.

- Jokar, A., Zare, H., Zakerin, A., Aboutalebi, J. A., (2021). Effects of shade net colors on mineral elements and postharvest shelf life and quality of fresh fig (*Ficus carica* L.) under rain-fed condition. *Horticulturae*, 7(5), 93. <https://doi.org/10.3390/horticulturae7050093>
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., del Pozo, A., Hancock, J. F., & Flore, J. A., (2009). Physiological response of *Vaccinium corymbosum* “Elliot” to shading nets in Michigan. *Acta Horticulturae*, 810, 465-470. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2009.810.60>
- Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J. F., Flore, J. A., Romero-Bravo, S., & del Pozo, A., (2013). Productivity and fruit quality of *Vaccinium corymbosum* cv. Elliott under photo-selective shading nets. *Scientia Horticulturae*, 153, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.02.012>
- Macias-Rodríguez, L., Quero, E., & López, M. G. (2002). Carbohydrate differences in strawberry crowns and fruit (*Fragaria* × *ananassa*) during plant development. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(11), 3317-3321. <https://doi.org/10.1021/jf011491p>
- Park, Y., Sethi, R., & Temnyk, S., (2023). Growth, flowering, and fruit production of strawberry ‘Albion’ in response to photoperiod and photosynthetic photon flux density of sole-source lighting. *Plants*, 12(4), 731. <https://doi.org/10.3390/plants12040731>
- Rajapakse, N. C., Young, R. E., McMahon, M. J., & Oi, R., (1999). Plant height control by photoselective filters: current status and future prospects. *HortTechnology*, 9(4), 618-624. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.9.4.618>
- Retamales, J. B., Montecino, J. M., Lobos, G. A., & Rojas, L. A. (2008). Colored shading nets increase yields and profitability of highbush blueberries. *Acta Horticulturae*, 770, 193-197. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.22>
- Rodríguez, M. Ma de las N., Trejo-Téllez, L. I., y Alcántar, G. G. (2013). Acceso, absorción y transporte nutrimental. In Alcántar, G. G., & Trejo-Téllez, L. I. (Eds.) *Nutrición de cultivos*. (pp. 160-199). Editorial del Colegio de Posgraduados.
- Rylski, J., & Spigelman, M. (1986). Effect of shading on plant development, yield and fruit quality of sweet pepper grown under conditions of high temperature and radiation. *Scientia Horticulturae*, 29(1), 31-35. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(86\)90028-2](https://doi.org/10.1016/0304-4238(86)90028-2)
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Planeación Agrícola Nacional, 2017-2030. Fresa Mexicana. Gobierno de México. chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/255626/Planeaci_n_Agr cola_Nacional_2017-2030- parte_tres.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). Panorama Agroalimentario 2020. Gobierno de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (marzo de 2024). Berries, frutillas, frutos rojos, bayas mexicanas... entre lo común y lo biológico. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap/articulos/berries-frutillas->

[frutos-rojos-bayas-mexicanas-entre-lo-comun-y-lo-biologico-para-identificar-estos-frutos-que-se-posicionan-en-el-mercado-nacional-e-internacional?idiom=es](#)

- Shahak, Y. (2008). Photo-selective netting for improved performance of horticultural crops. A review of ornamental and vegetable studies carried out in Israel. *Acta Horticulturae*, 770, 161-168. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.770.18>
- Shahak, Y., Gussakovsky, E. E., Cohen, Y., Lurie, S., Stern, R., Kfir, S., Naor, A., Atzmon, I., Doron, I., & Greenblat-Avron, Y. (2004). Colornets: a new approach for light manipulation in fruit trees. *Acta Horticulturae*, 636, 609-616. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.636.76>
- Stamps, R. H. (2009). Use of colored shade netting in horticulture. *HortScience*, 44(2), 239-241. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.2.239>
- Wang, S. Y., & Zheng, W. (2001). Effect of plant growth temperature on antioxidant capacity in strawberry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4977-4982. <https://doi.org/10.1021/jf0106244>
- Wang, J., & Wang, H. (2014). Effects of shade on strawberries in hydroponic cultivation. *Acta Horticulturae*, 1049(114), 733-736. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1049.114>
- Whitelam, G. C., & Halliday, K. J. (2007). Light and plant development. Blackwell Publishing.
- Wu, C. C., Hsu, S. T., Chang, M. Y., & Fang, W. (2011). Effect of light environment on runner plant propagation of strawberry. *Acta Horticulturae*, 907, 297-302. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.48>
- Zoratti, L., Karppinen, K., Escobar, A. L., Häggman, H., Jaakola, L. (2014). Light-controlled flavonoid biosynthesis in fruits. *Frontiers in Plant Science*, 5, 534. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00534>
- Zoratti, L., Jaakola, L., Häggman, H., & Giongo, L. (2015). Modification of sunlight radiation through colored photo-selective nets affects anthocyanin profile in *Vaccinium* spp. berries. *PLoS ONE*, 10(8), Article e0135935. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135935>

VII. CONCLUSIONES GENERALES

La malla sombra negra redujo la temperatura ambiental, aumentó la humedad relativa y la conductancia estomática. Por otra parte, la DFFF y el pH del sustrato fueron las variables con mayor influencia sobre la tasa fotosintética, transpiración, CO₂ intercelular y temperatura de la hoja en el cv. Camino Real.

La malla sombra verde y negra disminuyeron la DFFF, el número de capas de parénquima en empalizada y el grosor de la hoja, así como el número de estomas y el contenido de clorofila total. La malla verde, negra y beige disminuyeron la tasa fotosintética y aumentaron la concentración de CO₂ intercelular en la hoja, también la malla verde disminuyó la concentración de azúcares solubles totales en la hoja en el cv. Albión.

Los frutos cosechados de las plantas cultivadas bajo la malla azul y beige mostraron mayor contenido de azúcares solubles totales y los cosechados de la malla azul mayor contenido de antocianinas, mientras que los cosechados de la malla beige incrementaron la concentración de AT y compuestos fenólicos.

Con la malla azul y beige se obtuvieron mejores características de crecimiento y rendimiento de la planta cv. Albión entre las mallas de color, pero similares al testigo, a pesar de que las concentraciones de K, Fe, Cu, Zn y Mn en las hojas fueron menores con estas mallas, estuvieron en el intervalo de suficiencia.

En general la malla azul y beige pueden ser consideradas como un sistema de producción alternativo para la planta de fresa cv. Albión, aunque las plantas cultivadas bajo estas mallas no superaron el rendimiento obtenido con el testigo, en variables importantes de la calidad nutracéutica del fruto sí lo hicieron, cabe destacar que estos resultados pueden variar en función del porcentaje de sombreo de las mallas.