

Efecto de tres mallas agrícolas fotoselectivas sobre los cultivos de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) hidropónicos durante dos periodos con distinta radiación

Tatiana Gutiérrez Rojas

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AGRÓNOMA
CON EL GRADO DE LICENCIADA EN AGRONOMÍA

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

2022

Efecto de tres mallas agrícolas fotoselectivas sobre los cultivos de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) hidropónicos durante dos periodos con distinta radiación

Tatiana Gutiérrez Rojas

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AGRÓNOMA
CON EL GRADO DE LICENCIADA EN AGRONOMÍA


Gustavo Quesada Roldán, Ph.D.

DIRECTOR DE TESIS


Freddy Soto Bravo, Ph.D.

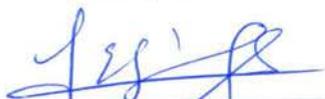
MIEMBRO DEL TRIBUNAL


Marco Vinicio Gutiérrez Soto, Ph.D.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL


Paula Calvo Brenes, Ph.D.

MIEMBRO DEL TRIBUNAL


Luis Gómez Alpizar, Ph.D.

DIRECTOR DE ESCUELA


Tatiana Gutiérrez Rojas, Bach.

SUSTENTANTE

Dedicatoria

A Dios primeramente por darme la sabiduría para poder concluir este proceso de crecimiento profesional y personal.

A mis papás y a mi hermana por la motivación, el cariño y el apoyo brindado, por ser grandes ejemplos a seguir y por ayudarme a alcanzar mis metas.

A mis mejores amigas y amigos por su amistad incondicional y el apoyo constante durante el proceso.

De manera general a todas las personas que contribuyeron con experiencia, sabiduría y tiempo para la culminación de mi carrera profesional.

Tatiana Gutiérrez Rojas

Agradecimientos

A mi director de tesis Ph.D. Gustavo Quesada por transmitirme su conocimiento, por la motivación brindada, la paciencia a la hora de aconsejarme y compromiso con el proyecto.

Al comité asesor, Ph.D. Freddy Soto y Ph.D. Marco Vinicio Gutiérrez por el tiempo dedicado y sus valiosos aportes en esta investigación, también a M.Sc. María Isabel González por su contribución en el análisis estadístico.

A mis amistades y colegas de la generación que aportaron al desarrollo de este trabajo de investigación.

Al personal de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, especialmente a Julio Vega y Luis Oreamuno por la colaboración brindada.

Tatiana Gutiérrez Rojas

Tabla de contenidos

Resumen	XII
Ficha Bibliográfica	XIV
Introducción	15
Objetivos	18
Objetivo general	18
Objetivos específicos	18
Marco Teórico.....	19
Aspectos generales de la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.) y su producción	19
Aspectos generales del kale (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>Sabellica</i> L.) y su producción ...	20
Mallas de sombra para uso agrícola	21
Malla Azul	23
Malla perla.....	24
Malla roja	24
Uso de mallas en la agricultura y su efecto en el microclima	25
Estudios realizados con mallas fotoselectivas en hortalizas y ornamentales	25
Metodología	27
1. Localización.....	27
2. Descripción climática	28
Periodo de mayor radiación.....	28
Periodo de menor radiación.....	30
3. Material experimental	33
4. Sistema de siembra y manejo de los cultivos	34
5. Diseño experimental y descripción de tratamientos	39
5.1 Variables de respuesta	40
5.1.1 Altura de la planta y diámetro del tallo.....	40
5.1.2 Número de hojas totales y largo y ancho de la hoja	41
5.1.3 Índice de área foliar (IAF)	41
5.1.4 Tasa de asimilación de dióxido de carbono (CO ₂) y conductancia estomática (g _s)	41
5.1.5 Color de las hojas según SPAD	41
5.1.6 Rendimiento y calidad comercial	42
6. Análisis de los datos	43

Resultados.....	44
Cultivo de espinaca.....	44
Cultivo de kale.....	52
Discusión.....	60
Cultivo de espinaca.....	60
Cultivo de kale.....	64
Conclusiones.....	67
Recomendaciones.....	68
Literatura citada.....	69
Anexos.....	79

Lista de cuadros

Cuadro 1. Solución nutritiva estándar para hortalizas de hoja desarrollada en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	36
Cuadro 2. Valores máximos y mínimos de radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo las mallas agrícolas y exposición solar directa (testigo) durante los periodos de mayor y menor radiación.	37
Cuadro 3. Valores máximos y mínimos de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo longitudes de onda rojo (R) y rojo lejano (RL) transmitidos por las mallas azul, perla, roja y el testigo, así como el cociente entre ambos (R:RL) durante el periodo de mayor radiación.	38
Cuadro 4. Valores máximos y mínimos de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo longitudes de onda rojo (R) y rojo lejano (RL) transmitidos por las mallas azul, perla, roja y el testigo, así como el cociente entre ambos (R:RL) durante el periodo de menor radiación.	38
Cuadro 5. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.	44
Cuadro 6. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 28 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.	45
Cuadro 7. Promedios del índice de área foliar (IAF) en el cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.	46
Cuadro 8. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) a los 32 y 47 días después de trasplante (DDT), según los distintos colores de mallas utilizadas, durante el periodo de mayor radiación.	47
Cuadro 9. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) a los 27 y 49 días después de trasplante (DDT), según los distintos colores de mallas utilizadas, durante el periodo de menor radiación.	48
Cuadro 10. Promedios del color de las hojas según SPAD en el cultivo de espinaca (<i>S.</i>	

<i>oleracea</i> L.) según las distintas mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.	49
Cuadro 11. Promedios del rendimiento final obtenido en el cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 50 días después de trasplante, durante los periodos de mayor y menor radiación.....	50
Cuadro 12. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.....	52
Cuadro 13. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 28 y 44 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.....	53
Cuadro 14. Promedios del índice de área foliar (IAF) en el cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.	54
Cuadro 15. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 32 y 47 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.	55
Cuadro 16. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 49 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.	56
Cuadro 17. Promedios del color de las hojas según SPAD en el cultivo de kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según las distintas mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.	57
Cuadro 18. Promedios del rendimiento final obtenido del cultivo kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 49 días después de trasplante, durante los periodos de mayor y menor radiación.	58

Lista de figuras

Figura 1. Precipitación total diaria durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	28
Figura 2. Temperatura diaria promedio durante el ciclo de siembra los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	29
Figura 3. Humedad relativa diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	29
Figura 4. Integral de luz diaria total durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	30
Figura 5. Precipitación total diaria durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	31
Figura 6. Temperatura diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	31
Figura 7. Humedad relativa diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	32
Figura 8. Integral de luz diaria total durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	33
Figura 9. Plantas de espinaca var. Space F1 bajo la malla perla (A) y kale var. Darkibor F1 sin malla (B) a los 48 DDT en sistema hidropónico durante el periodo de menor radiación, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	34
Figura 10. Módulos hidropónicos con dimensiones de 10 m de largo, 0,10 m de profundidad y de 1 m de ancho en la parte central, 0,80 m de altura y 1,40 m de ancho de la parte superior de los arcos metálicos para la colocación de las mallas azul, perla y roja en la Estación	

Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.....	35
Figura 11. Absorbancia obtenida bajo las mallas azul, roja, perla y testigo en julio del 2021 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	39
Figura 12. Distribución de los cultivos y las mallas azul, perla y roja con 50% de sombra en los módulos hidropónicos durante los periodos de mayor y menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.....	40
Figura 13. Promedios del porcentaje de la cantidad de plantas de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) para cada categoría comercial bajo las mallas, en los periodos de mayor (A) y menor (B) radiación. Las líneas verticales representan el error estándar (n=6).....	51
Figura 14. Promedios del porcentaje de la cantidad de plantas de kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) para cada categoría comercial bajo las mallas, en los periodos de mayor (A) y menor (B) radiación. Las líneas verticales representan el error estándar (n=6).	59

Lista de anexos

Anexo 1. Resultado de los análisis químicos foliares de los cultivos kale (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) y espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.) hidropónicos a los 41 días después del trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación en Alajuela, Costa Rica.	79
Anexo 2. Resultado de los análisis químicos foliares de los cultivos kale (<i>Brassica oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) y espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.) hidropónicos a los 37 días después del trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación en Alajuela, Costa Rica.	80
Anexo 3. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas hidropónicas preparadas para los cultivos de espinaca y kale, durante los periodos de mayor y menor radiación en Alajuela, Costa Rica.	81
Anexo 4. Promedios de la cantidad de plantas obtenidas para cada categoría comercial del cultivo de espinaca (<i>S. oleracea</i> L.) a los 50 días después de trasplante según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.....	81
Anexo 5. Promedios de la cantidad de plantas obtenidas para cada categoría comercial del cultivo de kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) a los 49 días después de trasplante según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación...	82
Anexo 6. Crecimiento de la espinaca (<i>Spinacia oleracea</i> L.) bajo los tratamientos con mallas de colores azul (D), perla (C), rojo (A) y testigo (B) durante el periodo de menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.	83
Anexo 7. Crecimiento del kale (<i>B. oleracea</i> var. <i>sabellica</i> L.) bajo los tratamientos con mallas de colores azul (D), perla (C), rojo (A) y testigo (B) durante el periodo de menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica	84

Resumen

El cambio climático representa un reto para la agricultura, ya que se debe producir mayor cantidad de alimentos bajo condiciones climáticas adversas. Por ello, se desarrollaron tecnologías como las mallas agrícolas con el fin de mejorar la calidad de los productos, aumentar el rendimiento y proteger los cultivos. Al mismo tiempo, las mallas influyen en características físicas y biológicas de las plantas, por lo tanto, es indispensable generar información científica que permita la optimización de la producción.

Esta investigación pretendió determinar el efecto de tres mallas agrícolas sobre los cultivos de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) en un sistema hidropónico durante dos periodos con distinta radiación. El proyecto se realizó en la Estación Experimental Agrícolas Fabio Baudrit Moreno, en Alajuela, Costa Rica. Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar con tres tratamientos: malla azul, roja y perla con 50% de sombra y un testigo (sin malla). De material vegetal se sembró espinaca var. Space F1 y kale var. Darkibor F1.

Se midió la altura de la planta, diámetro del tallo, número de hojas, ancho y largo de la hoja, índice de área foliar, tasa de asimilación de CO₂, conductancia estomática, eficiencia intrínseca en el uso del agua, color de las hojas según SPAD, rendimiento por área y la calidad comercial. En el periodo de mayor radiación se presentó un aumento en el crecimiento de la espinaca bajo la malla azul debido a una mayor altura de la planta, diámetro del tallo y ancho y largo de la hoja. Adicionalmente, bajo las mallas roja y perla la tasa de asimilación neta aumentó 3,81 y 2,67 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en contraste con la malla azul.

En el periodo de menor radiación se incrementó la altura de las plantas de espinaca y el largo de la hoja ($p < 0,05$) con el uso de las mallas. Por otro lado, se obtuvo una mayor tasa de asimilación de CO₂ bajo la malla roja y el testigo y, por lo tanto, valores superiores de acumulación de biomasa en contraste a las mallas perla y azul ($p < 0,05$). Además, bajo la malla roja se aumentó un 20% la cantidad de plantas de primera.

En los periodos de mayor y menor radiación el crecimiento del kale se favoreció bajo las mallas perla y roja, ya que las plantas mostraron mayor altura y mayor tamaño de la hoja ($p < 0,05$). Las plantas bajo las mallas presentaron valores de tasa de asimilación de CO₂ y rendimientos más bajos que el testigo ($p < 0,05$). Adicionalmente, las mallas roja y perla

contribuyeron a mantener la misma calidad de producción en ambos periodos.

El uso de las mallas agrícolas azul, perla y roja presentaron distintos efectos en el crecimiento e intercambio gaseoso durante ambos periodos de radiación tanto en la espinaca como en el kale. Por lo que la implementación de esta herramienta dependerá de la estación climática del año, pronóstico del tiempo, tipo de cultivo y la necesidad lumínica para obtener el máximo provecho.

Ficha Bibliográfica

Gutiérrez Rojas, Tatiana. “Efecto de tres mallas agrícolas fotoselectivas sobre los cultivos de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) hidropónicos durante dos periodos con distinta radiación”. Tesis para optar al título profesional de Ingeniera Agrónoma con el grado de Licenciada en Agronomía, Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Director: Gustavo Quesada Roldán.

Palabras clave: Fotosíntesis, IAF, hortalizas, crecimiento, verdor SPAD.

Introducción

El calentamiento global causa retos en la agricultura debido al aumento en la temperatura del aire y la radiación solar (Ilić et al., 2018). Arora (2019) indica que para el año 2100 habrá una disminución en la producción de cereales (20 – 45% en maíz, 5 – 50% en trigo y 20 – 30% en arroz) si la situación actual de emisiones de gases de efecto invernadero y cambio climático continúan.

Se ha reportado que el calentamiento global influye en la incidencia de desórdenes abióticos en las plantas, daños celulares y en el desarrollo reproductivo (Ilić et al., 2018). De esta misma manera, la alta radiación solar también causa foto-inhibición del fotosistema II, la cual ocurre cuando la energía lumínica absorbida que llega a los centros de reacción excede la cantidad que puede ser utilizada (Casierra-Posada, 2007; Tyystjärvi, 2013).

Una alternativa para asumir los retos agrícolas antes mencionados es el uso de ambientes protegidos como invernaderos o semiprotegidos como las mallas agrícolas (Ilić et al., 2018). Estas modifican ciertas condiciones ambientales como la humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y radiación bajo las cuales se desarrolla el cultivo (Ilić et al., 2018).

De esta misma manera, tienen como objetivo controlar la intensidad y calidad de la radiación en el área que cubren (Caraballo, 2017; Nguyen et al., 2022). Además de presentar propiedades ópticas también funcionan como una barrera de protección física contra algunas aves, insectos y condiciones ambientales como fuertes vientos y lluvias; estas mismas pueden ser utilizadas tanto a campo abierto como en invernaderos (Godi et al., 2018; Shahak et al., 2004; Stamps, 2009).

Las mallas agrícolas reducen la energía calórica en exceso y adecúa la incidencia de radiación en el dosel, lo cual modifica características deseables en las plantas (Ilić et al., 2018). De esta misma manera es posible obtener hojas de mayor tamaño, lo que permite conseguir un índice de área foliar (IAF) superior en menos tiempo e interceptar un porcentaje considerable de radiación que incide sobre el cultivo y consecuentemente aumentar la productividad (Ilić et al., 2015).

Las mallas agrícolas disminuyen la transpiración del dosel y las necesidades hídricas, por lo que aumenta la eficiencia del uso del agua (Ayala-Tafoya et al., 2015a; Ilić et al., 2017a). Esto permite alcanzar altos rendimientos, amplios periodos post-cosecha, mejores calidades y niveles de sanidad en los productos, lo que garantiza el acceso a mejores mercados y mayor rentabilidad económica (Shahak et al., 2004; Ombódi et al. 2016).

Otra alternativa ante los desafíos actuales de la agricultura es la hidroponía, en este sistema el suelo es remplazado por una solución nutritiva, la cual está compuesta por agua con nutrientes esenciales disueltos en ella (López-Elías, 2018). Además, se evitan problemas de friabilidad, desbalances nutricionales, texturas pesadas que inhiben el crecimiento radical, insectos y patógenos del suelo y con ello el uso excesivo de agroquímicos (Sharma et al., 2018).

El sistema hidropónico permite elegir el sustrato adecuado para el cultivo y controlar los nutrientes, disponibilidad de agua y la aireación del sistema radical, lo cual garantiza productos de mayor calidad y sanidad basados en el uso eficiente de los recursos (Sharma et al., 2018). Asimismo, en este sistema se pueden manejar altas densidades de siembra, lo que aumenta el rendimiento por unidad de área cultivada (López-Elías, 2018; Sharma et al., 2018).

La hidroponía ha tomado fuerza a nivel nacional por ser practicada por pequeñas y medianas empresas familiares dedicadas a la producción de hortalizas (Soto-Bravo, 2015). Sin embargo, existe una falta de métodos de control de riego y nutrición de los cultivos, por lo que gran cantidad de productores realizan aplicaciones excesivas de nutrientes y liberan altos volúmenes de drenajes que pueden causar contaminación al medio ambiente (Soto-Bravo, 2015).

Uno de los factores que puede afectar la producción hidropónica es la cantidad de energía lumínica interceptada por el cultivo, la cual depende de la estructura del dosel (Lorenzo-Mínguez et al., 2010). Otros factores relacionados que influyen en la producción son el estado hídrico y nutricional de la planta ya que intervienen en la fotosíntesis (Lorenzo-Mínguez et al., 2010).

En algunos cultivos hidropónicos se puede presentar el síntoma de quema de puntas en las hojas que ocurre principalmente en la estación seca debido a un inadecuado transporte

En algunos cultivos hidropónicos se puede presentar el síntoma de quema de puntas en las hojas que ocurre principalmente en la estación seca debido a un inadecuado transporte de calcio, ya que la absorción y distribución de este elemento se ven afectadas incluso estando en niveles adecuados en la solución nutritiva (Lorenzo-Mínguez et al., 2010). Una alternativa para disminuir los síntomas es el uso de mallas agrícolas en épocas de altas temperaturas e intensidad lumínica y baja humedad relativa (Lorenzo-Mínguez et al., 2010).

La hidroponía y las mallas agrícolas son herramientas valiosas para mejorar el rendimiento de cultivos hortícolas como la espinaca y kale, ya que en Costa Rica la producción de estos cultivos es a pequeña escala, de manera rústica, en conjunto con otras hortalizas de hoja, sin tecnología asociada ni manejo especializado (G. Quesada, comunicación personal, 15 de enero de 2021). Además, destacar la importancia de estos cultivos debido a su alto valor nutricional (Hilaquita-Ticona, 2017a; Ribera et al., 2020).

Dada la poca información técnica en el país sobre el uso de mallas agrícolas y la producción de hortalizas de hoja hidropónicas, es necesario realizar investigación que permita generar conocimiento científico confiable y oportuno. Por lo tanto, esta investigación podría impulsar el uso de tecnologías que aporten a la producción comercial.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el efecto de tres mallas agrícolas fotoselectivas sobre los cultivos de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) en un sistema hidropónico durante dos periodos con distinta radiación.

Objetivos específicos

1. Comparar el efecto de las mallas agrícolas azul, perla y roja sobre el crecimiento, el intercambio gaseoso y el rendimiento de plantas de espinaca (*Spinacia oleracea* L.) durante períodos de mayor y menor radiación.
2. Comparar el efecto de las mallas agrícolas azul, perla y roja sobre el crecimiento, el intercambio gaseoso y el rendimiento en plantas de kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) durante períodos de mayor y menor radiación.

Marco Teórico

Aspectos generales de la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) y su producción

La espinaca es una de las hortalizas de hoja más consumidas mundialmente debido a su alto contenido nutricional (Ribera et al., 2020). Perteneció a la familia Amaranthaceae y se caracteriza por ser una planta con fases vegetativas y reproductivas diferenciadas, ya que primero presenta una forma de roseta y luego ocurre un alargamiento del tallo (Ribera et al., 2020). Este cultivo es originario de Irán donde posteriormente fue introducido a Europa y luego de un tiempo al continente americano (Jiménez et al., 2010).

