

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO



RESPUESTA DE LA FRESA (*FRAGARIA* × *ANANASSA*) A LA APLICACIÓN DE  
GLUTAMATO EN DIFERENTES ESPECTROS FOTOSINTÉTICOS EN UN  
SISTEMA DE AGRICULTURA DE INTERIOR Y EN INVERNADERO

TESIS

Presentada por MIGUEL ANGEL MENDOZA LUGO como requisito parcial para  
obtener el Grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

RESPUESTA DE LA FRESA (*FRAGARIA* × *ANANASSA*) A LA APLICACIÓN DE  
GLUTAMATO EN DIFERENTES ESPECTROS FOTOSINTÉTICOS EN UN  
SISTEMA DE AGRICULTURA DE INTERIOR Y EN INVERNADERO

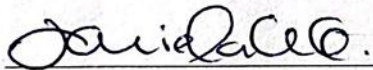
Tesis

Elaborada por MIGUEL ÁNGEL MENDOZA LUGO como requisito parcial para  
obtener el Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE  
PRODUCCIÓN con la supervisión y aprobación del comité de asesoría.



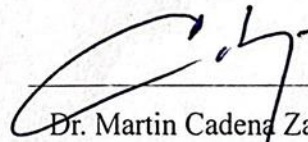
Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Director de Tesis



Dra. Daniela Alvarado Camarillo

Asesor



Dr. Martin Cadena Zapata

Asesor



Dr. Antonio Flores Naveda

Subdirector de Postgrado

UAAAN

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi alma mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por permitirme la formación profesional que son la base para llevar a cabo los estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado y el apoyo económico otorgado, permitiéndome concluir este proyecto y los estudios de maestría.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar por su confianza, disposición, paciencia y apoyo durante este proceso para el término del proyecto y los estudios, así mismo por su invaluable conocimiento, equipo, material y herramientas compartidas.

A la Dra. Daniela Alvarado Camarillo por el espacio otorgado para llevar a cabo este proyecto de investigación, la facilidad y flexibilidad para trabajar.

Al Dr. Martin Cadena Zapata por los conocimientos, disposición, apoyo y revisión de este mismo.

A Karma Verde Fresh, por facilitar los equipos y financiar el proyecto de investigación dentro del laboratorio de agricultura vertical, gracias a Leo Lobato Kelly, Co fundador y CEO; Rafael Cuellar, Co fundador y presidente y Kenneth Moskal CEO y Socio.

A los compañeros que colaboraron dentro del laboratorio para llevar a cabo este proyecto de investigación.

## **DEDICATORIA**

A Dios, por permitirme concluir esta etapa satisfactoriamente teniendo presente a todas las personas importantes de mi vida.

A mi madre por ser mi apoyo incondicional a lo largo de mi vida, impulsándome día con día para salir adelante, gracias a ella lo logré.

A mi padre por ser un ejemplo de superación, apoyarme y estar para mí.

A mis hermanos por ser una parte fundamental en mi vida, han sido mi ejemplo a seguir a lo largo de mi vida.

A mi compañera de vida por ser parte de mi camino a lo largo de este tiempo, ser mi apoyo y fortaleza para salir adelante día con día siendo mi motor para sobrellevar día a día.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	<b>vii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>Objetivo General</b> .....	<b>4</b>
<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>4</b>
<b>Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
<b>Generalidades del cultivo</b> .....	<b>5</b>
<b>Descripción morfológica</b> .....	<b>6</b>
<b>Sistema radicular</b> .....	<b>6</b>
<b>Tallo</b> .....	<b>6</b>
<b>Flor</b> .....	<b>6</b>
<b>Hoja</b> .....	<b>6</b>
<b>Fruto</b> .....	<b>7</b>
<b>Manejo del cultivo</b> .....	<b>7</b>
<b>Condiciones ambientales</b> .....	<b>7</b>
<b>Fotoperiodo</b> .....	<b>8</b>
<b>Temperatura</b> .....	<b>8</b>
<b>Humedad relativa</b> .....	<b>8</b>
<b>Sustrato</b> .....	<b>8</b>
<b>Potencial de hidrogeno (pH) y Conductividad eléctrica (CE)</b> .....	<b>9</b>
<b>Nutrición</b> .....	<b>9</b>
<b>Sistemas hidropónicos</b> .....	<b>9</b>
<b>Raíz Flotante</b> .....	<b>10</b>
<b>Técnica de película nutritiva</b> .....	<b>10</b>
<b>Subirrigación</b> .....	<b>10</b>
<b>Aeroponía</b> .....	<b>11</b>
<b>Agricultura vertical</b> .....	<b>11</b>
<b>Iluminación LED</b> .....	<b>11</b>