Esta planta se destaca por ser rica en elementos minerales, vitaminas A, C, E y K, luteína, zeaxantina, ácido fólico, hierro, fósforo, potasio y compuestos fenólicos incluyendo flavonoides (Jiménez et al., 2010; Cecílio-Filho et al., 2017; Riaño-Castillo et al., 2019; Ribera et al., 2020). Se considera un cultivo benéfico para la salud del ser humano por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y antitumorales; sin embargo, se ha reportado la presencia de ácido oxálico y nitrato, los cuales causan efectos adversos en la salud de los seres humanos (Ribera et al., 2020).

Presenta una fase vegetativa de siete a nueve semanas, dependiendo de las condiciones climáticas y la variedad (Jiménez et al., 2010). Se puede cultivar en un rango de temperaturas de 5°C a 30 °C; sin embargo, presenta un mejor desarrollo de 14 a 18 °C. Además, requiere una humedad relativa entre 60 a 80% y un pH de 5,5 a 6,8 (Jiménez et al., 2010; Riaño-Castillo et al., 2019).

Actualmente China, Estados Unidos, Turquía y Japón son los mayores productores de espinaca con un rendimiento mundial de 30 millones de toneladas, siendo China el responsable del 91% de ese valor (Bhattarai & Shi, 2021). Por otro lado, la producción de semilla se centra en regiones con climas templados y días cortos durante la siembra y días largos y cálidos durante la fase reproductiva para inducir tallos florales (Bhattarai & Shi, 2021).

Aspectos generales del kale (*Brassica oleracea* var. *Sabellica* L.) y su producción

El kale también llamado col rizada es una hortaliza conocida por sus propiedades nutricionales (Cecílio-Filho et al., 2017). Este cultivo pertenece a la familia Brassicaceae y se distingue por ser una planta herbácea de crecimiento indeterminado (Cecílio-Filho et al., 2017; Hilaquita-Ticona, 2017a). La col rizada es originaria del norte de Alemania y se siembra principalmente en el norte y centro de Europa, norte América, Chile, Argentina y en la costa noroeste de Norteamérica y en algunas regiones de México (Neugart et al., 2016; Hilaquita-Ticona, 2017b; Bárcena et al., 2019).

Recientemente el kale se ha popularizado debido a estudios que identificaron una asociación positiva entre el consumo humano y la salud (Neugart et al., 2016). Muchos de los efectos benéficos se atribuyen a los metabolitos secundarios como los glucosinolatos y flavonoides presentes en los tejidos de las plantas (Neugart et al., 2016). Paralelamente, se ha reportado la presencia de minerales como calcio, hierro, vitamina A y C, niacina, además de proteínas, carbohidratos, fibras, carotenoides y polifenoles, los cuales son afectados por la radiación y la temperatura (Neugart et al., 2016; Cecílio-Filho et al., 2017; Bárcena et al., 2019).

Presenta una fase vegetativa entre 70 y 95 días después de la siembra, emitiendo hojas continuamente por largos periodos de tiempo hasta la floración (Cecílio-Filho et al., 2017, Hilaquita-Ticona, 2017a). Se adapta a climas con altas o bajas temperaturas (7-30 °C) y a un pH de 5,5 a 6,5 (Hilaquita-Ticona, 2017b; ZipGrow, 2020). Este cultivo se siembra principalmente en la estación de invierno, sin embargo, puede crecer todo el año en regiones tropicales (Bárcena et al., 2019).

En la actualidad se destacan los países de Estados Unidos (15 a 60 t ha⁻¹), México (17 a 42 t ha⁻¹) y Chile (13 a 21 t ha⁻¹) como los mayores productores de kale (Saavedra del Real, 2021). En el mercado las hojas que se comercializan deben ser firmes y verdes sin bordes marrones, lo que indica hojas frescas según los estándares de Estados Unidos (Mora-Bautista et al., 2021).

El adecuado crecimiento y producción de espinaca y kale requieren condiciones climáticas específicas de humedad relativa, temperatura del aire y radiación incidente, las cuales se pueden modificar mediante el uso de mallas agrícolas (Ayala-Tafoya et al., 2015a). Las mallas alteran la cantidad, calidad y dirección de la luz captadas por los fotorreceptores de las plantas que reaccionan a una longitud de onda en específico (Stamps, 2009). Asimismo, la radiación solar junto con otras señales ambientales permiten que las plantas se adapten al entorno (Stamps, 2009).

Mallas de sombra para uso agrícola

Las mallas agrícolas son tejidos fabricados con materiales poliméricos como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster o derivados acrílicos que incorporan varios aditivos cromáticos, lo que resulta en la dispersión y reflexión de la luz (Ayala-Tafoya et al., 2015a; Ilić et al., 2017a; ACE Geosynthetics, 2022). Están diseñadas para modificar la luz ultravioleta (UV), la luz visible y el espectro rojo lejano bajo su área de influencia. Asimismo, mejoran el contenido relativo de luz difusa con relación a la luz directa y la absorción de radiación infrarroja (Ilić et al., 2017a; ACE Geosynthetics, 2022). Son utilizadas en invernaderos o en protección de cultivos, ya que poseen una calidad específica para producir cultivos con alto valor comercial (Ilić et al., 2017a; ACE Geosynthetics, 2022).

Anteriormente la malla negra era la más utilizada en la agricultura y se conocía con el nombre de “malla caliente” debido a la condición propia del color de acumular y disgregar calor (Caraballo, 2017). Actualmente debido a las nuevas tecnologías se pueden realizar tratamientos más complejos a los hilos y producir mallas con distintos tipos de tejidos, coloraciones, porcentajes de sombreo y calidades (Caraballo, 2017).

En el mercado se encuentran tres tipos de mallas agrícolas: fotoselectivas, neutras y termorefllectoras (Caraballo, 2017). Se considera malla fotoselectiva la que modifica el espectro de luz transmitido en el ultravioleta, las regiones visibles y el rojo lejano, enriqueciendo el contenido relativo de luz difusa y afectando sus componentes térmicos (infrarrojo), en función de los aditivos cromáticos del plástico, elementos de dispersión y diseño del tejido (Ilić et al., 2017a; Ayala-Tafoya et al., 2018). Las mallas neutras reducen la cantidad de luz que pasan a través de ellas, tales como las de color blanco, negro y gris

(Ayala-Tafoya et al., 2015a; Ayala-Tafoya et al., 2018; Ilić et al., 2009).

Por último, las mallas termorefllectoras o termorreguladoras se caracterizan por modificar el espectro de luz de acuerdo con la densidad, la porosidad, la pigmentación y la textura del tejido (Rodríguez-Beraud & Morales-Ulloa, 2015). Están compuestas por filamentos aluminizados capaces de reflejar la radiación directa y consecuentemente provocan una disminución en la temperatura de hasta 4 °C en el área que cubren (Caraballo, 2017).

Con la alta variedad de mallas existentes en el mercado se deben considerar algunos factores al seleccionar una de ellas tales como el tipo de cultivo y el estado fenológico en el que se encuentra (vegetativo o reproductivo), la infraestructura, las condiciones climáticas de la zona, la estación del año y necesidades lumínicas del cultivo (Caraballo, 2017). Además, el grado de sombreado se debe elegir de acuerdo con el punto de saturación lumínica del cultivo de modo que reciba la radiación cercana a su punto de saturación (Ayala-Tafoya et al., 2015a).

Las mallas fotoselectivas absorben longitudes de onda UV, azul, verde, amarillo, rojo, rojo lejano o infrarrojo cercano y convierten la luz directa en luz difusa, por lo que aumenta de un 30% hasta un 50% (Stamps, 2009). Por su parte, independientemente del color reducen la radiación que llega a los cultivos; sin embargo, entre más alto el valor del factor de sombra, se bloquea mayor cantidad de radiación (Abbasnia-Zare et al., 2019; Stamps, 2009).

Las mallas proporcionan distintas combinaciones de iluminación natural junto a la radiación difusa la cual experimenta una modificación espectral y penetra mejor en el dosel (Stamps, 2009). Se utilizan principalmente para alterar las proporciones de luz roja y roja lejana detectadas por los fitocromos y la luz azul involucrada en las respuestas fototrópicas mediadas por las fototropinas; así como modificar la radiación disponible para activar los fotorreceptores azules/ultravioleta-A que influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Martínez-Gutiérrez et al., 2016; Stamps et al., 2008).

Se ha demostrado que la modificación de la radiación mediante las mallas estimula ciertas respuestas fisiológicas reguladas por la luz como la fotosíntesis y la fotomorfogénesis (Ayala-Tafoya et al., 2015a). Algunas características físicas y biológicas que se alteran en las plantas son el crecimiento del tallo, la expansión foliar, el desarrollo de cloroplastos y la

síntesis de clorofila y metabolitos secundarios, ya que responden a la incidencia de luz azul (400 a 500 nm), roja (600 a 700 nm) y roja lejana (700 a 800 nm), percibidas por fotorreceptores biológicos, principalmente fitocromos, criptocromos y fototropinas presentes en las plantas (Ayala-Tafoya et al., 2015a).

Los fitocromos son cromoproteínas solubles que responden la luz roja y roja lejana y reciben la primera señal bioquímica que induce una respuesta fisiológica; además están involucrados en el fotocontrol de la germinación de semillas, en el desarrollo, la reproducción, la arquitectura y la senescencia (Mazzella, 2001; Quail, 2010). Por otro lado, los criptocromos responden al espectro de luz azul y UV-A, de esta manera regulan algunas funciones como la inhibición del crecimiento del hipocótilo, el tiempo de floración, los ritmos circadianos, la apertura de los estomas y la curvatura fototrópica del hipocótilo (Mazzella, 2001).

Las fototropinas son moléculas de proteínas quinasa que se autofosforilan y se activan en respuesta a la luz azul y UV-A (Briggs & Christie, 2002). Además, estos fotorreceptores junto con los criptocromos y fitocromos estimulan cambios en las plantas como resultado de la luz que los rodea (Briggs & Christie, 2002). Las mallas filtran y absorben distintas longitudes de onda que causan cambios físicos y biológicos en las plantas.

Malla Azul

Está diseñada para absorber las longitudes de onda UV, rojo y rojo lejano, mientras que enriquece el azul (440-490 nm) transmitido (Santana et al., 2012; Ilić et al., 2017a), la cual es captada por las plantas mediante las fototropinas (pho1 y pho2) y criptocromos (Cry1 y Cry2) (Huché-Thélier et al., 2015). La malla azul disminuye la RFA, así como el peso fresco de las plantas (Stamps, 2009). Se ha demostrado una menor altura de la planta y longitud de entrenudos, mientras que estimula el crecimiento de brotes laterales en *Chrysanthemum*, tomate y lechuga (Oren-Shamir et al., 2001). Adicionalmente, induce hojas más verdes con menos estomas por área y flores más pequeñas (Oren-Shamir et al., 2001).

Malla perla

Modifica el espectro no visible, aumenta la luz difusa en comparación con las otras mallas y reduce la acumulación de calor (Shahak, 2003; Caraballo, 2017; Ilić et al., 2017a). El uso de la malla perla incrementa el peso fresco de las hojas y el rendimiento comercial de cultivos como la lechuga (Ilić et al., 2017b), además se observó efectos como menor susceptibilidad a infecciones fúngicas en el campo y mayor calidad de almacenamiento poscosecha (Ilić et al., 2017a). Asimismo, se demostró que bajo la malla perla el fruto de tomate mantiene la calidad y el sabor durante el almacenamiento en poscosecha (Ilić et al., 2015), mientras que en el chile dulce se aumenta el rendimiento, la calidad y el periodo poscosecha (Ilić et al., 2017a).

Malla roja

Absorbe las longitudes de onda UV, azul y verde, mientras enriquece el rojo (R, 600 – 700 nm) y rojo lejano (RL, 700 – 800 nm) y aumenta la radiación solar difusa, lo que beneficia el desarrollo de las plantas (Santana et al., 2012; Ilić et al., 2017a). En algunas plantas ornamentales el uso de la malla roja promueve mayor crecimiento vegetativo, longitud de tallos, ramas y entrenudos (Ovadia et al., 2009; Santana et al., 2012).

Por otra parte, Ovadia et al. (2009) mencionan que aumentos en la proporción R/RL producen enanismo en plantas de gardenia, *Chrysanthemum*, *Cosmos* y *Zinnia*, mientras que la disminución de R/RL causa un aumento en la altura de las plantas. Asimismo, Oren-Shamir et al. (2001) indican que ambos efectos están mediados por las giberelinas (AG), ya que la luz R inhibe la conversión de AG inactivo a la forma activa, mientras que la luz RL la promueve y está controlada por los fitocromos.

Las AG son fitohormonas de importancia en el desarrollo de las plantas (Pichardo-González et al., 2018). Cumplen funciones como: germinación de la semilla, floración, regulación de procesos metabólicos, elongación y expansión celular, entre otras más (Schwechheimer, 2012; Pichardo-González et al., 2018).

Uso de mallas en la agricultura y su efecto en el microclima

Las mallas fotoselectivas mejoran la calidad de la radiación solar al modificar los espectros y atenuar las condiciones climáticas extremas, lo que permite un desarrollo adecuado de los cultivos (Santana et al., 2012). De acuerdo con Ayala-Tafoya et al. (2015a) y Abbasnia-Zare et al. (2019) las mallas amarilla, verde, roja, azul, beige y negra disminuyen la RFA significativamente, según estudios realizados en México e Irán.

Las mallas agrícolas al sombrear el dosel del cultivo aumentan la humedad relativa (HR), reducen la temperatura del aire, la tasa de transpiración y el consumo del agua, lo que mejora el rendimiento de los cultivos hasta en un 40 % (Ayala-Tafoya et al., 2015a; Ilić et al., 2017a). El aumento en la HR es causado por la evapotranspiración de las plantas y la reducción en la velocidad del viento que generan las mallas (Martínez-Gutiérrez et al., 2016).

En una investigación realizada por Ayala-Tafoya et al. (2015a) en México se encontró disminuciones en la temperatura de 0,5°C a 0,9 °C bajo mallas verde, roja, beige, azul y negra; asimismo, la HR incrementó con el uso de las mallas relacionando el valor más bajo de HR con la hora (2 p.m.) de mayor incidencia de radiación y temperatura. Ilić et al. (2017a) también determinaron reducciones significativas en la temperatura de hasta 5 °C bajo mallas perla, roja, azul y negra en Serbia.

El uso de mallas reduce la velocidad del viento alterando la temperatura, la HR y concentraciones de gas resultantes de reducciones en la mezcla de aire; lo que afecta la transpiración, fotosíntesis, respiración y otros procesos. El movimiento del aire depende de la porosidad y la ubicación física de la malla en relación con las plantas (Stamps, 2009). Por lo tanto, el uso de mallas disminuye la incidencia de quemaduras por sol y el consumo del agua hasta un 50%, lo que incrementa la eficiencia en el uso del agua (Ombódi et al., 2016; Ilić et al., 2017a).

Estudios realizados con mallas fotoselectivas en hortalizas y ornamentales

Las mallas agrícolas con efecto de sombra o modificación del espectro luminoso se evaluaron inicialmente en plantas ornamentales bajo mallas de color negro, donde el efecto principal deseado era el de proveer sombra (Shahak et al., 2004).

Posteriormente se comenzó a innovar realizando distintas investigaciones sobre el efecto de mallas de colores, tales como rojo, amarillo, gris y azul en cultivos ornamentales. En estudios por Shahak et al. (2004) se reportó que bajo la malla roja se estimuló el crecimiento de *Pittosporum variegatum*, mientras que la malla azul causó el efecto contrario; además, la malla gris estimuló la producción de ramas cortas, pero en mayor cantidad y menor tamaño de las hojas.

El uso de mallas negra, beige, roja y verde incrementó la altura del cultivo de chile dulce, debido a una menor proporción de R/RL (Ayala-Tafoya et al., 2015a). Asimismo, Ilić et al. (2015) indican que bajo mallas azules las plantas disminuyeron su tamaño debido a una menor incidencia de luz roja lejana. De acuerdo con Godi et al. (2018) e Ilić et al. (2015) el uso de mallas roja y verde aumenta el tamaño de las hojas para expandir su área fotosintética bajo ambientes sombreados.

En una investigación realizada por Ilić et al. (2017a) se demostró que las plantas de chile dulce bajo las mallas roja, negra, perla y azul presentaron un incremento en el índice del área foliar (IAF) en contraste con el grupo control (túneles plásticos); asimismo, el mayor número de hojas se obtuvo bajo las mallas roja y perla. Según Abbasnia-Zare et al. (2019) las mallas roja y amarilla aumentaron el crecimiento vegetativo de *Calendula officinalis* L. y *Viola tricolor* L.

El uso de mallas amarilla, azul y negra aumentó el contenido de clorofila total en hojas de chile dulce, ya que plantas expuestas a la radiación solar directa presentaron una tasa de degradación de la clorofila mayor que la de síntesis, lo que causó una reducción de este compuesto (Ilić et al., 2017a; Abbasnia-Zare et al., 2019). Adicionalmente, las hojas en ambientes sombreados producen clorofila extra para capturar la radiación difusa y sintetizar los carbohidratos necesarios para su desarrollo (Ilić et al., 2015).

En distintos ensayos en pepino y albahaca se encontró que bajo las mallas roja, perla, azul y aluminizada aumentó la conductancia estomática, la tasa de asimilación de CO₂ y el peso seco de las hojas, debido a que las plantas responden a la intensidad y calidad de luz azul y roja (Martínez-Gutiérrez et al., 2016; Ayala-Tafoya et al., 2018). Asimismo, la luz azul influye en el desarrollo y apertura estomática, mientras que la luz roja es absorbida con mayor eficiencia por la clorofila y transferida a los centros de reacción para el proceso de la

fotosíntesis (Martínez-Gutiérrez et al., 2016; Ayala-Tafoya et al., 2018).

En cuanto al rendimiento del cultivo de lechuga, el uso de la malla perla registró el valor más alto debido a que las plantas presentaron mayor IAF, diámetro y peso fresco de la cabeza (Ilić et al., 2017b). Además, las plantas bajo las mallas azul y rojo presentaron un corto período de cosecha y hojas más verdes y suaves en comparación con las lechugas en campo abierto (Ilić et al., 2017b).

Se ha reportado que plantas de espinaca (var. Pusa Bharati) incrementaron su rendimiento hasta un 66% y 59% bajo las mallas verde y roja respectivamente, en comparación con el control (campo abierto), debido a que las plantas bajo las mallas obtuvieron un mayor IAF en comparación con el control (Meena et al., 2014).

En otras latitudes se han realizado estudios del efecto de las mallas blanca, negra, roja, verde, azul y gris sobre el microambiente, rendimiento y calidad poscosecha de la espinaca (Meena et al., 2014; Lara et al., 2021); en el cultivo de kale se ha investigado el uso de luces LED sobre el crecimiento y la calidad (Li et al., 2019; Meng et al., 2019). Sin embargo, en Costa Rica no se han realizado investigaciones similares, por lo que la determinación del crecimiento, el intercambio gaseoso y el rendimiento en ambos cultivos establecerá un precedente importante

Metodología

1. Localización

El estudio se realizó de marzo a octubre del 2021 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (EEAFBM), de la Universidad de Costa Rica (UCR), ubicada en Barrio San José, Alajuela, Costa Rica, a una altura de 840 msnm, latitud 10°00'396'' norte y longitud 84°15'970'' oeste (Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, 2021). Presenta una temperatura anual máxima promedio de 27,5 °C y mínima de 18,5 °C, la precipitación anual promedio es de 1940 mm, mayormente en los meses de mayo a noviembre (Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, 2021).

2. Descripción climática

Durante los dos ciclos de siembra de los cultivos se tomaron datos de precipitación (mm), velocidad del viento (m s^{-1}), dirección del viento (grados), radiación fotosintéticamente activa ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$), humedad relativa (%) y temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$) de la estación climatológica ubicada en la EEAFBM. Además, en cada tratamiento se colocaron sensores portátiles HOBO® y WatchDog® para el registro de la humedad relativa (%) y la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$).

Periodo de mayor radiación

Las evaluaciones durante el periodo de mayor radiación iniciaron el día 25 de marzo del 2021 al 14 de mayo del mismo año que corresponden desde la siembra hasta la cosecha. En ese período se presentaron las siguientes condiciones climáticas en cuanto a la precipitación (mm), temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) e integral de luz diaria, DLI por sus siglas en inglés ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

Se presentó la mayor intensidad de lluvias (40 – 70 mm) en el mes de abril (Figura 1). Asimismo, en el mes de mayo se presentaron lluvias más constantes, pero con menores intensidades (30 – 35 mm) (Figura 1). Durante este periodo se acumuló un total de 399,8 mm.

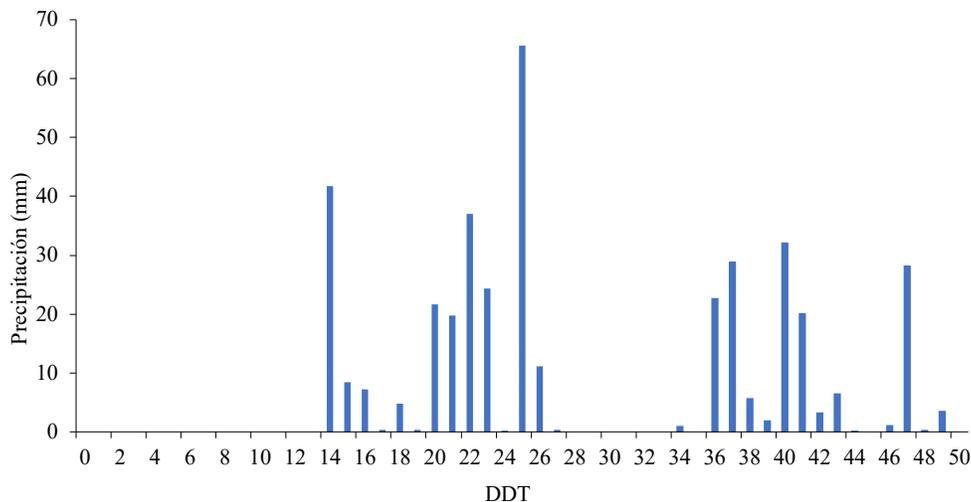


Figura 1. Precipitación total diaria durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

Durante este periodo la temperatura promedio del aire se mantuvo en un rango de 20,50 – 26,50 °C (Figura 2). Se muestran disminuciones a partir del 14 DDT que coinciden con las precipitaciones y la humedad relativa (Figura 2).

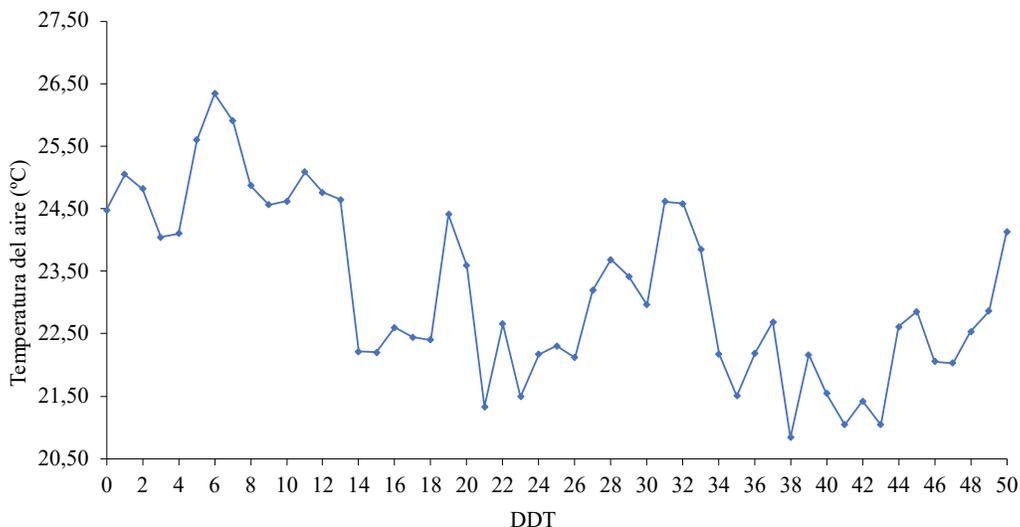


Figura 2. Temperatura diaria promedio durante el ciclo de siembra los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

En el mes de marzo se presentó una humedad relativa promedio baja (55-65%), sin embargo, a partir de los primeros días del mes de abril la humedad aumentó hasta 90% (Figura 3); relacionado con la temperatura y las precipitaciones incidentes en dicho mes.

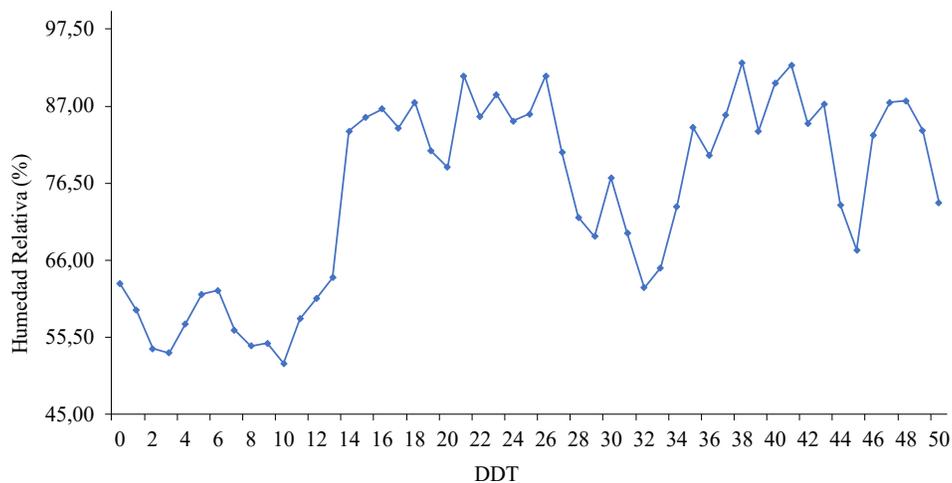


Figura 3. Humedad relativa diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

Considerando la integral de luz diaria (DLI) se presentó valores de hasta $60 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en el mes de marzo (Figura 4). En el mes de abril disminuyeron aproximadamente hasta $40 \text{ mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ debido a las precipitaciones (Figura 4).

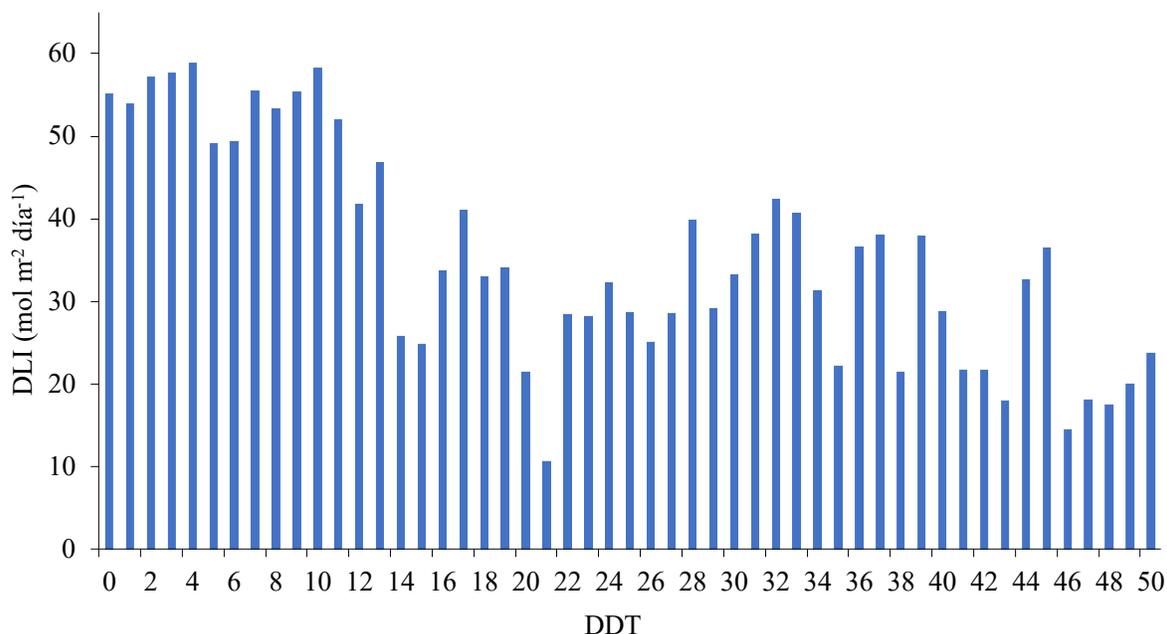


Figura 4. Integral de luz diaria total durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 25 de marzo al 14 de mayo del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

Periodo de menor radiación

Las evaluaciones en el periodo de menor radiación iniciaron el día 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021 que corresponden desde la siembra hasta la cosecha. En ese período se presentaron las siguientes condiciones climáticas en cuanto a la precipitación (mm), temperatura del aire (°C), humedad relativa (%) e integral de luz diaria, DLI por sus siglas en inglés ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$).

En cuanto a la precipitación durante el ciclo de espinaca y kale se presentaron lluvias constantes con fluctuaciones en la intensidad con máximas de 40 – 45 mm (Figura 5). Asimismo, durante este segundo ciclo de siembra se acumuló un total de 616,2 mm.

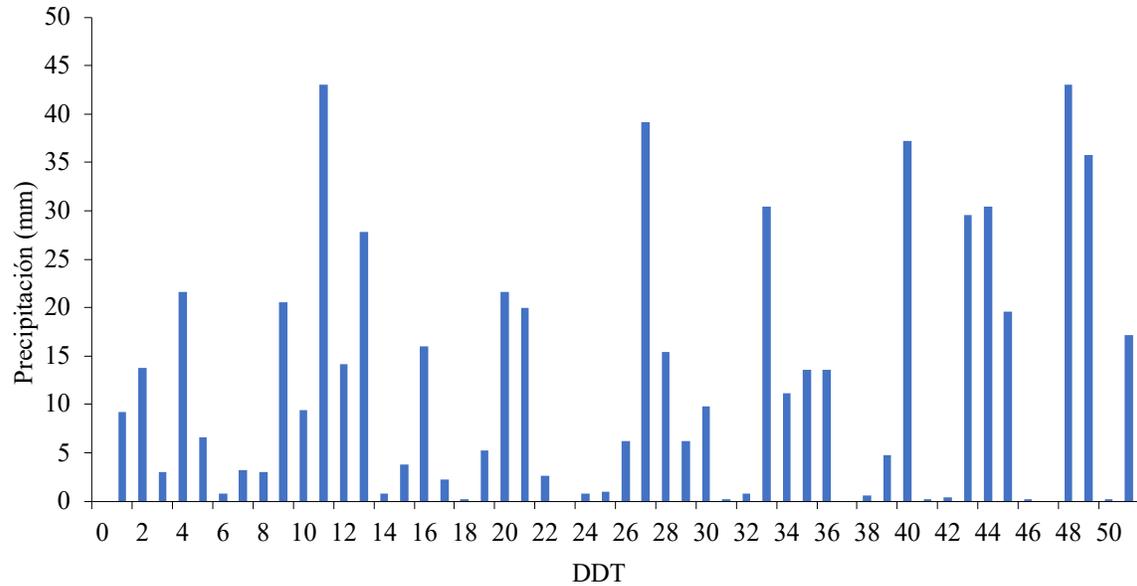


Figura 5. Precipitación total diaria durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

La temperatura promedio del aire se mantuvo entre los 20 – 23 °C (Figura 6), como consecuencia de las precipitaciones y humedad relativa.

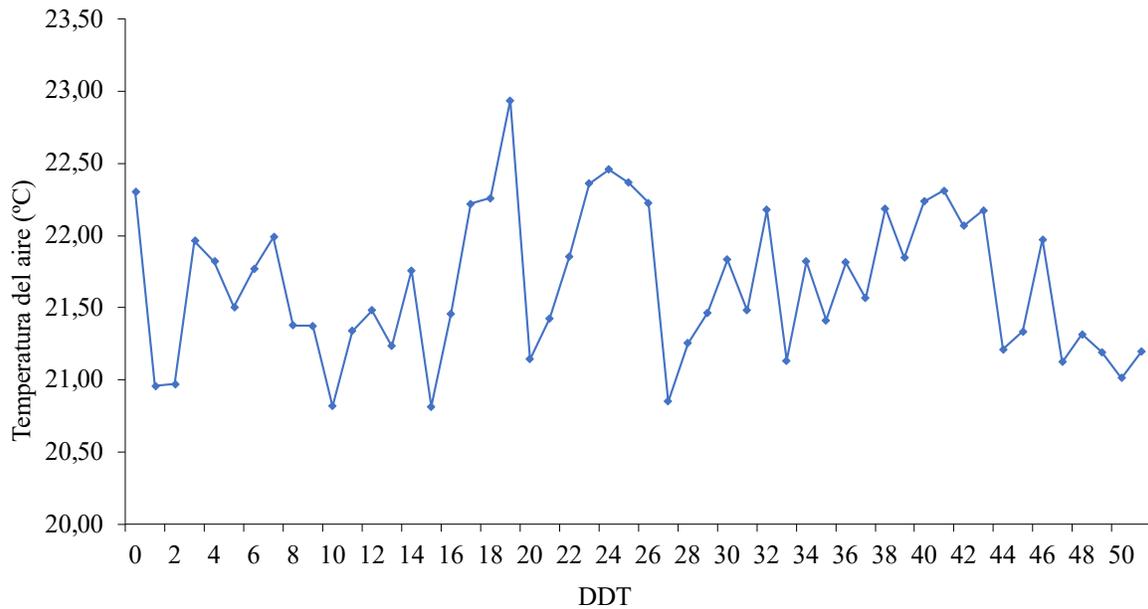


Figura 6. Temperatura diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

La humedad relativa promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos se mantuvo entre los 90 – 100 % debido a las precipitaciones constantes que se presentaron (Figura 7).

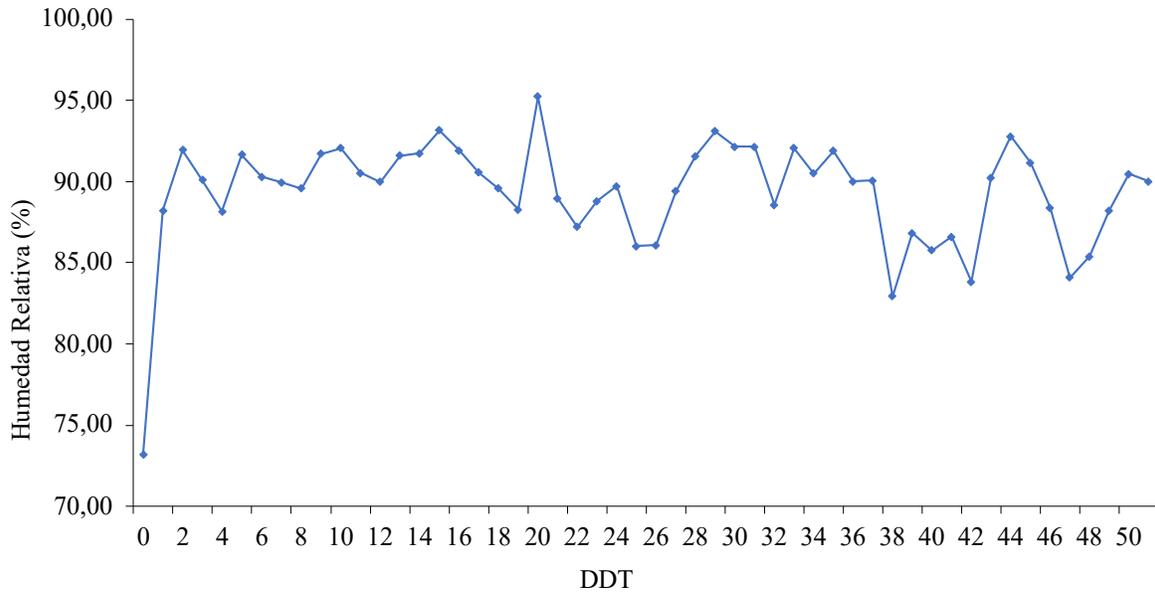


Figura 7. Humedad relativa diaria promedio durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

A los 14 y 47 DDT se presentaron los valores más bajos de DLI (11,47 y 9,03 mol m⁻² día⁻¹), mientras que a los 11 y 22 DDT se presentaron los valores más altos (30,01 y 34,73 mol m⁻² día⁻¹), lo que coincide con la cantidad de precipitación (Figura 8).