<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>12</b>
<b>Sitio del experimento</b> .....	12
<b>Sistema vertical interior</b> .....	13
<b>Tratamientos con luz verde y ácido glutámico</b> .....	13
<b>Parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad del fruto</b> .....	15
<b>Actividad fotosintética</b> .....	15
<b>Química analítica</b> .....	15
<b>Fenólicos totales</b> .....	15
<b>Flavonoides</b> .....	16
<b>Antioxidantes</b> .....	16
<b>ABTS</b> .....	16
<b>DPPH</b> .....	17
<b>FRAP</b> .....	17
<b>Azúcares totales</b> .....	17
<b>Antocianinas</b> .....	18
<b>Diseño experimental y análisis estadístico</b> .....	18
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>19</b>
<b>Rendimiento de la fruta y atributos de calidad</b> .....	19
<b>Crecimiento de las plantas y biomasa</b> .....	23
<b>Propiedades fitoquímicas y antioxidantes</b> .....	25
<b>Actividad fotosintética</b> .....	28
<b>DISCUSIÓN</b> .....	<b>30</b>
<b>CONCLUSIÓN</b> .....	<b>36</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>37</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1. Caracterización espectral de lámparas LED que contienen proporciones variables de luz azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) y roja (600-700 nm), densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), integral de luz diaria (DLI) y fotoperíodo. ....</b>	<b>14</b>
<b>Cuadro 2. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el diámetro del fruto y la capacidad antioxidante mediante el procedimiento DPPH en frutos de fresa.....</b>	<b>22</b>
<b>Cuadro 3. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el peso fresco de las partes de la planta y el diámetro de la copa en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. ....</b>	<b>25</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución espectral relativa de la luz de las lámparas LED ubicadas en el sistema vertical interior utilizado para el estudio en fresa medida con un espectrorradiómetro a 20 cm. ....	14
<b>Figura 2.</b> Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el rendimiento y el número de frutos en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. ....	20
<b>Figura 3.</b> Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la longitud del fruto, el peso y los sólidos solubles totales en plantas de fresa. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con diferentes letras indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $p < 0.05$ . ....	21
<b>Figura 4.</b> Distribución de la clase de peso de la fruta afectada por la aplicación de la aplicación exógena de ácido glutámico en plantas de fresa cultivadas iluminadas con diferente proporción de luz verde (G) y azul (B) (%). ....	22
<b>Figura 5.</b> Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre los parámetros de crecimiento radicular en plantas de fresa. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $P < 0.05$ . ....	24
<b>Figura 6.</b> Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la concentración de azúcares totales y antocianinas en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. Las barras representan el error estándar de la media Los símbolos seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $P < 0.05$ . ....	26
<b>Figura 7.</b> Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la concentración de fenoles y flavonoides en frutos de plantas de fresa. Las columnas con diferentes letras indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $p < 0.05$ . ....	27
<b>Figura 8.</b> Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la capacidad antioxidante en plantas de fresa frutales. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $P < 0.05$ . ....	28
<b>Figura 9.</b> Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico sobre la tasa neta de fotosíntesis, la concentración interna de $CO_2$ , la conductancia estomática y la tasa de transpiración en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. Los símbolos seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con $P < 0.05$ . ....	29

## RESUMEN

RESPUESTA DE LA FRESA (*FRAGARIA* × *ANANASSA*) A LA APLICACIÓN DE GLUTAMATO EN DIFERENTES ESPECTROS FOTOSINTÉTICOS EN UN SISTEMA DE AGRICULTURA DE INTERIOR Y EN INVERNADERO

Por:

MIGUEL ANGEL MENDOZA LUGO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR-DIRECTOR

Saltillo, Coahuila

Noviembre 2025

La producción en sistemas alternativos son una respuesta ante los crecientes problemáticas que enfrenta la agricultura tradicional, como el cambio climático y la contaminación ambiental y suelos. Los sistemas de agricultura vertical permiten continuar con la producción y extenderlo verticalmente, obteniendo una mayor producción. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta de la fresa a la aplicación de ácido glutámico en diferentes concentraciones (0, 150 y 300 ppm) bajo un sistema de iluminación LED. Los resultados muestran que las plantas que expuestas a un bajo porcentaje de luz verde (0.8%) + (33%) de luz azul, presentaron un rendimiento de 49% menor que las plantas que se expusieron a un (26 %) de luz verde + (13%) de luz azul. Sin embargo, al aplicar ácido glutámico a 300 ppm incrementó el rendimiento, siendo similar a lo obtenido en las plantas expuestas a altos porcentajes de luz verde en combinación con 150 ppm de ácido glutámico, la cual fue la que obtuvo el mejor rendimiento. De igual forma, la presencia de ácido glutámico provocó un incremento en el peso del fruto, disminuyendo la cantidad de frutos de menos de 10 gr, en cuanto al intercambio de gases hubo una mayor actividad fotosintética en las plantas con mayor exposición a luz verde en combinación con la aplicación de 150 ppm de ácido glutámico, obteniendo  $15.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; la actividad antioxidante también fue afectada por la presencia de ácido glutámico en combinación con diferentes espectros fotosintéticos, aunque tuvieron comportamientos diferentes para el caso de las antocianinas, la mayor concentración se obtuvo plantas expuestas a un menor porcentaje de luz verde, caso contrario a el contenido total de fenoles y flavonoides donde los valores más altos se obtuvieron en plantas expuestas a un mayor porcentaje de luz verde en combinación con la aplicación de 150 ppm de ácido glutámico. El ácido glutámico puede ser utilizado como un bioestimulante para mejorar aspectos de rendimiento y calidad, la concentración de 150 ppm de ácido glutámico fue la más estable, sin embargo, se identificó que la concentración 300 ppm bajo escenarios extremos de ausencia de luz.