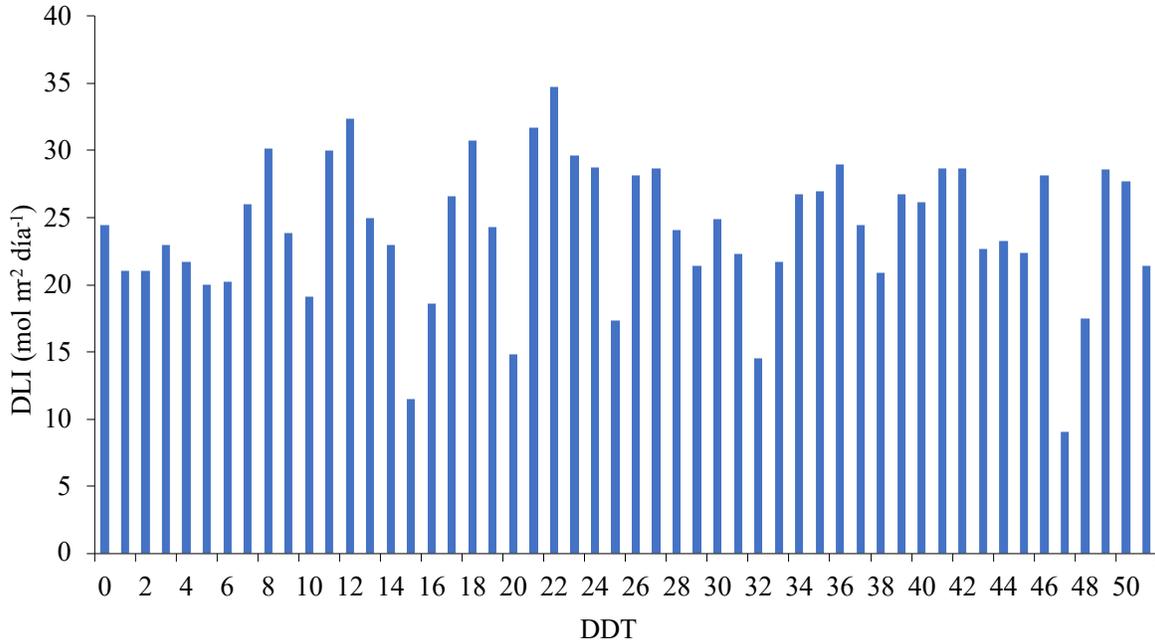


Figura 8. Integral de luz diaria total durante el ciclo de siembra de los cultivos de espinaca y kale en el transcurso del 10 de agosto al 30 de setiembre del 2021, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

3. Material experimental

Se utilizó espinaca (*S. oleracea* L.) variedad Space F1 (Bejo Zaden B.V.), la cual se distingue de otras variedades por ser tipo lisa (Figura 9A) y kale o col rizada (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) variedad Darkibor F1 (Bejo Zaden B.V.), la cual se caracteriza por ser tipo crespo (Figura 9B). En ambos cultivos, la siembra se realizó por trasplante utilizando plántulas de almácigos con 3 – 4 hojas verdaderas y con 35 días después de siembra (DDS).



Figura 9. Plantas de espinaca var. Space F1 bajo la malla perla (A) y kale var. Darkibor F1 sin malla (B) a los 48 DDT en sistema hidropónico durante el periodo de menor radiación, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

4. Sistema de siembra y manejo de los cultivos

Se realizaron dos ciclos de siembra para ambos cultivos. El primero se llevó a cabo en los meses de marzo a mayo (periodo de mayor radiación) y el segundo en los meses de agosto a octubre (periodo de menor radiación) del año 2021, considerando la marcada diferenciación histórica de la radiación en la EEAFBM (Gutiérrez et al., 1997).

El sistema de siembra consistió de cuatro módulos hidropónicos de 10 m² cada uno para un área total de 40 m². Los módulos estaban conformados por un armazón y arcos metálicos con tablas de madera en los laterales y plástico negro como impermeabilizador, de sustrato se utilizó piedra quinta previamente desinfectada con TCMTB. Cada módulo estaba construido con las siguientes dimensiones: 10 m de largo, 0,10 m de profundidad del contenedor y 1 m de ancho, 0,80 m de altura y 1,40 m de ancho de la parte superior de los arcos metálicos para la colocación de las mallas. Además, drenajes laterales a 0,02 m desde la parte inferior del contenedor (Figura 10).

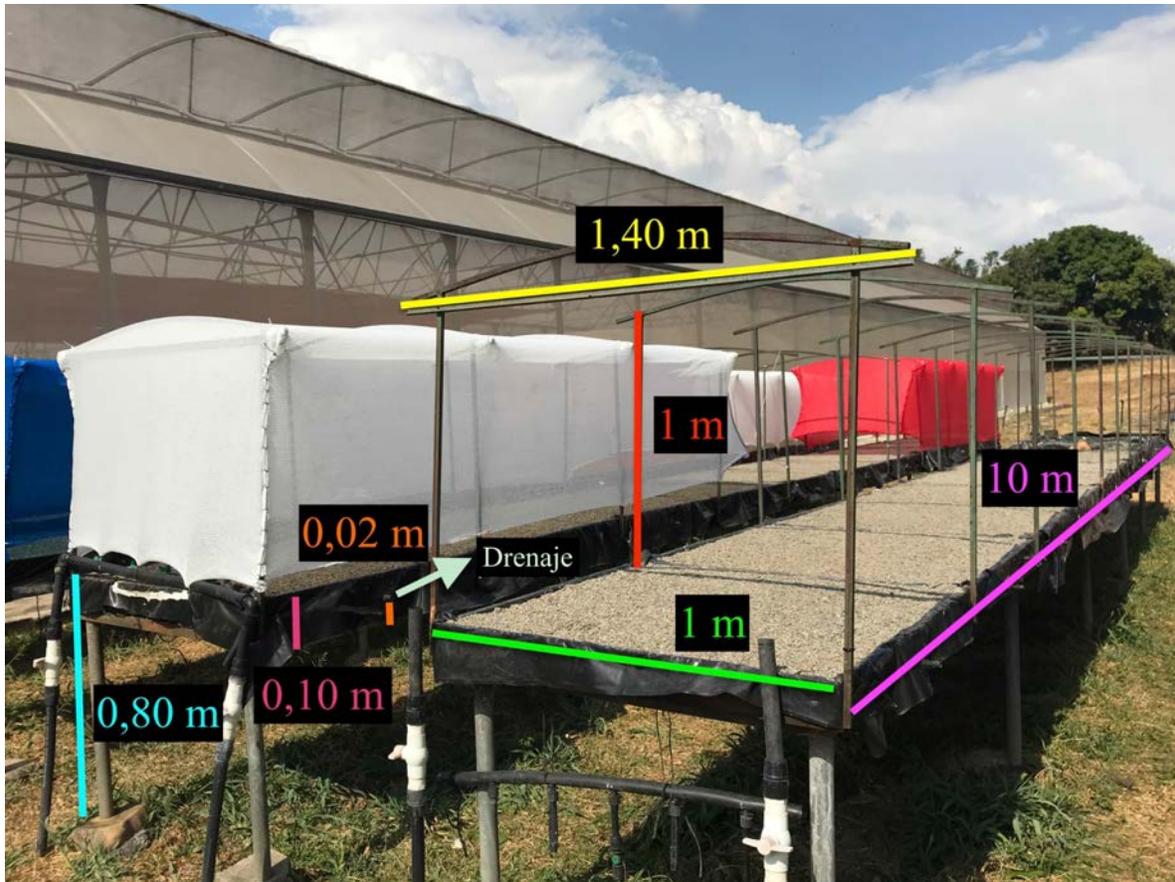


Figura 10. Módulos hidropónicos con dimensiones de 10 m de largo, 0,10 m de profundidad y de 1 m de ancho en la parte central, 0,80 m de altura y 1,40 m de ancho de la parte superior de los arcos metálicos para la colocación de las mallas azul, perla y roja en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

El sistema de riego consistió en una bomba de 1 HP de potencia y una cinta de riego Streamline (Netafim™) con goteros insertados de 1,6 L/h y espaciamiento de 20 cm. Se trabajó con una solución nutritiva estándar para cultivos de hortaliza de hoja desrollada en la EEAFBM (Cuadro 1). Se utilizó un tanque de 1100 L marca Rotoplas® para la preparación de la solución diluida y 3 estañones plásticos de 200 L para cada solución madre (A, B y C) (Cuadro 1). De esta misma manera, se añadió 25 mL de cada solución madre por un litro de agua para un factor de dilución de 1:40.

La presión del sistema de riego se manejó de acuerdo con las indicaciones del fabricante en 14,5 psi, donde se obtiene la descarga total de la cinta. La distancia de siembra

de ambos cultivos fue de 25 cm entre hileras y entre plantas, para una densidad de 16 plantas/m².

Cuadro 1. Solución nutritiva estándar para hortalizas de hoja desarrollada en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

Solución	Fuente	ppm
A	Ácido nítrico	0,02
	Fosfato monopotásico	173,50
	Nitrato de potasio	270,00
	Sulfato de potasio	163,00
	Sulfato de magnesio	375,00
B	Multimicronutrientes (B, Mn, Zn, Fe, Cu, Mo)	27,27
	Ácido bórico	13,64
C	Ácido nítrico	0,02
	Nitrato de calcio	600,00

Fuente: Adaptado de “Hidroponía familiar en sustrato: hágalo fácil (Manual práctico)” por F. Soto-Bravo, 2015, Universidad de Costa Rica, & Ministerio de Agricultura y Ganadería.

Se utilizaron mallas de color rojo, azul y perla, tejidas de monofilamento de polietileno (Ginegar[®]), con porcentaje de sombra de 50 %. Las mallas se colocaron a una altura de un metro de distancia del sustrato y se usaron permanentemente desde la siembra hasta la cosecha de los cultivos (Figura 10). En el periodo de menor radiación, se colocó un techo plástico por encima de las mallas y en el testigo, para evitar el lavado de nutrientes por las precipitaciones y la incidencia de enfermedades. El manejo agronómico fue homogéneo para todos los tratamientos, por lo tanto, se aplicó el mismo volumen de riego, solución nutritiva, monitoreo, prevención y combate de plagas y enfermedades.

Se determinó la RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) transmitida por cada una de las mallas y en plena exposición solar (Cuadro 2), utilizando un ceptómetro LP-80 (ACCUPAR®). Luego, con la información obtenida anteriormente se determinaron los porcentajes de sombra generados por las mallas azul, rojo y perla, los cuales fueron 74,19%, 69,24 % y 56,10 %, respectivamente en relación con la luz natural; estos mismos difieren del valor teórico del fabricante antes mencionado.

Cuadro 2. Valores máximos y mínimos de radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo las mallas agrícolas y exposición solar directa (testigo) durante los periodos de mayor y menor radiación.

Color de malla	Periodo de mayor radiación		Periodo de menor radiación	
	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
Azul	694	295	451	342
Perla	1004	452	603	588
Rojo	765	606	501	417
Testigo	2205	1124	1278	1023

A continuación se detallan los valores máximos y mínimos de la RFA bajo longitudes de onda rojo y rojo lejano transmitidos por las mallas azul, perla, roja y el testigo, así como el cociente entre ambos (Cuadro 3 y 4). Estos mismos parámetros se determinaron en los periodos de mayor y menor radiación con un sensor LI-1400 (LI-COR®).

Cuadro 3. Valores máximos y mínimos de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo longitudes de onda rojo (R) y rojo lejano (RL) transmitidos por las mallas azul, perla, roja y el testigo, así como el cociente entre ambos (R:RL) durante el periodo de mayor radiación.

Color de malla	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)					
	Máxima R	Mínima R	Máxima RL	Mínima RL	Máxima R:RL	Mínima R:RL
Azul	51,20	11,59	45,46	10,22	1,13	1,06
Perla	101,90	37,30	98,75	34,45	1,04	1,02
Rojo	122,00	43,75	115,70	41,53	1,07	1,04
Testigo	173,00	63,45	149,70	56,11	1,14	1,13

Cuadro 4. Valores máximos y mínimos de la radiación fotosintéticamente activa (RFA) bajo longitudes de onda rojo (R) y rojo lejano (RL) transmitidos por las mallas azul, perla, roja y el testigo, así como el cociente entre ambos (R:RL) durante el periodo de menor radiación.

Color de malla	RFA ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)					
	Máxima R	Mínima R	Máxima RL	Mínima RL	Máxima R:RL	Mínima R:RL
Azul	44,78	23,50	42,01	17,03	1,16	1,02
Perla	78,40	59,77	76,23	59,20	1,06	1,02
Rojo	107,50	86,72	100,90	86,76	1,07	1,05
Testigo	156,90	116,60	138,50	91,03	1,14	1,11

Con un espectroradiómetro FieldSpec 4 (ASD®) se midió la absorbancia de la radiación (nm) para cada tratamiento y el testigo (Figura 11), durante horas de la mañana en un día despejado. La mayor absorbancia bajo la malla azul ocurre entre longitudes de onda de 400 a 550 nm, bajo la malla roja entre 600 y 750 nm y la perla altera longitudes de onda menores a 400 nm (Figura 11).

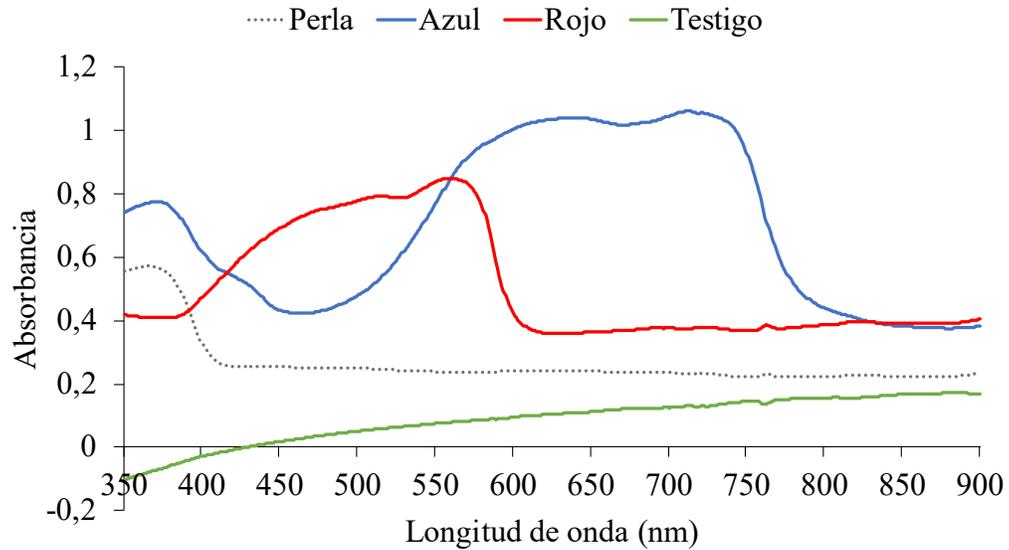


Figura 11. Absorbancia obtenida bajo las mallas azul, roja, perla y testigo en julio del 2021 en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

5. Diseño experimental y descripción de tratamientos

Se utilizó un diseño experimental irrestricto al azar (Figura 12). El área de cada unidad experimental (UE) fue de 1 m², donde se usaron las seis plantas centrales para evaluar las variables de respuesta a los tratamientos y las plantas exteriores se utilizaron para eliminar el efecto borde. Se establecieron tres tratamientos con mallas de colores azul, rojo y perla para cada cultivo, cabe destacar que se trató de cubrir la totalidad del módulo hidropónico y establecer zonas de traslape entre mallas para reducir el error experimental. Se definieron tres repeticiones por cada tratamiento.

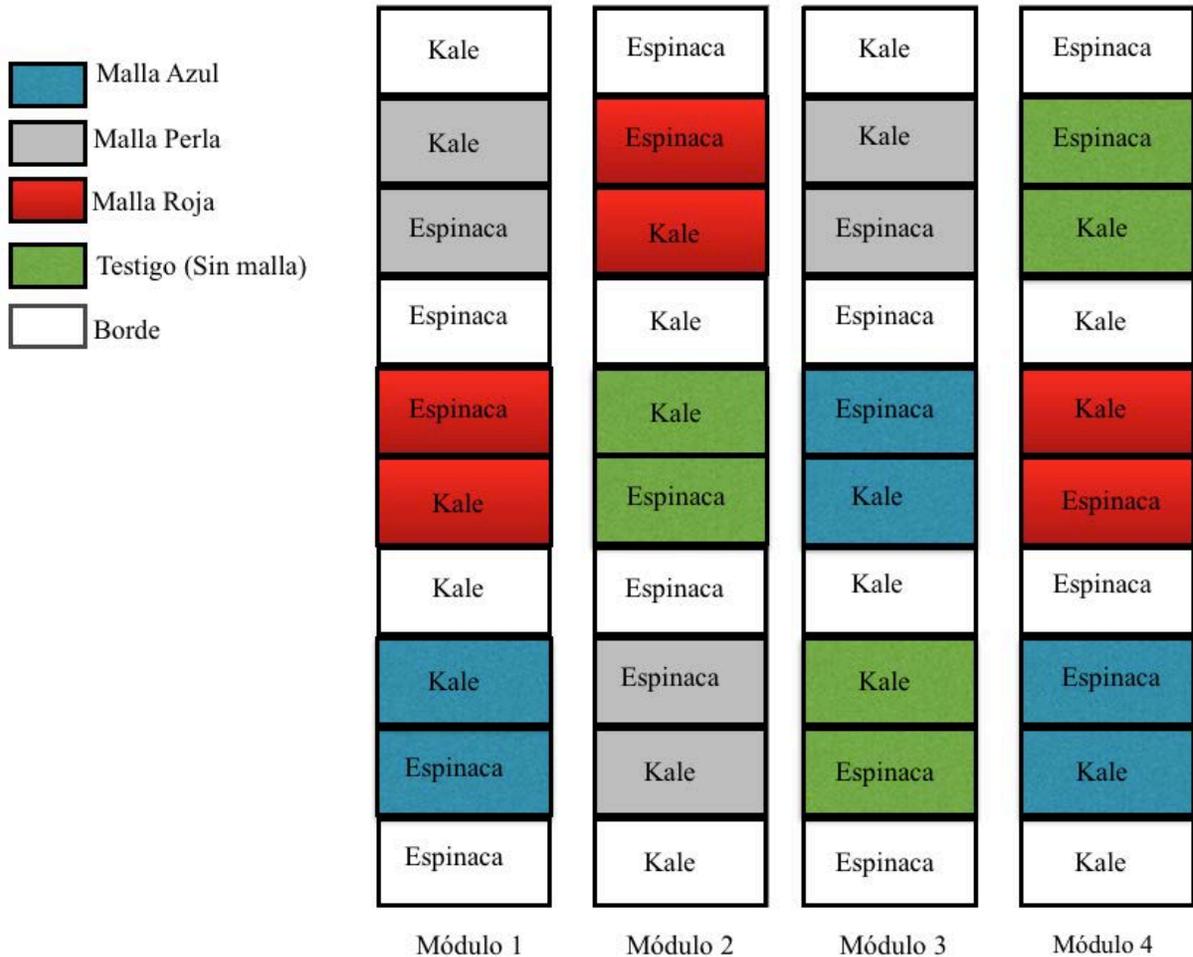


Figura 12. Distribución de los cultivos y las mallas azul, perla y roja con 50% de sombra en los módulos hidropónicos durante los periodos de mayor y menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

5.1 Variables de respuesta

5.1.1 *Altura de la planta y diámetro del tallo*

La altura (cm) de la planta en el cultivo de kale se midió desde la base del tallo hasta la yema apical y en espinaca desde la base del tallo hasta el ápice de la hoja más larga. Para ambas mediciones se utilizó una regla metálica gravada en centímetros.

El diámetro del tallo (mm) se midió en la base del mismo en ambos cultivos con un calibrador digital Sylvac (Fowler®).