**Palabras clave:** Agricultura vertical, bioestimulante, ácido glutámico, iluminación LED.

**ABSTRACT**

RESPONSE OF STRAWBERRY (FRAGARIA × ANANASSA) TO THE  
APPLICATION OF GLUTAMATE IN DIFFERENT PHOTOSYNTHETIC SPECTRA  
IN AN INDOOR AND GREENHOUSE FARMING SYSTEM

BY

MIGUEL ÁNGEL MENDOZA LUGO

MASTER OF SCIENCE IN ENGINEERING IN PRODUCTION SYSTEMS  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DR. LUIS ALONSO VALDEZ AGUILAR-ADVISOR

Saltillo, Coahuila

November 2025

Production in alternative systems is a response to the growing problems faced by traditional agriculture, such as climate change and environmental and soil pollution. Vertical farming systems allow production to continue and extend vertically, obtaining greater production. The objective of this research was to evaluate the response of strawberries to the application of glutamic acid in different concentrations (0, 150 and 300 ppm) under an LED lighting system. The results show that plants exposed to a low percentage of green light (0.8%) + (33%) blue light, had a 49% lower yield than plants that were exposed to (26%) green light + (13%) blue light. However, when glutamic acid was applied at 300 ppm, the yield increased, being similar to that obtained in plants exposed to high percentages of green light in combination with 150 ppm of glutamic acid, which was the one that obtained the best yield. Similarly, the presence of glutamic acid caused an increase in the weight of the fruit, decreasing the number of fruits of less than 10 gr. In terms of gas exchange there was a greater photosynthetic activity in plants with greater exposure to green light in combination with the application of 150 ppm of glutamic acid, obtaining  $15.1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ; The antioxidant activity was also affected by the presence of glutamic acid in combination with different photosynthetic spectra, although they had different behaviors in the case of anthocyanins, the highest concentration was obtained in plants exposed to a lower percentage of green light, contrary to the total content of phenols and flavonoids where the highest values were obtained in plants exposed to a higher percentage of green light in combination with the application of 150 ppm of glutamic acid. Glutamic acid can be used as a biostimulant to improve aspects of performance and quality, the concentration of 150 ppm of glutamic acid was the most stable. However, it was identified that the concentration of 300 ppm extreme scenarios of absence of light.

**Keywords:** Vertical farming, biostimulant, glutamic acid, LED lighting.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de fresas (*Fragaria × ananassa* Duch) en México es de considerable importancia, contribuyendo con el 3% del producto interno bruto agrícola (SIACON, 2019). Los principales productores de fresas son China (35.3%), Estados Unidos (15.3%) y México (8.2%), sin embargo, México es un importante exportador, abasteciendo una parte sustancial del mercado mundial (SIAP 2023). Los frutos de la fresa son ricos en compuestos minerales, antioxidantes, vitamina C, ácidos orgánicos y ácido fólico, entre otros componentes valiosos, que refuerzan el sistema inmunológico, mejorando así la salud y ayudando en la prevención de numerosas enfermedades (Santoyo y Martínez, 2010; Afrin et al., 2016).

En los sistemas agrícolas convencionales, los agricultores enfrentan numerosos factores que afectan la productividad (Kosai et al., 2019), por lo tanto, se postula que el modelo agrícola tradicional empleado actualmente se verá afectado en última instancia, ya que el equilibrio entre el crecimiento de la población y el área limitada para la producción de alimentos será insuficiente para satisfacer las demandas del mercado (Despommier, 2010; Benke y Tomkins, 2017). En México, la producción de fresa actualmente se ve afectada por variables que conducen a una disminución de los rendimientos y la calidad. La aparición de plagas y enfermedades, junto con los fenómenos climáticos extremos como las temperaturas elevadas y las sequías, constituyen los principales desafíos para el cultivo de fresa, además de que la migración de la población a las zonas urbanas conducirá a la pérdida constante de tierras agrícolas (Viljoen y Bohn, 2005).

La agricultura vertical en interior presenta una alternativa viable para controlar las plagas y las duras condiciones que impiden el rendimiento de los cultivos, así como para resolver la disminución de la tierra accesible para la producción de alimentos (Despommier, 2010; Benke y Tomkins, 2017). La agricultura vertical en interior aborda factores críticos de producción al utilizar el espacio vertical para lograr una alta densidad de plantas y, cuando se integra con métodos de cultivo sin suelo, estos sistemas mejoran la calidad y la productividad, lo que resulta en cultivos superiores a costos de producción reducidos en espacios limitados (Ozeker et al., 1999). Los factores ambientales cruciales que influyen en la producción de cultivos incluyen condiciones óptimas de luz, humedad y temperatura.