5.1.2 Número de hojas totales y largo y ancho de la hoja

Para obtener el número de hojas total en ambos cultivos, se realizó un conteo de todas las hojas totalmente desarrolladas y expandidas. Asimismo, se tomó entre la tercera y cuarta hoja para medir con una regla gravada en centímetros el largo y ancho (cm) de la parte central de la lámina foliar, de manera vertical y horizontal, respectivamente.

5.1.3 Índice de área foliar (IAF)

Las mediciones de IAF se realizaron a plena exposición solar (8:00 – 10:00 a.m.) en la unidad experimental de cada tratamiento a los 47 días después de trasplante (DDT) en el periodo de mayor radiación y a los 37 DDT en el de menor radiación en espinaca. En el cultivo de kale estas mediciones se realizaron a los 47 DDT en el periodo de mayor radiación y a los 41 DDT en el de menor radiación. Para ello, se utilizó un ceptómetro LP-80 (ACCUPAR®). Se estableció una altura estándar de 60 cm para la colocación del sensor superior del dosel y el sensor inferior se colocó a nivel del sustrato en el módulo hidropónico.

5.1.4 Tasa de asimilación de dióxido de carbono (CO_2) y conductancia estomática (g_s)

Para determinar la tasa neta de asimilación de CO_2 (A_n , $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), la conductancia estomática (g_s , $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y la eficiencia intrínseca en el uso del agua (EUA, A_n/g_s ($\mu\text{mol } CO_2/\text{mol } H_2O$)) en ambos cultivos, se utilizó un equipo de fotosíntesis portátil LI-6400XT (LI-COR®). Las medidas se tomaron a los 32 y 47 DDT en el periodo de mayor radiación y a los 27 y 49 DDT en el de menor radiación. Se utilizaron las hojas superiores del dosel completamente expandidas y en momentos de plena exposición solar (8:00 – 10:00 a.m.).

5.1.5 Color de las hojas según SPAD

Se determinó en ambos cultivos con un medidor de verdor SPAD-502 Plus (Konica Minolta®) a los 47 DDT en el periodo de mayor radiación y a los 37 DDT en el de menor

radiación en espinaca. Para el cultivo de kale estas mediciones se realizaron a los 47 DDT en el periodo de mayor radiación y a los 44 DDT en el de menor radiación. Se utilizaron hojas totalmente expandidas y en la parte superior del dosel, entre la tercera y cuarta hoja.

5.1.6 Rendimiento y calidad comercial

En la cosecha de cada cultivo se determinó el peso fresco (g m^{-2}), luego se colocaron las plantas en una estufa a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante siete días, para así garantizar una temperatura constante. Transcurrido ese tiempo, se pesaron las plantas para obtener el peso seco (g m^{-2}). En ambas mediciones se utilizó una balanza digital.

Para evaluar la calidad de ambos cultivos se clasificaron en tres categorías de calidad según el peso fresco por área: primera $>1500\text{ g/m}^2$, segunda $>500 - 1500\text{ g/m}^2$ y tercera de $0 - 500\text{ g/m}^2$.

Los rangos de calidades se construyeron según el rendimiento reportado por la casa comercial para cada variedad, siendo $1500 - 2000\text{ g/m}^2$ para espinaca Space F1 (Bejo Zaden B.V., 2022) y $1500 - 2400\text{ g/m}^2$ para kale Darkibor F1 (Bejo Zaden B.V., 2022).

6. Análisis de los datos

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad con el programa JMP PRO[®] 15 (SAS Institute Inc., 2018). Cuando se cumplieron dichos supuestos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) y si se presentaron efectos estadísticamente significativos ($p < 0,05$) se realizó la comparación múltiple de medias mediante la prueba Tukey ($p < 0,05$). Se utilizó el programa InfoStat[®] para la categorización de los datos de calidad de la espinaca y el kale. Además, los cultivos al no tener relación entre sí se consideraron como independientes y por lo tanto, los resultados de cada cultivo se analizaron individualmente.

A continuación se muestra el modelo estadístico del ANDEVA para el diseño irrestricto aleatorizado:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde:

- Y_{ij} : Variable respuesta de la ij -ésima unidad experimental.
- μ : Efecto de la media general.
- t_i : Efecto del i -ésimo tratamiento.
- ε_{ij} : Efecto del error experimental asociado a la i -ésima unidad experimental.

Resultados

Cultivo de espinaca

Crecimiento de las plantas durante el periodo de mayor radiación

El mayor crecimiento del cultivo de espinaca a los 27 días después de trasplante (DDT) en términos de altura de la planta, diámetro del tallo y ancho y largo de la hoja se obtuvo bajo la malla azul ($p < 0,05$), con diferencias de 6,71 cm, 4,16 mm, 1,60 cm y 2,00 cm, respectivamente en comparación con el testigo. Las mallas azul y perla presentaron más cantidad de hojas (2,29 – 2,33) en contraste con la malla roja (Cuadro 5).

A los 42 DDT no se logró determinar el efecto de las mallas debido a la pérdida del testigo por un estrés postrasplante en plántulas de espinaca. Sin embargo, al comparar las variables entre las mallas se observaron diferencias significativas únicamente en la altura de la planta y ancho de la hoja ($p < 0,05$). Bajo la malla azul se obtuvo el mayor valor promedio de altura con diferencias de 2,88 – 3,71 cm, en comparación con las mallas roja y perla. Con el uso de la malla azul se aumentó el ancho de la hoja en contraste a la malla perla con una diferencia de 1,39 cm (Cuadro 5).

Cuadro 5. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.

DDT	Color de malla	Variables de crecimiento				
		Altura de la planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm) ²	Largo de la hoja (cm) ²
27	Azul	15,19 a	10,92 a	13,48 a	4,17 a	6,75 a
	Perla	10,83 b	9,59 a	13,52 a	3,44 b	5,60 b
	Rojo	10,35 b	10,21 a	11,19 b	3,30 b	5,40 b
	Testigo	8,48 b	6,76 b	10,83 ab	2,57 b	4,75 b
42	Azul	18,21 a	19,49 a	17,78 a	6,03 a	9,13 a
	Perla	15,33 b	16,70 a	16,14 a	4,64 b	8,05 a
	Rojo	14,50 b	19,27 a	16,40 a	5,45 ab	7,63 a
	Testigo ¹	----	----	----	----	----

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Datos no disponibles. ² Tercera y cuarta hoja totalmente expandida.

Crecimiento de las plantas durante el periodo de menor radiación

Se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) a los 28 DDT en todas las variables, excepto en el número de hojas ($p > 0,05$) (Cuadro 6). El uso de la malla roja favoreció el crecimiento de la altura de las plantas de espinaca con una diferencia de 2,19 cm en comparación con el testigo. Por otro lado, bajo las mallas azul y perla disminuyó el diámetro del tallo (2,67 y 1,93 mm) y el ancho de la hoja (1,51 y 1,23 cm) respecto con el testigo. Bajo la malla roja aumentó 1,56 cm el largo de la hoja en contraste con la malla azul (Cuadro 6).

A los 42 DDT las plantas bajo las mallas incrementaron su altura (6,1 – 8,5 cm) y largo de la hoja (2,31 – 3,31 cm) significativamente ($p < 0,05$) en comparación con el testigo. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el diámetro del tallo, número de hojas y ancho de la hoja entre los tratamientos y el testigo (Cuadro 6).

Cuadro 6. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 28 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.

DDT	Color de malla	Variables de crecimiento				
		Altura de la planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm) ¹	Largo de la hoja (cm) ¹
28	Azul	16,38 ab	8,82 b	10,28 a	5,21 b	8,36 b
	Perla	15,20 b	9,56 b	10,22 a	5,49 b	8,95 ab
	Rojo	17,39 a	9,99 a	10,94 a	6,12 ab	9,92 a
	Testigo	15,09 b	11,49 a	10,75 a	6,72 a	9,53 ab
42	Azul	25,22 a	14,15 a	13,50 a	8,31 a	13,00 a
	Perla	22,97 a	13,93 a	14,28 a	8,46 a	12,00 a
	Rojo	22,82 a	14,43 a	15,50 a	8,82 a	12,01 a
	Testigo	16,72 b	14,83 a	15,00 a	7,94 a	9,69 b

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Tercera y cuarta hoja totalmente expandida.

Índice de área foliar (IAF)

No se logró comprobar el efecto de las mallas sobre el IAF durante el periodo de mayor radiación (47 DDT) debido a la pérdida del testigo, además, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). En el periodo de menor radiación (37 DDT) las mallas tampoco influyeron en el IAF, sin embargo, el uso de la malla roja aumentó 0,60 el valor del IAF en contraste con la malla azul (Cuadro 7).

Cuadro 7. Promedios del índice de área foliar (IAF) en el cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Índice de área foliar (IAF)
Mayor radiación (47 DDT)	Azul	1,01 a
	Perla	0,63 a
	Rojo	1,16 a
	Testigo ¹	----
Menor radiación (37 DDT)	Azul	0,78 b
	Perla	1,02 ab
	Rojo	1,38 a
	Testigo	1,24 ab

Distintas letras dentro de una misma columna y periodo de radiación indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Datos no disponibles.

Intercambio gaseoso durante el periodo de mayor radiación

El efecto de las mallas sobre las variables no se logró comprobar debido a la pérdida del testigo. Al comparar los tratamientos a los 32 DDT no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en las variables A_n , g_s y EUA (Cuadro 8).

A los 47 DDT las plantas bajo las mallas perla y roja aumentaron la A_n en 3,81 y 2,67 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respectivamente en contraste con la malla azul. Con el uso de la malla perla la g_s aumentó 0,44 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en comparación con la malla azul. La EUA no presentó diferencias significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) a los 32 y 47 días después de trasplante (DDT), según los distintos colores de mallas utilizadas, durante el periodo de mayor radiación.

DDT	DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$)	Color de malla	Intercambio gaseoso		
			A_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EUA ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)
32	42,47	Azul	12,25 a	0,40 a	34,54 a
		Perla	14,77 a	0,39 a	43,52 a
		Rojo	16,51 a	0,43 a	40,13 a
		Testigo ¹	----	----	----
47	18,15	Azul	3,57 b	0,32 b	11,66 a
		Perla	7,38 a	0,76 a	12,39 a
		Rojo	6,21 a	0,47 ab	15,42 a
		Testigo ¹	----	----	----

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Datos no disponibles.

Intercambio gaseoso durante el periodo de menor radiación

A los 27 DDT las plantas bajo la malla azul presentaron una disminución en la A_n de $8,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respecto con el testigo. En cuanto a la g_s no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$). El uso de la malla azul disminuyó $32,09 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ la EUA en contraste con el testigo (Cuadro 9).

Se presentó una disminución a los 49 DDT en la A_n de $5,24$ y $4,24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bajo las mallas azul y perla, respectivamente en comparación con el testigo. En la g_s y EUA no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo ($p > 0,05$) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) a los 27 y 49 días después de trasplante (DDT), según los distintos colores de mallas utilizadas, durante el periodo de menor radiación.

DDT	DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	Color de malla	Intercambio gaseoso		
			A_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	EUA ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)
27	28,67	Azul	13,26 c	0,65 a	21,20 b
		Perla	16,94 bc	0,62 a	28,48 ab
		Rojo	20,34 ab	0,65 a	33,08 ab
		Testigo	21,97 a	0,73 a	53,29 a
49	28,58	Azul	7,87 b	0,07 a	120,90 a
		Perla	8,87 b	0,07 a	133,05 a
		Rojo	10,64 ab	0,08 a	141,09 a
		Testigo	13,11 a	0,08 a	168,45 a

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Color de las hojas según SPAD

El efecto de las mallas sobre el color de las hojas según SPAD no se pudo determinar en el periodo de mayor radiación (47 DDT) debido a la pérdida del testigo. Sin embargo, el uso de la malla roja incrementó 11,43 y 9,33 el valor SPAD de las hojas en contraste con las mallas azul y perla, respectivamente. El uso de las mallas a los 37 DDT durante el periodo de menor radiación disminuyó el valor SPAD de las hojas entre 3,48 y 8,32 (Cuadro 10).

Cuadro 10. Promedios del color de las hojas según SPAD en el cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) según las distintas mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Color de las hojas según SPAD
Mayor radiación (47 DDT)	Azul	50,39 b
	Perla	52,49 b
	Rojo	61,82 a
	Testigo ¹	----
Menor radiación (37 DDT)	Azul	47,68 c
	Perla	51,53 b
	Rojo	52,52 b
	Testigo	56,00 a

Distintas letras dentro de una misma columna y periodo de radiación indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Datos no disponibles.

Rendimiento y calidad comercial

En el periodo de mayor radiación no se logró comprobar el efecto de las mallas debido a la pérdida del testigo. Sin embargo, al comparar los tratamientos no se encontraron diferencias significativas en el peso aéreo fresco y seco de la espinaca ($p > 0,05$) (Cuadro 11).

Por otra parte, en el periodo de menor radiación tampoco se presentaron diferencias significativas ($p > 0,05$) en el peso fresco aéreo, sin embargo, las plantas de espinaca bajo la malla roja y el testigo acumularon mayor cantidad de biomasa en tallos y hojas con diferencias de 48,45 y 73,76 g/m², respectivamente en contraste con la malla azul (Cuadro 11).

Cuadro 11. Promedios del rendimiento final obtenido en el cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 50 días después de trasplante, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Rendimiento final	
		Peso fresco aéreo (g/m ²)	Peso seco aéreo (g/m ²)
Mayor radiación	Azul	490,67 a	39,99 a
	Perla	494,22 a	47,63 a
	Rojo	412,00 a	46,88 a
	Testigo ¹	----	----
Menor radiación	Azul	1194,67 a	78,67 c
	Perla	1232,00 a	100,21 bc
	Rojo	1644,44 a	127,12 ab
	Testigo	1498,00 a	152,43 a

Distintas letras dentro de una misma columna y periodo de radiación indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Datos no disponibles.

En el periodo de mayor radiación no se logró determinar el efecto de las mallas sobre la calidad del cultivo. Además, en el análisis de varianza (ANOVA) no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) para cada categoría bajo los distintos tratamientos en los periodos de mayor y menor radiación (Anexo 4). Sin embargo, cabe resaltar que durante el periodo de mayor radiación no se encontraron plantas de primera calidad, mientras que en el periodo de menor radiación se observa una tendencia de mayor cantidad de plantas de primera bajo la malla roja en contraste con el testigo (Figura 13).

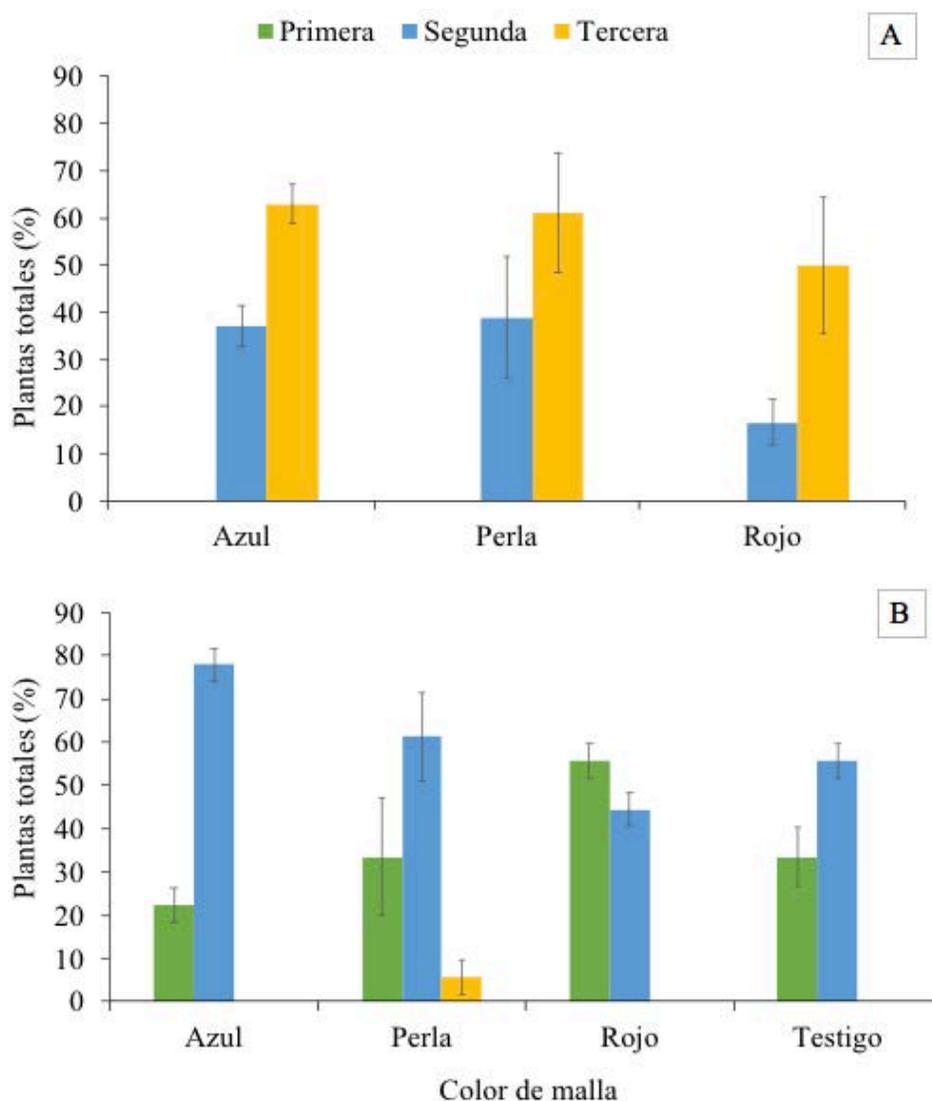


Figura 13. Promedios del porcentaje de la cantidad de plantas de espinaca (*S. oleracea* L.) para cada categoría comercial bajo las mallas, en los periodos de mayor (A) y menor (B) radiación. Las líneas verticales representan el error estándar (n=6).

Cultivo de kale

Crecimiento de las plantas durante el periodo de mayor radiación

A los 27 DDT únicamente se encontraron diferencias significativas en la altura de la planta ($p < 0,05$), ya que el uso de las mallas promovió un crecimiento de 1,03 – 3,34 cm más que el testigo (Cuadro 12).

Se aumentó la altura de la planta (6,96 – 10,62 cm) bajo las mallas de colores respecto con el testigo. Bajo la malla azul se disminuyó el diámetro del tallo en 2,61 mm en comparación con el testigo, mientras que el número de hojas aumentó 2,5 en contraste con el testigo. El uso de las mallas perla y roja aumentaron el ancho de la hoja (1,28 – 1,58 cm) en contraste con el testigo. El largo de la hoja aumentó de 2,48 a 3,12 cm bajo las mallas de colores comparado con el testigo (Cuadro 12).

Cuadro 12. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 42 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.