Estos aspectos se pueden sustituir con equipo especializado, replicando así lo óptimo. Las granjas verticales interiores necesitan equipo especializado para replicar las condiciones ambientales óptimas, incluida la luz, que se sustituye por iluminación artificial producida por diodos emisores de luz (LED) (Hidaka et al., 2013). La luz es el factor principal que influye en el desarrollo de las plantas, ya que interactúa con procesos metabólicos como la fotosíntesis, que impacta directamente en el rendimiento del cultivo (Yoshida et al., 2016) Se ha demostrado que las lámparas LED recrean eficazmente la iluminación óptima en granjas verticales de interior, manteniendo la fotosíntesis dentro del rango ideal para la producción de rendimientos favorables al mejorar el desarrollo, el crecimiento foliar, la biomasa y los parámetros de calidad (Hidaka et al., 2013). A pesar de que la agricultura vertical de interior tiene un enorme potencial para asegurar una población mundial en aumento, la alta demanda de energía, los costos de capital y la limitación en la variedad de cultivos a cultivar son desafíos importantes para lograrlo (Ahamed et al., 2023).

Recientemente, algunos investigadores han enfatizado el problema de que la agricultura vertical de interior puede tener un alto costo debido al alto consumo de energía para iluminación, aire acondicionado, etc. Avgoustaki et al. (2020) señalaron que la iluminación de una granja vertical representa el 80% de los costos totales de electricidad, por lo que es necesario optimizar la luz en las granjas verticales para reducir los costos operativos mediante la manipulación del fotoperiodo, la densidad del flujo de fotones fotosintéticos y la calidad de la luz a través de la distribución de los espectros de luz. Se ha demostrado ampliamente que el efecto de los espectros de luz afecta el crecimiento y el metabolismo de las plantas; Dou et al. (2020) demostraron que la fotosíntesis en albahaca morada (*Ocimum basilicum* Red Rubin) y col rizada verde (*Brassica napus* var. pabularia) se correlacionó positivamente con las proporciones de luz azul, ya que hubo un aumento en la concentración de clorofila, pero se suprimió la elongación del tallo, la expansión de las hojas y la biomasa de los brotes. Otro enfoque planteado por Avgoustaki et al. (2020) sugiere el uso de iluminación intermitente para disminuir el consumo de energía; los autores probaron que las plantas de albahaca no exhibieron efectos nocivos en la tasa de crecimiento o la producción de biomasa cuando se iluminaron durante 10 minutos por hora repetidos durante períodos de 4 horas. Sin embargo, a pesar de la evidencia que muestra que la reducción de la iluminación o la modificación del balance

espectral de la luz puede permitir la producción de plantas de buena calidad, es posible que se imponga cierto grado de estrés a las plantas en tales entornos al afectar el crecimiento de la planta y los procesos fisiológicos como la fotosíntesis, la regulación de las estomas, la actividad antioxidante, etc.

Los aminoácidos son compuestos que intervienen en procesos metabólicos y de transporte, así como en la síntesis de muchas sustancias, incluyendo aminas, alcaloides, vitaminas y enzimas (Ibrahim et al., 2010). Funcionan también como osmolitos en la modulación de la apertura estomática en respuesta a estresores que impactan a la planta (Rai 2002). Los aminoácidos sirven como bioestimulantes efectivos para mitigar el daño del estrés, representando una técnica realista para sostener la productividad del cultivo en medio de un estrés ambiental impredecible (Miller et al., 2007; Calvo et al., 2014; Colla y Rouphael, 2015; Bulgari et al., 2019) debido a su capacidad para activar tanto el metabolismo primario como el secundario (Lv et al., 2009; Serna-Rodríguez et al., 2011; Fabbrin et al., 2013). El ácido glutámico es un aminoácido que se utiliza solo o combinado con otros aminoácidos, como el ácido aspártico y la alanina, en la síntesis de bioestimulantes (Colla et al., 2015). El ácido glutámico facilita los procesos de germinación y desarrollo de las plantas (Qiu et al., 2020), y es un precursor para la síntesis de otros aminoácidos esenciales, incluyendo prolina, lisina, alanina y serina (Alfosea-Simón et al., 2021). Las investigaciones indican una respuesta favorable en la actividad fotosintética y la funcionalidad foliar de las plantas tras la aplicación de ácido glutámico, atribuida a la mejora de los compuestos nitrogenados (Lv et al., 2009; Serna-Rodríguez et al., 2011; Fabbrin et al., 2013; Röder et al., 2018), y provoca una elevación en la concentración de clorofila (Mazher et al., 2011). Dado que el uso de ácido glutámico como bioestimulante mitiga notablemente el daño fisiológico inducido por el estrés ambiental, potenciando la funcionalidad del antioxidante de la planta enzimas (Haghighi, 2012), proponemos que puede proporcionar una mayor tolerancia al estrés lumínico causado por la iluminación LED marginal en granjas verticales interiores causada por una densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) deficiente o una distribución espectral. Se ha informado que la densidad de flujo de fotones fotosintéticos en el rango de luz verde mejora la tasa de fotosíntesis en las plantas (Liu y van Iersel, 2021), lo que se ha corroborado en la fresa (Avendaño-Abarca et al., 2024).

### **Objetivo General**

- Evaluar el rendimiento y calidad de fresa a la exposición de espectros verde y azul de radiación fotosintéticamente activa y la aplicación exógena de ácido glutámico.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar el efecto de la radiación verde en el rendimiento y calidad en fresa.
- Definir la concentración óptima de ácido glutámico para mejorar el crecimiento, capacidad antioxidante y fotosíntesis de fresa en agricultura de interior.

### **Hipótesis**

- La aplicación de glutamato y balances de luz azul y luz verde aumenta los parámetros de crecimiento, fotosíntesis y capacidad antioxidante de fresa en un sistema de agricultura de interior.

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Generalidades del cultivo

El nombre de fresa proviene del latín *fragans*, es utilizada en las zonas templadas y subtropicales, el cultivo de fresa ha sido reconocida desde antiguas civilizaciones como los romanos (213-149 a.C.) quienes reportaron tanto el sabor como sus propiedades medicinales (Ruiz, 2012). El género *Fragaria* forma parte de los géneros de plantas silvestres, las variedades más utilizadas en la actualidad provienen de un cruce entre dos especies (*Fragaria virginiana* y *Fragaria chiloensis*), la fresa es una planta herbácea que pertenece a la familia de las rosáceas del género *Fragaria*, dentro de este género existen diversas especies cultivadas, incluyendo variedades silvestres que fueron domesticadas para ser aprovechadas (Bianchi, 2018).

Las fresas y especies pertenecientes al género *Fragaria* L son de la familia Rosaceae, subfamilia Rosoideae, tribu Potentilleae, subtribu Fragariinae (U.S National Plant Germplasm System, 2006). Los antecedentes del cultivo fueron estudiados por G. Darrow en el libro “The Strawberry” (1966), donde se expone como es que surgió la especie *F. x ananassa*, siendo esta la variedad más utilizada a lo largo de los años para explotar su producción. Se relata el cruce entre diversas especies del género *Fragaria* hasta obtener una planta hermafrodita con una buena producción, las especies que cumplieron con las expectativas fueron *F. virginiana* y *F. chiloensis*, cuyos frutos obtenidos fueron superiores a los conocidos en esa época (Kirschbaum, 2017).

El origen de la especie es complejo, sin embargo, la producción y reproducción de variedades es un proceso simple, que explica la existencia de un gran número de variedades las cuales son reproducidas de acuerdo con las necesidades propias del cultivo en el entorno en el que se encuentran (Ruiz, 2012). La planta está conformada por un tallo pequeño de tendencia rastrera y hojas de forma peciolada de color verde en el haz y color blanco en el envés. La flor está formada por pétalos de color blanco con un gineceo de color amarillo (Chiqui et al., 2010). El tallo también es denominado como corona, que consiste en una estructura comprimida en forma de roseta, cubierto por hojas basales, del cual emergen más hojas en intervalos muy cortos (Ruiz, 2012).

### **Descripción morfológica**

La planta es una especie de tipo perenne catalogada como herbácea de tipo leñosa con bajo porte y un follaje de hojas compuestas que puede ser reproducida de forma sexual y asexual (SIAP, 2018) las partes de la planta son:

#### **Sistema radicular**

Está compuesto por raíces principales gruesas que cumplen la función de anclaje de la planta y almacenamiento, mientras que las raíces jóvenes de color blanco se encargan de la absorción de agua y nutrientes (Kirschbaum et al., 2015). Las raíces pueden alcanzar una profundidad de 50 cm dependiendo de las condiciones en las que se encuentra el cultivo, las raíces son fibrosas de desarrollo superficial, alcanzando una extensión lateral de 30 cm (Kirschbaum, 2017).

#### **Tallo**

La planta consta de un tallo principal, es un tallo central del cual emergen las hojas, inflorescencias, y raíces. Es un tallo central comúnmente llamado corona (Kirschbau, 2017). El tallo es corto de tendencia subterránea en forma de rizoma del cual brotan hojas, inflorescencias y estolones, los estolones tienen gran espacio en los entrenudos, en los espacios de estos entrenudos aparecen las hojas y raíces adventicias (Gómez et al., 2023).