DDT	Color de malla	Variables de crecimiento				
		Altura de la planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm) ¹	Largo de la hoja (cm) ¹
27	Azul	9,28 a	7,08 a	10,89 a	9,72 a	14,54 a
	Perla	8,25 a	7,33 a	10,06 a	8,78 a	14,78 a
	Rojo	7,83 a	7,23 a	10,56 a	10,17 a	14,42 a
	Testigo	5,94 b	7,50 a	10,22 a	9,17 a	12,99 a
42	Azul	21,08 a	10,18 b	15,39 a	8,50 ab	16,92 a
	Perla	17,69 a	12,34 a	14,22 ab	9,36 a	16,97 a
	Rojo	17,42 a	11,34 ab	14,11 ab	9,06 a	17,56 a
	Testigo	10,46 b	12,79 a	12,89 b	7,78 b	14,44 b

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Tercera y cuarta hoja totalmente expandida.

Crecimiento de las plantas durante el periodo de menor radiación

A los 28 DDT las plantas bajo las mallas perla y roja exhibieron la mayor altura en contraste al testigo ($p < 0,05$), con diferencias de 2,68 y 3,40 cm, correspondientemente. Bajo la malla roja se aumentó el diámetro del tallo (1,68 mm) y el número de hojas (1,84) en comparación con el testigo (Cuadro 13). Respecto al ancho de la hoja los tratamientos no presentaron diferencias significativas en relación con el testigo ($p > 0,05$), sin embargo, bajo la malla azul se presentó un menor tamaño (1,62 cm) en comparación con la malla roja. El uso de las mallas perla y roja promovió el crecimiento del largo de la hoja (4,11 – 4,17 cm) respecto al testigo (Cuadro 13).

A los 44 DDT se favoreció el crecimiento de la altura (5,25 – 8,14 cm) de las plantas bajo las mallas de colores en contraste con el testigo. El uso de la malla roja aumentó 1,68 mm el diámetro del tallo en comparación con el testigo (Cuadro 13). Bajo la malla perla se aumentó el número de hojas (1,86), el ancho (0,90 cm) y largo de la hoja (5,13 cm) respecto con el testigo. La malla roja también se aumentó el número de hojas (2,42), el ancho (0,92 cm) y largo de la hoja (4,90 cm), igualmente comparadas con el testigo (Cuadro 13).

Cuadro 13. Promedios de las variables de crecimiento del cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 28 y 44 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.

DDT	Color de malla	Variables de crecimiento				
		Altura de la planta (cm)	Diámetro del tallo (mm)	Número de hojas	Ancho de la hoja (cm) ¹	Largo de la hoja (cm) ¹
28	Azul	7,22 b	4,66 c	9,33 ab	7,35 b	11,89 ab
	Perla	8,56 a	6,44 ab	9,72 ab	8,56 ab	14,67 a
	Rojo	9,28 a	6,70 a	10,17 a	8,97 a	14,61 a
	Testigo	5,88 b	5,02 bc	8,33 b	7,54 ab	10,50 b
44	Azul	16,50 b	7,43 c	12,67 bc	8,44 ab	18,64 b
	Perla	19,39 a	9,75 a	13,61 ab	8,72 a	20,92 a
	Rojo	19,33 a	8,96 ab	14,17 a	8,78 a	20,69 a
	Testigo	11,25 c	8,05 bc	11,75 c	7,82 b	15,79 c

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

¹ Tercera y cuarta hoja totalmente expandida.

Índice de área foliar (IAF)

Respecto al índice de área foliar (IAF) no se encontraron efectos significativos entre los tratamientos ($p > 0,05$), tanto en el periodo de mayor radiación (47 DDT) como en el de menor radiación (41 DDT) (Cuadro 14).

Cuadro 14. Promedios del índice de área foliar (IAF) en el cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Índice de área foliar (IAF) ¹
Mayor radiación (47 DDT)	Azul	2,68
	Perla	3,58
	Rojo	3,08
	Testigo	3,14
Menor radiación (41 DDT)	Azul	1,18
	Perla	2,21
	Rojo	2,43
	Testigo	2,29

¹Valor de $p > 0,05$ entre tratamientos dentro de una misma columna y periodo de radiación.

Intercambio gaseoso durante el periodo de mayor radiación

A los 32 DDT disminuyó la A_n 9,26 y 4,38 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bajo las mallas azul y perla, respectivamente en contraste con el testigo. En la g_s no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$). Asimismo, el uso de las mallas de colores disminuyó la EUA de 22,68 – 25,85 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ en comparación con el testigo (Cuadro 15).

A los 47 DDT el uso de las mallas de colores redujo la A_n entre 4,95 a 7,95 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en contraste con el testigo. Respecto a la g_s , la malla perla fue estadísticamente superior ($p < 0,05$) con una diferencia de 1,11 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en comparación con el testigo. Se disminuyó la EUA de 10,67 – 15,32 $\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ bajo las mallas, comparadas con el testigo (Cuadro 15).

Cuadro 15. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 32 y 47 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación.

DDT	DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{día}^{-1}$)	Color de malla	Intercambio gaseoso		
			A_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EUA ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)
32	42,47	Azul	13,25 c	0,49 a	31,77 b
		Perla	18,13 b	0,66 a	34,06 b
		Rojo	20,30 ab	0,60 a	34,94 b
		Testigo	22,51 a	0,40 a	57,62 a
47	18,15	Azul	4,31 c	0,79 b	9,51 b
		Perla	7,31 b	1,78 a	5,57 b
		Rojo	7,29 b	0,77 b	10,22 b
		Testigo	12,26 a	0,67 b	20,89 a

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Intercambio gaseoso durante el periodo de menor radiación

A los 27 DDT se redujo significativamente ($p < 0,05$) la A_n ($11,82 - 17,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) bajo las mallas de colores en comparación con el testigo. En la g_s no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$), no obstante, el uso de la malla perla incrementó $0,58 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la g_s en contraste con la malla azul. Bajo la malla perla se redujo $11,80 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ la EUA en comparación con el testigo (Cuadro 16).

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas a los 49 DDT en las variables A_n y g_s ($p > 0,05$). Sin embargo, con el uso de la malla azul se disminuyó $56,78 \text{ CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ la EUA en contraste con el testigo (Cuadro 16).

Cuadro 16. Promedios de las variables del intercambio gaseoso del cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 27 y 49 días después de trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación.

DDT	DLI ($\text{mol m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	Color de malla	Intercambio gaseoso		
			A_n ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	EUA ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)
27	28,67	Azul	12,95 c	0,73 b	18,35 ab
		Perla	17,06 b	1,31 a	14,53 b
		Rojo	18,38 b	0,90 ab	21,64 ab
		Testigo	30,20 a	1,17 ab	26,33 a
49	28,58	Azul	7,09 a	0,06 a	114,19 b
		Perla	7,63 a	0,07 a	115,98 ab
		Rojo	9,23 a	0,07 a	143,38 ab
		Testigo	10,08 a	0,06 a	170,97 a

Distintas letras dentro de una misma columna y DDT indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Color de las hojas según SPAD

El color de las hojas según SPAD durante el periodo de mayor radiación (47 DDT) no presentó diferencias significativas ($p > 0,05$). Sin embargo, en el periodo de menor radiación (44 DDT) se redujo el valor SPAD de las hojas entre 3,78 y 5,50 bajo las mallas de colores en contraste con el testigo (Cuadro 17).

Cuadro 17. Promedios del color de las hojas según SPAD en el cultivo de kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según las distintas mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Color de las hojas según SPAD
Mayor radiación (47 DDT)	Azul	48,58 a
	Perla	49,18 a
	Rojo	47,79 a
	Testigo	48,62 a
Menor radiación (44 DDT)	Azul	38,47 b
	Perla	39,84 b
	Rojo	39,74 b
	Testigo	43,62 a

Distintas letras dentro de una misma columna y periodo de radiación indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

Rendimiento y calidad comercial

No se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en el peso fresco y seco aéreo durante el periodo de mayor radiación. Por otro lado, las mallas no influyeron en el peso fresco aéreo durante el periodo de menor radiación, sin embargo, bajo las mallas perla y roja se incrementó el peso fresco entre 976,00 y 929,77 g/m², respectivamente en contraste con la malla azul. En el peso seco aéreo se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), donde el testigo fue 127,89 g/m² superior a las plantas bajo la malla azul (Cuadro 18).

Cuadro 18. Promedios del rendimiento final obtenido del cultivo kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) según los distintos colores de mallas utilizadas a los 49 días después de trasplante, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Rendimiento final	
		Peso fresco aéreo (g/m ²)	Peso seco aéreo (g/m ²)
Mayor radiación	Azul	2648,89 a	272,00 a
	Perla	3498,67 a	405,33 a
	Rojo	2945,78 a	376,89 a
	Testigo	2728,89 a	400,00 a
Menor radiación	Azul	1443,56 b	118,15 b
	Perla	2419,56 a	258,20 a
	Rojo	2373,33 a	250,66 a
	Testigo	1786,67 ab	246,04 a

Distintas letras dentro de una misma columna y periodo de radiación indican diferencias estadísticamente significativas (Tukey, $p < 0,05$).

En los periodos de mayor y menor radiación no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) para cada calidad del cultivo de kale bajo los distintos tratamientos (Anexo 5). Sin embargo, en el periodo de menor radiación se presentó una tendencia de mayor cantidad de plantas de primera calidad bajo las mallas perla y roja. Además, no se encontraron plantas de tercera en los tratamientos durante los periodos de mayor y menor radiación (Figura 14).

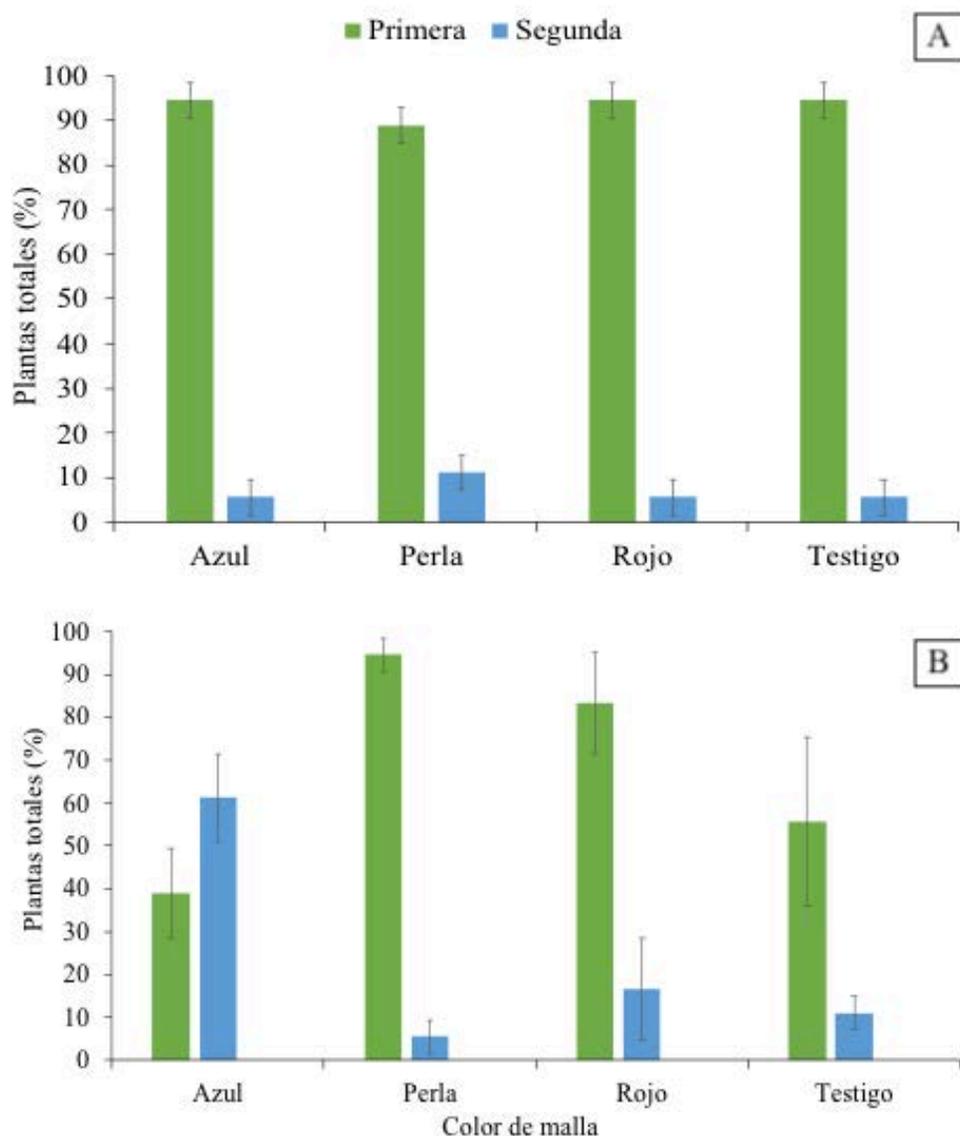


Figura 14. Promedios del porcentaje de la cantidad de plantas de kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) para cada categoría comercial bajo las mallas, en los periodos de mayor (A) y menor (B) radiación. Las líneas verticales representan el error estándar (n=6).

Discusión

Cultivo de espinaca

Crecimiento de las plantas

Durante el periodo de mayor radiación se presentó un estrés postrasplante en la espinaca causado por diversos factores ambientales principalmente la radiación, generando la pérdida del testigo (Cuadro 5). La espinaca presenta un punto de saturación lumínica de $1238 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Erwin & Gesick, 2017), mientras que en el testigo la radiación máxima fue de $2205 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Cuadro 2), de acuerdo con Lara et al. (2021) la espinaca puede crecer con baja RFA ($200 - 400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por lo que las mallas al generar condiciones de sombra favorecieron el establecimiento de las plantas durante el mismo periodo.

De esta misma manera, Zhang et al. (2022) señalan que las mallas también modifican el micro-ambiente para proveer a las plantas protección ante condiciones de estrés como altas temperaturas, déficit hídrico y fuertes precipitaciones.

En los periodos de mayor y menor radiación el uso de mallas incrementó la altura de la planta y el tamaño de las hojas (Cuadros 5 y 6). Efectos relacionados con el proceso de etiolación donde se intensificó bajo la malla azul, a pesar de que se presentaron condiciones climáticas distintas (temperatura, HR, precipitación y DLI) en ambos periodos.

De acuerdo con Ilić et al. (2019) la malla azul filtra más RFA y genera mayor porcentaje de sombra en comparación a las otras mallas (Cuadro 2), por lo que las plantas al desarrollarse en un ambiente con baja saturación lumínica aumentan la altura del tallo (Ilić et al., 2017b). La etiolación en las plantas está relacionada con las auxinas, las cuales mantienen la dominancia apical y permiten la expansión de las células (Gould, 2009; Garay-Arroyo et al., 2014).

Las mallas fotoselectivas aumentan la altura de las plantas al incrementar la luz roja o roja lejana respecto a la azul (Ayala-Tafoya et al., 2015a), sin embargo, en el presente estudio la elongación del tallo en las plantas bajo las mallas pudo estar relacionado con el porcentaje de sombra ($> 50\%$) generado por cada una de ellas.

Bajo las mallas fotoselectivas se presentó un menor diámetro del tallo y mayor tamaño en las hojas jóvenes (3-4 hoja totalmente expandida) (Cuadros 5 y 6). De acuerdo con Ilić et

al. (2015, 2017b) y Godi et al. (2018) las plantas bajo ambientes sombreados aumentan el tamaño de sus hojas al expandirse las células y así captar luz para el proceso de la fotosíntesis. Adicionalmente, plantas con tallos más delgados se atribuyen al proceso de la etiolación (Agrios, 2005).

Las mallas no influyeron en el índice de área foliar (IAF) de la espinaca durante el periodo de menor radiación, sin embargo, las plantas bajo la malla roja obtuvieron un mayor IAF (1,38) en comparación a las plantas bajo la malla azul (0,78) (Cuadro 7). Efecto relacionado al número de hojas obtenido bajo las mallas y no al tamaño de las hojas, ya que bajo la malla azul el número de hojas fue menor, pero de un mayor tamaño y viceversa bajo la malla roja.

Intercambio gaseoso

El uso de las mallas fotoselectivas, específicamente la azul disminuyó la A_n (Cuadros 8 y 9), sin embargo, durante el periodo de menor radiación bajo la malla roja (sombra >50%) y el testigo (Cuadro 9) se presentaron valores similares a los máximos reportados por Erwin & Gesick (2017) para el cultivo de espinaca de 19,6 a 20,0 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, dependiendo de la variedad.

La espinaca presenta un punto de compensación y de saturación de luz de 73 y 1238 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectivamente por lo que al disminuir la RFA bajo las mallas (<1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, Cuadro 2) la A_n también disminuyó. Sin embargo, durante el periodo de menor radiación bajo la malla roja se presentó una mayor calidad de la luz al aumentar las proporciones rojo y rojo lejano (Cuadro 3).

De acuerdo con Ayala-Tafoya et al. (2018) la intensidad y la calidad de luz influyen en el proceso de fotosíntesis. Asimismo, Godi et al. (2018) indican que la malla roja aumenta la actividad fotosintética de la planta, debido a que la luz roja transmitida es absorbida con mayor eficiencia por la clorofila y transferida al centro de reacción, lo que consecuentemente favorece la fotosíntesis en las plantas, en contraste con las otras mallas (Ayala-Tafoya et al., 2018), lo que explica una mayor A_n .

En ambos periodos se presentó el menor verdor SPAD en las hojas bajo las mallas (Cuadro 10), relacionado directamente con el contenido de clorofila (Rodríguez & Miller, 2000), lo que refleja una menor tasa fotosintética. Adicionalmente, Armarego-Marriott et al.

(2020) mencionan que plantas etioladas presentan hojas de color verde claro o amarillento como respuesta a un bajo contenido de clorofila y a la presencia de etioplastos. Por otro lado, Costa et al. (2012) reportaron un efecto similar en plantas de fresa bajo mallas de colores, lo cual se asocia a un bajo flujo de fotones transmitidos por las mismas.

A los 47 DDT durante el periodo de menor radiación (Cuadro 8) las plantas de espinaca presentaron una menor g_s bajo la malla azul, lo que indica el cierre de estomas (Kusumi et al., 2012). Esta respuesta en las plantas está relacionada al proceso de la A_n obtenida como consecuencia de una RFA limitada.

Downton et al. (1984) reporta una g_s de $0,45 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ y un EUA de $3120 \mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ para el cultivo de espinaca en condiciones de saturación lumínica y con una tasa fotosintética de $18,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En la presente investigación se obtuvieron valores similares de g_s en el periodo de mayor radiación (Cuadro 8), no obstante, a los 49 DDT durante el periodo de menor radiación se presentaron valores inferiores al reportado (Cuadro 9). Ambas respuestas causadas por las condiciones ambientales presentes en el momento de las mediciones, tales como cantidad de RFA, estrés hídrico y aumento del déficit de presión de vapor (DPV) los cuales pudieron causar la apertura o cierre de los estomas (Yuste & Vicente, 2014).