#### **Flor**

La flor está conformada por una corola de cinco pétalos blancos y dos cálices (Bianchi, 2018). La flor del cultivo de fresa es hermafrodita, su ciclo de vida se divide en cuatro etapas: 1) cáliz, 2) corola, 3) androceo, y 4) gineceo, la flor cuenta con 10 sépalos en la etapa de cáliz, en la etapa de corola se observan cinco pétalos de color blanco, posteriormente al entrar a la etapa de androceo se desarrollan los estambres, por último, al entrar a la etapa de gineceo se forman los pistilos (Hancock, 1999). Las flores están conformadas por una flor primaria, dos flores secundarias, cuatro flores terciarias y ocho flores cuaternarias (Bianchi, 2018).

#### **Hoja**

Las hojas de la planta son compuestas, comúnmente pinnadas y trifoliadas, es decir tres folíolos del cual el tamaño depende de la variedad y la etapa fenológica (Paucar, 2022). La longevidad de la hoja depende de la variedad y el manejo que se le da al cultivo

(Kirschbaum et al., 2015). Las hojas tienen una filotaxia en forma de espiral, una epidermis en empalizada y estomas en el envés (Heijari et al., 2005). Las hojas nuevas están presentes como primordios foliares, dentro de una yema vegetativa hay de cinco a 10 primordios foliares (Kirschbaum 2017).

### **Fruto**

El aquenio es el fruto verdadero de la planta de fresa, estos son frutos secos indehiscentes que contienen proteínas y lípidos (Darrow, 1966). La parte comestible se denomina falso fruto ya que es un engrosamiento del receptáculo donde se encuentran los aquenios, este engrosamiento surge a partir de la fecundación de los pistilos, esto es fundamental para el crecimiento y engrosamiento del receptáculo (Bianchi, 2018). Este receptáculo es la carnosidad de color rojo que consumimos como fruto hortícola, este está formado por una capa epidérmica, la corteza y la médula está separada por haces vasculares que se encargan de suministrar nutrientes a los embriones (Hancock, 1999).

### **Manejo del cultivo**

Las plantas de fresa se clasifican en diversas variedades, sin embargo, de acuerdo con su respuesta al fotoperiodo se clasifican en variedades de día corto, variedades de día largo y variedades de día neutro (Darrow, 1966). Las variedades más utilizadas en México para producciones extensivas son variedades denominadas de días cortos, las flores se desarrollan en otoño, teniendo así una única floración de forma anual, sin embargo, en algunos lugares si se utilizan variedades de día largo, es decir que se tiene floración a lo largo del verano, sin embargo, el uso de variedades de día largo trae consigo algunas desventajas (Zaragoza, 2013). Los principales países productores son China con 3.2 millones de toneladas y Estados Unidos con 1 millón de toneladas y México con 861 mil de toneladas (Pauca, 2022). El desarrollo del cultivo atraviesa varias etapas desde el crecimiento vegetativo hasta la fase reproductiva como lo es la inducción, iniciación, diferenciación y desarrollo floral (Zaragoza, 2013).

### **Condiciones ambientales**

En el desarrollo del cultivo influyen diversos factores dependientes del medio ambiente, un desbalance de las condiciones ambientales puede provocar un mal desarrollo del cultivo (Martínez, 2004).

### **Fotoperiodo**

El fotoperiodo es una reacción de las plantas a la exposición a la temperatura diaria, este influye en el desarrollo del cultivo (Bianchi, 1999). El fotoperiodo que a su vez esta influenciado por la temperatura influye directamente en la floración y en la emergencia de estolones Durner et al. (1984) realizó estudios en relación con el fotoperiodo, del cual se obtuvieron las clasificaciones de acuerdo con las necesidades del fotoperiodo, dividiéndolas en variedades de día corto, día largo y día neutro.

### **Temperatura**

La fresa es un cultivo con un rango amplio de tolerancia a bajas y altas temperaturas, ya que puede aguantar hasta 2 °C, entrando en un estado de reposo sin dañar las funciones fisiológicas, a temperaturas de 0 °C las plantas presentan daños en flores (Bianchi ,1986). El rango optimo de desarrollo del cultivo oscila entre los 10 °C y los 26 °C, sin embargo, una variación entre las temperaturas puede provocar un retraso o una precocidad en la floración (Ledesma et al., 2008). La planta tiene una tolerancia a altas temperaturas, aunque el rango optimo oscila en los 26 °C, en temperaturas de 34 °C sigue existiendo un buen desarrollo del cultivo, temperaturas superiores a estas provocan una disminución en la calidad del polen, provocando una mala polinización y un desarrollo de frutos de mala calidad (Maroto et al., 1986). Aunque existen variedades que han sido adaptadas a zonas con climas extremos, llegando a tener temperaturas de hasta 55 °C (Zaragoza, 2013).

### **Humedad relativa**

El rango optimo del manejo de humedad relativa para un cultivo de fresa varia de 60% a 75% para llevar a cabo un manejo normal, sin embargo, la producción en valores más bajos o altos se requieren ajustes en estrategias del manejo, sobre todo ante la presencia de enfermedades relacionadas con las humedades relativas altas (Grijalva, 2015).

### **Sustrato**

Los sustratos se definen como medios solidos de origen natural o provenientes de una síntesis mineral, que sirve sustituto de suelo para dar soporte y anclaje a la planta (Terés, 2001). Los sustratos orgánicos más utilizados en la agricultura protegida son la fibra de coco y la turba (Alvarez, 2011), sin embargo, en la agricultura moderna, el uso de

combinaciones de sustratos en diferentes proporciones ha dado como resultado una mejora para el incremento en el rendimiento mejorando (Acuña Caita, 2020).

### **Potencial de hidrogeno (pH) y Conductividad eléctrica (CE)**

El potencial de hidrogeno determina la alcalinidad o acidez de la solución nutritiva utilizada, esto repercute directamente en la absorción y asimilación de los nutrientes, los cultivos sin suelo o cultivos hidropónicos generalmente se manejan en pH's de 5.5 a 5.8 ya que dentro de este rango los iones se encuentran más disueltos y con ello una mejor asimilación. La importancia del pH radica en mantener los iones en forma soluble para ser aprovechados por la planta (Baixxauli y Aguilar, 2002). La medición de CE se realiza para conocer la concentración de sales presentes en el agua, este parámetro es importante para evitar una deficiencia o intoxicación por nutrientes, en general el rango de resistencia a salinidad de los cultivos hortícolas varia de 2 a 3 dS/m, sin embargo, en sistemas hidropónicos el rango ideal de conductividad eléctrica oscila entre 1.5 y 2.5 dS/m (Goswami y Yadav, 2022).

### **Nutrición**

Para desarrollarse de forma correcta las plantas no solo requieren de buenas condiciones ambientales, ya que estas favorecen un buen desarrollo, pero el suministro de agua es realmente importante, así como la disponibilidad de macronutrientes y micronutrientes esenciales para el crecimiento, desarrollo y producción (Casteel, 2004). Los sistemas hidropónicos o de cultivos sin suelo permiten hacer un mejor uso de la fertilización, aplicando los nutrientes que requiere la planta y ajustando la fertilización de acuerdo con la etapa fenológica minimizando y optimizando su uso (Goswami y Yadav, 2022). Las plantas de fresa tienen una alta demanda de nitrógeno y potasio, un balance correcto es crucial para un buen desarrollo, un mal balance puede resultar en bajo rendimiento y mala calidad (Hancock, 1999).

### **Sistemas hidropónicos**

Los sistemas hidropónicos son técnicas o sistemas que forman parte de los cultivos sin suelo, sistemas aislados del suelo que utilizan diferentes sustratos de origen orgánico e inorgánico en el que se suministran los nutrientes necesarios para el desarrollo de un cultivo por medio del agua de riego denominado solución nutritiva (Rodríguez, 2005).

Los primeros registros relacionados con un sistema hidropónico se pueden observar en culturas antiguas en el territorio mexicano, con los aztecas cultivando en balsas denominadas chinampas, posteriormente en los años 1600 y 1690; los científicos Boyle y Woodward realizaron experimentos relacionados con producción de cultivos y agua, pero no fue hasta 1920 que el Dr. Gericke adjudicó el término hidroponía a esta técnica de producción (Oviedo, 2004). La hidroponía es conocida como una técnica que forma parte de los cultivos sin suelo, que se define como un sistema donde un cultivo se desarrolla en un sustrato inerte o acuoso al que se le suministra los nutrientes necesarios (Lara, 2000).

### **Raíz Flotante**

Es una técnica de producción similar a la utilizada por antiguas civilizaciones en México denominadas chinampas que consistían en una balsa flotante. Consiste en un recipiente que contiene una lámina de agua que contiene fertilizantes disueltos, sobre esta lámina de agua se encuentra una lámina de poliestireno con orificios donde son colocadas las plantas (Goswami y Yadav, 2022).

### **Técnica de película nutritiva**

Este sistema hidropónico consiste en canales por donde fluye una película de agua o solución nutritiva denominado NFT, esta solución es bombeada para que la película de agua tenga un flujo constante, dentro de estos canales las plantas son colocadas para que las raíces estén expuestas constantemente con el agua humedeciendo las raíces y aportando aireación, nutrientes y agua (Gilsanz, 2007).

### **Subirrigación**

Es otra técnica de cultivos sin suelo que se combina con hidroponía, utilizando sustratos o combinación de sustratos y aplicando fertilizantes por medio de una solución nutritiva. Esta técnica consiste en colocar en un contenedor recipientes con sustrato donde son colocadas las plantas, en este contenedor se coloca una lámina de solución nutritiva, por medio de la propiedad de capilaridad, el agua con los fertilizantes disueltos asciende al contenedor donde se encuentran las plantas (Ferrarezi et al., 2015).

### **Aeroponía**

La aeroponía es un sistema hidropónico modernizado, en el cual la planta se encuentra en un contenedor plástico con perforaciones donde se coloca la planta, dentro del contenedor las raíces se encuentran suspendidas, el contenedor se encuentra sellado para limitar el paso de luz, de igual forma se encuentra un sistema de riego por aspersión por medio de nebulización, de este modo el ambiente en el que están suspendidas las raíces manteniendo el ambiente con un 100% de humedad relativa y en completa obscuridad (Lakhiar et al., 2018).