Además, López-Marín et al. (2012) mencionan que plantas bajo un ambiente sombreado presentan una menor conductancia estomática, transpiración y eficiencia en el uso del agua como resultado del cierre estomático, el cual aumenta la resistencia difusiva estomática y disminuye la tasa de respiración. De este mismo modo, la transpiración al ser el mecanismo de las plantas para disminuir su temperatura ocurre con menor frecuencia en ambientes sombreados, ya que con menos cantidad de RFA se realiza principalmente para el proceso de la fotosíntesis (Krich et al., 2022). Estos cambios son considerados como fenómenos adaptativos a la captura de radiación más eficiente, a pesar de los efectos de la misma en el desarrollo estomático y la capacidad fotosintética asociada (López-Marín et al., 2012).

Rendimiento y calidad comercial

En el periodo de menor radiación, las plantas de espinaca bajo la malla roja y el testigo obtuvieron los mayores pesos frescos, a pesar de no presentar diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 11). Adicionalmente, ambos tratamientos superaron el rendimiento comercial reportado (1453 g m^{-2}) para la producción de espinaca variedad Space en invernadero en Oklahoma (Brandenberger et al., 2007) con valores de 1644 g m^{-2} bajo la malla roja y 1498 g m^{-2} en el testigo.

Las plantas bajo la malla roja y el testigo mostraron la mayor acumulación de materia seca (Cuadro 11). Este resultado concuerda con el comportamiento de la A_n , en donde se presentaron los mayores valores bajo la malla roja ($20,34$ y $10,64 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a los 27 y 49 DDT respectivamente) y el testigo ($21,97$ y $13,11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a los 27 y 49 DDT correspondientemente). Cabe resaltar que durante el periodo de menor radiación la disminución en la A_n bajo las mallas no repercutió significativamente en el rendimiento (peso fresco), sin embargo, las plantas bajo la malla azul presentaron una menor acumulación de biomasa debido a la A_n limitada por la RFA.

Durante el primer periodo no se presentaron plantas de primera debido a que la condición de estrés prevaleció durante todo el ciclo, la cual repercutió en la calidad comercial final de la espinaca (Figura 13). En el periodo de menor radiación se promovió mayor cantidad de plantas de primera y se disminuyó las plantas de segunda bajo la malla roja (Figura 13), además, también contribuyó al aumento del rendimiento comercial de la espinaca en comparación a las otras mallas.

Cultivo de kale

Crecimiento de las plantas

Durante ambos periodos se favoreció el crecimiento (altura y tamaño de las hojas) de las plantas de kale bajo las mallas fotoselectivas (Cuadros 12 y 13). Este mismo efecto fue descrito por Yan et al. (2011a y 2011b) en plantas de repollo chino floreciente (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *utilis* Tsen et Lee), donde se presentó un mayor crecimiento en la altura bajo mallas de color rojo y azul en contraste con el testigo.

Los efectos en las variables de crecimiento del kale están relacionados a la cantidad de la luz transmitida. De acuerdo con Santana et al., (2012) mencionan que el efecto de la elongación del tallo es propio de plantas que se desarrollan en ambientes sombreados como en este caso las mallas. Asimismo, el número de hojas se relaciona con la altura del tallo, según Nascimento et al. (2016) a mayor altura mayor será la cantidad de hojas en la planta.

Por otro lado, Ilić et al. (2017b) mencionan que la malla perla al aumentar la luz difusa las plantas la aprovechan de manera más eficiente, lo que podría explicar el aumento del diámetro del tallo en las plantas de kale durante el periodo de menor radiación (Cuadro 13).

El uso de mallas perla y roja incrementó el tamaño de las hojas (ancho y largo) en ambos periodos (Cuadros 12 y 13). Se observó un comportamiento similar en plantas de lechuga (Choosakul & Pagamas, 2017), lo que se explica por la disminución de RFA, ya que las hojas tienden a aumentar su tamaño mediante la elongación de las células para expandir su área y lograr captar la luz necesaria para el proceso de fotosíntesis (Godi et al., 2018; Ilić et al., 2015; Ilić et al., 2017b). Además, el aumento del tamaño de las hojas bajo las mallas es una característica favorable ya que se podrían cosechar en menos tiempo al alcanzar el largo ideal cosechable, el cual sería de 10 a 15 cm de longitud (Casajús et al., 2021).

Intercambio gaseoso

Los valores de A_n 22,51 y 30,20 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en el testigo durante los periodos de mayor y menor radiación, respectivamente (Cuadros 15 y 16) superaron a los máximos registrados por Erwin & Gesick (2017) de 14,40 – 19,00 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, según las distintas variedades de kale.

El uso de las mallas causó una reducción en la A_n durante el periodo de mayor radiación (Cuadro 15). Mientras que en el periodo de menor radiación las mallas no presentaron un efecto sobre la A_n (Cuadro 16), a pesar de la disminución del contenido de clorofila (verdor SPAD de la hoja), el cual se intensificó bajo la malla azul (Cuadro 17) (Rodríguez & Miller, 2000).

De acuerdo con Martínez-Gutiérrez et al. (2016) la fotosíntesis está relacionada proporcionalmente con la cantidad de RFA. Según indica Smit et al. (2008) el uso de mallas modifica la calidad de luz y reducen la intensidad de la RFA, lo que consecuentemente disminuyen la capacidad fotosintética.

Por tal motivo, Ayala-Tafoya et al. (2015a) indican que el porcentaje de sombra de la malla se debe seleccionar de acuerdo con el punto de saturación lumínica del cultivo, de tal manera que las plantas reciban radiación cercana a dicho punto, el cual para kale se reporta un valor de 884 a 978 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Erwin & Gesick, 2017). Por lo que la disminución de la A_n en las plantas de kale se atribuye a una menor cantidad de RFA y demás condiciones ambientales presentadas (temperatura, precipitación, DLI y HR) durante ambos periodos.

Se obtuvieron valores altos en la g_s bajo las mallas fotoselectivas durante el periodo de mayor radiación (Cuadro 15), según los reportados por Barickman et al. (2020) de 0,78 - 1,07 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Como consecuencia de una menor A_n y mayor g_s se generó una disminución en la EUA (Cuadro 15).

Autores como Casson & Gray (2020) y Pino et al. (2019) mencionan que factores como la humedad del sustrato, temperatura de la hoja, concentración de CO_2 e intensidad lumínica afectan la conductancia estomática. Asimismo, Zhang et al. (2019) señalan que la rápida respuesta de esta variable hacia la fluctuante radiación es de gran importancia para maximizar la A_n mientras se minimiza la pérdida de agua. Zervoudakis et al. (2012) indican que al aumentar la RFA también aumentan la A_n y la g_s .

El resultado obtenido en el presente estudio se encuentra directamente asociado a dichas variables fisiológicas, ya que un mayor valor en la EUA indica la ganancia de carbono en relación al uso del agua de la planta (Leakey et al., 2019), lo que se puede ver reflejado en una mayor A_n , como ocurrió en las plantas testigo (Cuadros 15 y 16).

Rendimiento y calidad comercial

Los valores obtenidos de peso fresco y seco en ambos periodos fueron superiores al rendimiento comercial reportado por Saavedra del Real (2021) en kale (var. Darkibor) en La Platina, Chile con valores de peso fresco de 1334 g/m² y seco de 232 g/m². El rendimiento obtenido en el periodo de menor radiación bajo la malla azul no alcanzó los valores de peso fresco y seco reportados (Cuadro 18).

El uso de mallas fotoselectivas contribuyó a mantener el peso fresco y seco por área en ambos periodos (Cuadro 18), a pesar de la disminución de la A_n (Cuadros 15 y 16), la cual no afectó el rendimiento ni la acumulación de biomasa. Sin embargo, durante el periodo de menor radiación la disminución de la A_n bajo la malla azul repercutió en un menor peso seco del kale. Cabe destacar que durante el segundo periodo de siembra se redujeron los valores del rendimiento en comparación con el primer periodo, como consecuencia de la baja radiación durante dicho ciclo, la cual se intensificó bajo la malla azul.

Las mallas fotoselectivas no influyeron en la calidad final del kale durante el periodo de mayor radiación (Figura 14), mientras que en el periodo de menor radiación al limitarse la RFA bajo la malla azul repercutió en una menor cantidad de plantas de primera calidad (Figura 14). Esto indica que las mallas perla y roja aparte de mantener el peso fresco y seco también contribuyeron a mantener la primera calidad durante la producción en ambos periodos.

Conclusiones

- El uso de las mallas agrícolas azul, perla y roja presentaron distintos efectos en el crecimiento e intercambio gaseoso durante ambos periodos de radiación tanto en la espinaca como en el kale.
- En el periodo de mayor radiación el uso de las mallas roja y perla favorecieron el establecimiento de las plantas de espinaca ante el estrés postrasplante, mientras que la malla azul causó un efecto de etiolación y una disminución de aproximadamente 50% de la A_n en comparación a las otras mallas.
- La malla roja mantuvo la A_n y el rendimiento, además aumentó un 20% la cantidad de plantas de primera calidad de la espinaca durante el periodo de menor radiación como consecuencia del aumento de la luz R.
- En el periodo de mayor radiación disminuyó la A_n del kale aproximadamente de 50% a 60% bajo las mallas, sin embargo no repercutió en el rendimiento ni en la calidad final debido a la cantidad de RFA presentada durante el mismo periodo.
- Se presentó una disminución de 20% a 50% en el peso fresco y seco durante el segundo periodo como consecuencia de valores más bajos de DLI en comparación con el primer periodo.
- Para la implementación de mallas agrícolas en cultivos hortícolas de hoja debe considerarse el tipo de cultivo, la estación climática del año y el pronóstico del tiempo.

Recomendaciones

- Añadir otras variables de respuesta como el área foliar, ya que al ser cultivos de hoja podría resultar de interés económico.
- Probar mallas con porcentaje de sombra $< 50\%$ para evitar filtrar mayor cantidad de RFA, principalmente en el segundo periodo que se presentó menores valores de DLI.

Literatura citada

Abbasnia-Zare, S. K., Sedaghatoor, S., Padasht-Dahkaei, M. N., & Hashemabadi, D. (2019). The effect of light variations by photoselective shade nets on pigments, antioxidant capacity, and growth of two ornamental plant species: Marigold (*Calendula officinalis* L.) and violet (*Viola tricolor* L.). *Cogent Food & Agriculture*, 5(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1650415>.

ACE Geosynthetics. (2022). Novedades. Mallas Agrícolas. Agricultura. <https://www.geoace.com/es/products/Agricultura/Mallas-Agr%C3%ADcolas>.

Agrios, G. N. (2005). Chapter ten - Environmental Factors That Cause Plant Diseases. *Plant Pathology (Fifth Edition)* (357-384). Department of Plant Pathology, University of Florida. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-047378-9.50016-6>.

Armarego-Marriott, T., Sandoval-Ibañez, O. & Kowalewska, L. (2020). Beyond the darkness: recent lessons from etiolation and de-etiolation studies. *Journal of Experimental Botany*, 71(4), 1215–1225. doi:10.1093/jxb/erz496.

Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95–96. <https://doi.org/10.1007/s42398-019-00078-w>.

Ayala-Tafoya, F., Sánchez-Madrid, R., Partida-Ruvalcaba, L., Gilberto Yáñez-Juárez, M., Higinio Ruiz-Espinosa, F., de Jesús Velázquez Alcaraz, T., Valenzuela-López, M., & Martín Parra-Delgado, J. (2015a). Producción de pimiento morrón con mallas sombra de colores. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(1), 93–99. <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.1.93>.

Ayala-Tafoya, F., Yáñez-Juárez, M. G., Partida-Ruvalcaba, L., Ruiz-Espinosa, F. H., Campos-García, H., Vásquez-Martínez, O., Velázquez-Alcaraz, T. de J. & Díaz-Valdés, T. (2015b). Producción de pepino en ambientes diferenciados por mallas de sombreo fotoselectivo. *Información Técnica Económica Agraria*, 111(1), 3-17. <http://dx.doi.org/10.12706/itea>.

Ayala-Tafoya, F., Yáñez-Juárez, M. G., López-Orona, C. A., Medina-López, R., Velázquez-

- Alcaraz, T. de J., & Díaz-Valdés, T. (2018). Sunlight transmitted by colored shade nets on photosynthesis and yield of cucumber. *Ciencia Rural*, 48(9), 1–9. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20170829>.
- Barickman, T. C., Ku, K. M. & Sams, C. E. (2020). Differing precision irrigation thresholds for kale (*Brassica oleracea* L. var. *acephala*) induces changes in physiological performance, metabolites, and yield. *Environmental and Experimental Botany*, 180, 104253. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104253>.
- Bárcena, A., Martínez, G. & Costa, L. (2019). Low intensity light treatment improves purple kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) postharvest preservation at room temperature. *Heliyon* 5, e02467. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02467>.
- Bejo Zaden B.V. (2022, 4 de mayo). Darkibor F1 Borecole. <https://www.bejosemillas.com.ar/borecole/darkibor-f1-conventional>.
- Bejo Zaden B.V. (2022, 4 de mayo). Space F1 Espinaca. <https://www.bejogt.com/espinaca/space-f1-conventional>.
- Bhattarai, G. & Shi, A. (2021). Research advances and prospects of spinach breeding, genetics, and genomics. *Vegetable Research*, 1(9), 1-18. doi: 10.48130/VR-2021-0009.
- Brandenberger, L., Cavins, T., Payton, M., Wells, L. & Johnson, T. (2007). Yield and Quality of Spinach Cultivars for Greenhouse Production in Oklahoma. *HortTechnology*, 17(2), 269 - 272.
- Briggs, W. R. & Christie, J. M. (2002). Phototropins 1 and 2: versatile plant blue-light receptors. *TRENDS in Plant Science*, 7(5), 204 - 210. DOI: 10.1016/s1360-1385(02)02245-8.
- Caraballo, M. (2017, Set-Oct). *Boletín del programa nacional sectorial de producción agrícola bajo ambientes protegidos: Utilización de distintos tipos de mallas, saranes de colores y aluminizados, en la agricultura* [Boletín N° 66]. Ambientes Protegidos Costa Rica (ProNAP).
- Casierra-Posada, F. (2007). Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(1), 114 - 123.

DOI:10.17584/rcch.2007v1i1.1150.

- Casson, S. & Gray, J. E. (2008). Influence of environmental factors on stomatal development. *New Phytologist*, 178, 9–2. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02351.x>.
- Cecílio-Filho, A. B., Bianco, M. S., Tardivo, C. F., & Pugina, G. C. M. (2017). Agronomic viability of New Zealand spinach and kale intercropping. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89(4), 2975–2986. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720160906>.
- Choosakul, N. & Pagamas, P. (2017). The Influence of Color Shading Net on the Growing of Lettuce. *Applied Mechanics and Materials*, 866, 33-36. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.866.33.
- Casajús, V., Perini, M., Ramos, R., Barriga Lourenco, A., Salinas, C., Sanchez, E., Fanello, D., Civello, P., Frezza, D. & Martínez, G. (2021). Harvesting at the end of the day extends postharvest life of kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*). *Scientia Horticulturae*, 276, 109757. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109757>.
- Costa, R. C., Calvete, E. O. & Schons, J. (2012). Chlorophyll Content in Strawberry Leaves Produced under Shading Screens in Greenhouse. *Acta Horticulturae*, 926, 321–324. DOI:10.17660/ActaHortic.2012.926.44.
- Downton, W. J. S., Grant, W. J. R. & Robinson, S. P. (1984). Photosynthetic and Stomatal Responses of Spinach Leaves to Salt Stress. *Plant Physiology*, 77, 85-88.
- Erwin, J. & Gesick, E. (2017). Photosynthetic Responses of Swiss Chard, Kale, and Spinach Cultivars to Irradiance and Carbon Dioxide Concentration. *Hortscience*, 52(5), 706–712. 2017. doi: 10.21273/HORTSCI11799-17.
- Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. (2021, 12 de agosto). Historia de la Estación. <https://eeafbm.ucr.ac.cr/quienes-somos/historia/>.
- Garay-Arroyo, A., Sánchez, M. D. S., García-Ponce, B., Álvarez-Buylla, E. R. & Gutiérrez, C. (2014). La Homeostasis de las Auxinas y su Importancia en el Desarrollo de *Arabidopsis Thaliana*. *REB*, 33(1), 13-22.
- Godi, V., Krishna-Manohar, R., & Vasantha-Kumari, R. (2018). Effect of Different Coloured Shade Nets with Varying Shade Intensities on Growth Parameters of Tomato (*Solanum*

- lycopersicum* L.) var. Arka Rakshak. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 6(1), 142–146. <https://doi.org/10.18782/2320-7051.5898>.
- Gould, A. B. (2009). Fungi: Plant Pathogenic. *Encyclopedia of Microbiology (Third Edition)* (pp. 457-477). Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA. <https://doi.org/10.1016/B978-012373944-5.00347-3>.
- Gutiérrez, M. V., Soto, D., & Alpízar, M. (1997). Cuarenta años de observaciones meteorológicas en la Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno. *Boltec*, 30(2), 01-14.
- Hilaquita-Ticona, R. (2017a). Evaluación del rendimiento de dos variedades de col rizada (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) bajo tres niveles de abonamiento foliar orgánico aeróbico en el centro experimental de Cota Cota. *Apthapi*, 3(3), 667-678.
- Hilaquita-Ticona, R. (2017b). *Evaluación del rendimiento de dos variedades de col rizada (Brassica oleracea var. sabellica) bajo tres niveles de abonamiento foliar orgánico aeróbico en el centro experimental de Cota Cota* [tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional RI-UMSA.
- Huché-Thélier, L., Crespelb, L., Le Gourrierec, J., Morela, P., Sakrb, S. & Leduc, N. (2015). Light signaling and plant responses to blue and UV radiations—Perspectives for applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 22-38. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.06.009>.
- Ilić, Z., Milenković, L., Đurovka, M. & Kapoulas, N. (2009). The effect of color shade nets on the greenhouse climate and pepper yield. *International Symposium on Agriculture, February*, 529–532.
- Ilić, Z., Milenković, L., Šunić, L. & Manojlović, M. (2018). Color shade nets improve vegetables quality at harvest and maintain quality during storage. *Contemporary Agriculture*, 67(1), 9 - 19.
- Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L., Barać, S., Mastilović, J., Kevrešan, Ž., & Fallik, E. (2017a). Effect of shading by coloured nets on yield and fruit quality of sweet pepper. *Zemdirbyste*, 104(1), 53–62. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.008>

- Ilić, S. Z., Milenković, L., Dimitrijević, A., Stanojević, L., Cvetković, D., Kevrešan, Fallik, E., & Mastilović, J. (2017b). Light modification by color nets improve quality of lettuce from summer production. *Scientia Horticulturae*, 226, 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.09.009>.
- Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L. & Fallik, E. (2015). Effect of coloured shade-nets on plant leaf parameters and tomato fruit quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(13), 2660–2667. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7000>
- Ilić, Z. S., Milenković, L., Šunić, L., Barać, S., Cvetković, D., Stanojević, L., Kevrešan, Z. & Mastilović, J. (2019). Bioactive constituents of red and green lettuce grown under colour shade nets. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 31(12), 937-944. doi: 10.9755/ejfa.2019.v31.i12.2043.
- Jiménez, J., Arias, L. A., Espinosa, L., Fuentes, L. S., Garzón, C., Gil, R., Niño, N., & Rodríguez, M. (2010). *El cultivo de la espinaca (Spinacia oleracea L.) y su manejo fitosanitario en Colombia*. Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Krich, C., Mahecha, M. D., Migliavacca, M., Kauwe, M. G. D., Griebel, A., Runge, J. & Miralles, D. G. (2022). Decoupling between ecosystem photosynthesis and transpiration: a last resort against overheating. *Environmental Research*, 17(044013). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac583e>.
- Kusumi, K., Hirotsuka, S., Kumamaru, T. & Iba, K. (2012). Increased leaf photosynthesis caused by elevated stomatal conductance in a rice mutant deficient in SLAC1, a guard cell anion channel protein. *Journal of Experimental Botany*, 63(15), 5635–5644. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers216>.
- Lara, O. A., Amorós, A., Tapia, M.L. & Escalona, V.H. (2020). Effect of a photosensitive filter on the yield and postharvest quality of 'Viroflay' baby spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves cultivated in a hydroponic system. *Scientia Horticulturae*, 277, 109804. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109804>.
- Leakey, A. D. B., Ferguson, J. N., Pignon, C. P., Zhenong Jin, A. W., Hammer, G. L. & Lobell, D. B. (2019). Water Use Efficiency as a Constraint and Target for Improving the Resilience and Productivity of C3 and C4 Crops. *The Annual Review of Plant*

- Biology*, 70, 781–808. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040305>.
- Li, Y., Zheng, Y., Liu, H., Zhang, Y., Hao, Y., Song, S., & Lei, B. (2019). Effect of supplemental blue light intensity on the growth and quality of Chinese kale. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60, 49–57. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0104-1>.
- López-Elías, J. (2018). La producción hidropónica de cultivos. *IDESIA*, 36(2), 139-141.
- López-Marín, J., Gálvez, A., González, A., Egea-Gilabert, C., & Fernández, J. A. (2012). Effect of shade on yield, quality and photosynthesis-related parameters of sweet pepper plants. *Acta Horticulturae*, 956, 545–552. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.956.65>
- Lorenzo-Mínguez, P., Sánchez-Guerrero, M. C., Medrano-Cortés, E., Alonso-Ramírez, F. J., Pérez-Parra, J., Baeza, E., Gázquez, J. C., López, J. C. & Montero, J. I. (2010). *Manejo del Clima en el Invernadero Mediterráneo*. IFAPA.
- Martínez-Gutiérrez, G. A., Nicolás-Santana, L., Ortiz-Hernández, Y. D., & Morales, I. (2016). Crecimiento y contenido de aceite en albahaca (*Ocimum basilicum* L.) bajo mallas sombra de colores. *Interciencia*, 41(6), 428–432.
- Mazzella, M. A. (2001). *Interacción entre fitocromos y criptocromos en el control del crecimiento y desarrollo de Arabidopsis thaliana* [tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Biblioteca Digital FCEN-UBA. https://repositoriosdigitales.mincyt.gov.ar/vufind/Record/BDUBAFCEN_b9e58b858734bc0288e8020be9c24135.
- Meena, R. K., Vashisth, A., Singh, R., Singh, B., & Manjaih, K. M. (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(1), 104–111.
- Meng, Q., Kelly, N. & Runkle, E. S. (2019). Substituting green or far-red radiation for blue radiation induces shade avoidance and promotes growth in lettuce and kale. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 383–391. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.016>.

- Mora-Bautista, M. A., Rodríguez-Mendoza, M. N., García-Cué, J. L., Sánchez-Escudero, J. & Etchevers-Barra, J. D. (2021). Field production of kale (*Brassica oleracea* var. *Acephala*) with different nutrition sources. *Agro Productividad*. <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i10.1954>.
- do Nascimento, Â. M. P., Reis, S. N., Nery, F. C., Curvelo, I. C. S., Taques, T da C. & Almeida, E. F. A. (2016). Influence of color shading nets on ornamental sunflower development. *Ornamental Horticulture*, 22(1), 101-106. <https://doi.org/10.14295/oh.v22i1.755>.
- Neugart, S., Krumbein, A. & Zrenner, R. (2016). Influence of Light and Temperature on Gene Expression Leading to Accumulation of Specific Flavonol Glycosides and Hydroxycinnamic Acid Derivatives in Kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*). *Frontiers in Plant Science*, 7(326). doi: 10.3389/fpls.2016.00326.
- Nguyen, G. N.; Lantzke, N. & Van Burgel, A. (2022). Effects of Shade Nets on Microclimatic Conditions, Growth, Fruit Yield, and Quality of Eggplant (*Solanum melongena* L.): A Case Study in Carnarvon, Western Australia. *Horticulturae*, 8(696), 1-15. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8080696>.
- Ombódi, A., Pék, Z., Szuvandzsiev, P., Lugasi, A. (2016). Effect of coloured shade nets on some nutritional characteristics of a kapia type pepper grown in plastic tunnel. *Agricultural and Environmental Sciences*, 3(2), 25-33. <https://doi.org/10.18380/SZIE.COLUM.2016.3.2.25>.
- Oren-Shamir, M., Gussakovsky, E. E., Shpiegel, E., Nissim-Levi, A., Ratner, K., Ovadia, R., Giller, Y. E. & Shahak, Y. (2001). Coloured shade nets can improve the yield and quality of green decorative branches of *Pittosporum variegatum*. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76(3), 353-361. <https://doi.org/10.1080/14620316.2001.11511377>.
- Ovadia, R., Dori, I., Nissim-Levi, A., Shahak, Y. & Oren-Shamir, M. (2009). Coloured shade-nets influence stem length, time to flower, flower number and inflorescence diameter in four ornamental cut-flower crops. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84 (2), 161–166.

- Pichardo-González, J. M., Guevara-Olvera, L., Couoh-Uicab, Y.L., González-Cruz, L., Bernardino-Nicanor, A., Medina, H. R., González-Chavira, M. M. & Acosta-García, G. (2018). Efecto de las giberelinas en el rendimiento de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 925 - 934.
- Pino, E., Montalván, I., Vera, A. & Ramos, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *IDESIA*, 37(3), 55 - 64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>.
- Quail, P. H. (2010). Phytochromes. *Current Biology*, 20(12), R504–R507. doi:10.1016/j.cub.2010.04.014.
- Riaño-Castillo, E.R., Caicedo-Gegén, L., Torres-Mesa, A., Hurtado-Giraldo, H. & Gómez-Ramírez, E. (2019). Cambios en los niveles de nutrientes en solución hidropónica de espinaca baby (*Spinacia oleracea* L.), para su futura aplicación en acuaponía. *ORINOQUIA*, 23(1), 73–84. <https://doi.org/10.22579/20112629.544>.
- Ribera, A., Bai, Y., Wolters, A. M. A., van Treuren, R., & Kik, C. (2020). A review on the genetic resources, domestication and breeding history of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Euphytica*, 216(3), 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-02585-y>.
- Rodríguez-Beraud, M. M., & Morales-Ulloa, D. M. (2015). Shading nets effect on the production and quality of blueberry fruit (*Vaccinium corymbosum* L.) cv. Brigitta. *Scientia Agropecuaria*, 6(1), 41–50. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.01.04>.
- Rodríguez, I. R. & Miller, G. L. (2000). Using a Chlorophyll Meter to Determine the Chlorophyll Concentration, Nitrogen Concentration, and Visual Quality of St. Augustinegrass. *Hortscience*, 35(4), 751–754.
- Saavedra del Real, G. (2021). Kale (*Brassica oleracea* convar. *acephala* var. *sabellica*) [Boletín N° 411]. Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Chile (INIA).
- Santana, J.Q., Balbino, M.A., Tavares, T.R., Bezerra, R.S., Farias, J.G. & Ferreira, R.C. (2012). Effect of Photosensitive Screens in the Development and Productivity of Red and Yellow Sweet Pepper. *Acta Horticulturae* 956, 493-500. DOI:10.17660/ActaHortic.2012.956.58.

- SAS Institute Inc. (2018). JMP® 15 version 15.1.0 *Automation Reference*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schwechheimer, C. (2012). Gibberellin signaling in plants – the extended version. *Frontiers in Plant Science*, 2(107), 1 - 7. doi: 10.3389/fpls.2011.00107.
- Shahak, Y. (2003). A new agro-technology current research in ornamental. *Agriculture and Horticulture*, 10, 1–4.
- Shahak, Y., Gussakovsky, E.E., Gal, E., & Ganelevin, R. (2004). ColorNets: Crop protection and light-quality manipulation in one technology. *Acta Horticulturae* 659, 143-151. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.17>.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N. & Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364-371. DOI: 10.5958/2455-7145.2018.00056.5.
- Smit, A., Steyn, W. J., & Wand, S. J. E. (2008). Effects of shade netting on gas exchange of blushed apple cultivars. *Acta Horticulturae*, 772, 73–80. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.772.8>.
- Soto-Bravo, F. (2015). *Hidroponía familiar en sustrato: hágalo fácil* (Manual práctico). Universidad de Costa Rica, & Ministerio de Agricultura y Ganadería.
- Stamps, R. H & Chandler, A. L. (2008). Differential Effects of Colored Shade Nets on Three Cut Foliage Crops. *HortScience*, 770, 169–176. DOI:10.17660/ActaHortic.2008.770.19.
- 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>.
- Tyystjärvi, E. (2022). Chapter seven - Photoinhibition of Photosystem II. *International Review of Cell and Molecular Biology* (pp. 243-303). Department of Biochemistry and Food Chemistry, University of Turku, FI-20014 Turku, Finland. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405210-9.00007-2>.
- Yan, Q. Y., Liu, H. C., Chen, R. Y., Song, S. W. & Sun, G. W. (2011a). Effects of Different Shading-Net on Growth and Quality of Flowering Chinese Cabbage. *Acta Horticulturae* 907, 199-204. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.29>.

- Yan, Q., Song, S., Liu, H., Dong, F., Sun, G., Chen, R. (2011b). Effects of color shading-nets on the growth and photosynthetic characteristics of flowering Chinese cabbage. *Jornal of Huazhong Agricultural University*, 30(1), 44-48. Doi: 1000-24201-0044-05.
- Yuste, J. & Vicente, A. (2014). Fotosíntesis, conductancia estomática y potencial hídrico: relación y respuesta como indicadores del estado hídrico del cv. Verdejo, sometido a diferentes regímenes hídricos en la D.O. Rueda. *I Jornada del Grupo de Viticultura y Enología*, 338-345.
- Zervoudakis, G., Salahas, G., Kaspiris, G. & Konstantopoulou, E. (2012). Influence of Light Intensity on Growth and Physiological Characteristics of Common Sage (*Salvia officinalis* L.). *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 55(1), 89-95. <https://doi.org/10.1590/S1516-89132012000100011>.
- Zhang, Q., Bi, G., Li, T., Wang, Q., Xing, Z., LeCompte, J. & Harkess, R. L. (2022). Color Shade Nets Affect Plant Growth and Seasonal Leaf Quality of *Camellia sinensis* Grown in Mississippi, the United States. *Frontiers Nutrition*, 9(786421), 1 – 13. doi: 10.3389/fnut.2022.786421.
- Zhang, Q., Peng, S. & Li, Y. (2019). Increase rate of light-induced stomatal conductance is related to stomatal size in the genus *Oryza*. *Journal of Experimental Botany*, 70(19), 259–5269. doi:10.1093/jxb/erz267.
- ZipGrow. (2020). Best crops for hydroponics guide. The quick reference guide for crop management. <https://zipgrow.com/wp-content/uploads/QuickCropsGuide.pdf>.

Anexos

Anexo 1. Resultado de los análisis químicos foliares de los cultivos kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) y espinaca (*Spinacia oleracea* L.) hidropónicos a los 41 días después del trasplante (DDT), durante el periodo de mayor radiación en Alajuela, Costa Rica.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES
REPORTE DE ENSAYO
RE-R01 (V3)

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas



N° DE REPORTE: 77472
USUARIO: ESTACION EXP. FABIO BAUDRIT
SUBCLIENTE RESPONSABLE: PROY. 736-B9-216 - TESIS FINAL DE GRADUACION TATIANA GUTIERREZ
GUSTAVO QUESADA
CORREO: gustavo.quesada@ucr.ac.cr

PROVINCIA: ALAJUELA
CANTÓN: ALAJUELA
LOCALIDAD: GARITA
CULTIVO: VARIOS CULTIVOS

ANÁLISIS: QC,B,S
FECHA RECEPCIÓN: 05/05/2021
EMISIÓN DE REPORTE: 14/05/2021
N° DE MUESTRAS TOTAL: 5
PÁGINA: 1/1

ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR												
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
KALE SARAN ROJO (KALE)	P-21-01471	3,69	0,41	1,00	0,22	2,65	0,90	39	2	21	55	45
KALE SARAN AZUL (KALE)	P-21-01472	4,52	0,47	1,77	0,32	3,85	1,22	48	2	26	58	54
KALE SARAN PERLA (KALE)	P-21-01473	3,50	0,37	1,10	0,22	2,91	0,88	37	2	19	53	48
KALE TESTIGO (KALE)	P-21-01474	3,55	0,32	0,85	0,19	2,14	0,71	33	3	20	59	51
ESPINACA (ESPINACA)	P-21-01475	5,18	0,41	0,38	0,55	6,42	0,30	68	7	47	62	55

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

B.Q. Marijehela Blanco M.
N.I. 2468
Gestoría de Calidad

Ing. Agr. Michael González A.
N.I. 7827
Gestoría Técnica

1. Las unidades están expresadas en base seca, en masa/masa. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al M-N; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al M-ICP. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo con validez legal es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libere al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Anexo 2. Resultado de los análisis químicos foliares de los cultivos kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica* L.) y espinaca (*Spinacia oleracea* L.) hidropónicos a los 37 días después del trasplante (DDT), durante el periodo de menor radiación en Alajuela, Costa Rica.



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES
REPORTE DE ENSAYO
RE-R01 (V3)

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas



N° DE REPORTE: 78860
USUARIO: ESTACION EXP. FABIO BAUDRIT
SUBCLIENTE: PROY. 736-B9-216 - TESIS FINAL DE GRADUACION TATIANA GUTIERREZ
RESPONSABLE: GUSTAVO QUESADA
CORREO: gustavo.quesada@ucr.ac.cr

PROVINCIA: ALAJUELA
CANTÓN: ALAJUELA
LOCALIDAD: GARITA
CULTIVO: VARIOS CULTIVOS

ANÁLISIS: QC.B.S
FECHA RECEPCIÓN: 16/09/2021
EMISIÓN DE REPORTE: 22/09/2021
N° DE MUESTRAS TOTAL: 8
PÁGINA: 1/1

		ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR										
ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
KALE ROJO (KALE)	P-21-03010	4,33	0,54	1,45	0,31	3,86	1,20	52	2	26	41	106
KALE AZUL (KALE)	P-21-03011	6,19	0,58	2,40	0,47	4,94	1,15	69	3	26	41	68
KALE PERLA (KALE)	P-21-03012	4,52	0,55	1,41	0,32	4,39	1,07	54	2	23	47	98
KALE TESTIGO (KALE)	P-21-03013	3,81	0,47	1,01	0,24	2,90	0,84	46	3	22	42	95
AZUL ESPINACA (ESPINACA)	P-21-03014	5,94	0,42	0,53	0,95	9,04	0,32	79	8	48	71	110
PERLA ESPINACA (ESPINACA)	P-21-03015	6,08	0,56	0,38	0,57	7,72	0,34	110	8	52	58	76
ROJO ESPINACA (ESPINACA)	P-21-03016	5,44	0,38	0,59	0,86	8,91	0,31	95	7	54	82	164
TESTIGO ESPINACA (ESPINACA)	P-21-03017	5,51	0,42	0,37	0,54	6,89	0,27	121	7	50	47	91

-----ÚLTIMA LÍNEA-----

OBSERVACIÓN: ENVIAR A tati.gutierrezrojas@gmail.com

B.C. Marghela Blanco M.
N.I. 2468
Gestoría de Calidad

Ing. Agr. Michael González A.
N.I. 7827
Gestoría Técnica

1. Las unidades están expresadas en base seca, en masa/masa. 2. Procedimiento: N por combustión seca en Autoanalizador de acuerdo al M-N; P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO₃ y determinación por Espectrometría de Emisión Atómica con Plasma (ICP) de acuerdo al M-ICP. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo con validez legal es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libere al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Anexo 3. Valores de pH y conductividad eléctrica (CE) de las soluciones nutritivas hidropónicas preparadas para los cultivos de espinaca y kale, durante los periodos de mayor y menor radiación en Alajuela, Costa Rica.

Solución medida	Periodo			
	Mayor radiación		Menor radiación	
	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)
Madre A	2,80	E	2,57	2831
Madre B	6,00	640	6,59	672
Madre C	2,00	918E	1,86	248
Tanque diluido	6,10	1570	5,80	1688
Cinta de riego	6,20	1580	5,18	1600
Lixiviado	---	---	5,64	1642

Anexo 4. Promedios de la cantidad de plantas obtenidas para cada categoría comercial del cultivo de espinaca (*S. oleracea* L.) a los 50 días después de trasplante según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Categoría de calidad comercial		
		Primera	Segunda	Tercera
Mayor radiación	Azul	0,00	3,33 a	5,67 a
	Perla	0,00	2,33 a	3,67 a
	Rojo	0,00	1,00 a	3,00 a
	Testigo ¹	----	----	----
Menor radiación	Azul	1,33 a	4,67 a	0,00
	Perla	3,00 a	3,67 a	0,33
	Rojo	3,33 a	2,67 a	0,00
	Testigo	2,00 a	3,33 a	0,00

Distintas letras indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

¹ Datos no disponibles.

Anexo 5. Promedios de la cantidad de plantas obtenidas para cada categoría comercial del cultivo de kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) a los 49 días después de trasplante según los distintos colores de mallas utilizadas, durante los periodos de mayor y menor radiación.

Periodo	Color de malla	Categoría de calidad comercial		
		Primera	Segunda	Tercera
Mayor radiación	Azul	5,67 a	0,33 a	0,00
	Perla	5,33 a	0,67 a	0,00
	Rojo	5,67 a	0,33 a	0,00
	Testigo	5,67 a	0,33 a	0,00
Menor radiación	Azul	2,33 a	3,67 a	0,00
	Perla	5,67 a	0,33 a	0,00
	Rojo	5,00 a	1,00 a	0,00
	Testigo	5,00 a	1,00 a	0,00

Distintas letras indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

Anexo 6. Crecimiento de la espinaca (*Spinacia oleracea* L.) bajo los tratamientos con mallas de colores azul (D), perla (C), rojo (A) y testigo (B) durante el periodo de menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.



Anexo 7. Crecimiento del kale (*B. oleracea* var. *sabellica* L.) bajo los tratamientos con mallas de colores azul (D), perla (C), rojo (A) y testigo (B) durante el periodo de menor radiación en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica.