### **Agricultura vertical**

La agricultura urbana es una alternativa ante los problemas ambientales actuales que surge como un sistema de producción alternativo para producir en superficies y espacios que comúnmente no son aprovechables, o en espacios que ya fueron deteriorados por la agricultura tradicional (Viso, 2016). La agricultura vertical tiene como finalidad incrementar la superficie de cultivo sin extender o invadir más espacio que el destinado para producción, esto se logra mediante la producción en niveles, o aplicado de niveles incrementando la superficie plantada de acuerdo con los niveles que se emplean. Una granja consta de distintos componentes que recrean las condiciones óptimas de crecimiento, el uso de diferentes aparatos electrónicos no da un control para replicar condiciones óptimas de temperatura, aireación, humedad, radiación e iluminación (Banke y Tomkins, 2017).

### **Iluminación LED**

El uso de iluminación LED (Light Emitting Diode) es fundamental para la producción en sistemas de agricultura de interior, sustituyendo la luz natural, el desarrollo de la iluminación LED para la producción es de gran importancia para la investigación, ya que permite manejar el espectro fotosintético de acuerdo con las necesidades de cada cultivo y etapa fenología en la que se encuentra (Dutta Gupta, 2017). En la agricultura moderna, el uso de luz LED ha sido fundamental para los sistemas de cultivos de interior, controlando la radiación PAR (Photosynthetically active radiation) que emite longitudes de onda de

400 a 700 nanómetros (nm), rango en el cual las plantas responden para realizar procesos fotosintéticos (Benke y Tomkins, 2017).

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio del experimento

La investigación se realizó en el Laboratorio de Agricultura Vertical de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Saltillo, Coahuila, México, situado en la latitud 25°21'24" N y longitud 101°02'05" W, a una altura de 1765 msnm. La primera actividad para realizar fue la adaptación del laboratorio, realizando una limpieza profunda y desinfección del espacio, posteriormente se procedió al acomodo de los muebles (racks) donde se colocarían las plantas. Se colocaron los niveles deseados para llevar a cabo el trabajo. Una vez que el rack estaba listo se procedió al acomodo de lámparas LED necesarias en cada nivel para obtener el espectro deseado a manejar. Una vez que el laboratorio de agricultura vertical quedó listo se procedió con el trasplante.

Se utilizaron plantas de fresa de la variedad San Andreas que se trasplantaron el 24 de agosto de 2023 a contenedores de 3 L utilizando un sustrato preparado con una mezcla (80 % / 20 % v/v) de turba de sphagnum (Premier Horticulture Inc., Quakertown, PA, EE. UU.) y perlita de calidad hortícola (Hortiperl, Monterrey, México). El pH y la CE del sustrato se ajustaron a 5.8 y 0.25 dS·m<sup>-1</sup>, respectivamente. La densidad de plantación fue de 13 plantas m<sup>-2</sup>.

El riego se realizó cuando la tensión hídrica del sustrato era de 8 cb (Irrometer modelo MLT, Riverside, CA, EE. UU.). La concentración de la solución nutritiva se ajustó según el estado fenológico de las plantas. La solución de nutrientes a su máxima potencia contenía: 9 meq L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 1 meq L<sup>-1</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, 5 meq L<sup>-1</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 4 meq L<sup>-1</sup> K<sup>+</sup>, 9 meq L<sup>-1</sup> Ca<sup>2+</sup>, 2 meq L<sup>-1</sup> Mg<sup>2+</sup>, 5,3 mg L<sup>-1</sup> Fe-EDTA, 0,4 mg L<sup>-1</sup> Zn-EDTA, 2,6 mg L<sup>-1</sup> Mn-EDTA, 0,5 mg L<sup>-1</sup> Cu-EDTA, 0,2 mg L<sup>-1</sup> B (Na<sub>2</sub> [B<sub>4</sub> O<sub>5</sub> (OH)<sub>4</sub>] · 8H<sub>2</sub>O), y 0,2 mg L<sup>-1</sup> Mo (Na<sub>2</sub> MoO<sub>4</sub>). Desde la fecha del trasplante y hasta 34 días después del mismo, el riego se realizó con la solución al 25% (CE de 0.75 dS m<sup>-1</sup> y pH de 5.8); desde los 34 días después del trasplante hasta observar las primeras flores se aumentó la concentración al 50% (CE de 1.5 dS m<sup>-1</sup> y pH de 5.6), y posteriormente al 100% (CE de 2.2 dS m<sup>-1</sup> y pH

de 5.7). La aplicación de ácido glutámico (Jalmek, Ácido Glutámico L, Escobedo NL, México) se inició a los 56 días después del trasplante en tres concentraciones: 0, 150 y 300 mg L<sup>-1</sup> y se asperjaron al follaje cada 15 días hasta la terminación del experimento.

### **Sistema vertical interior**

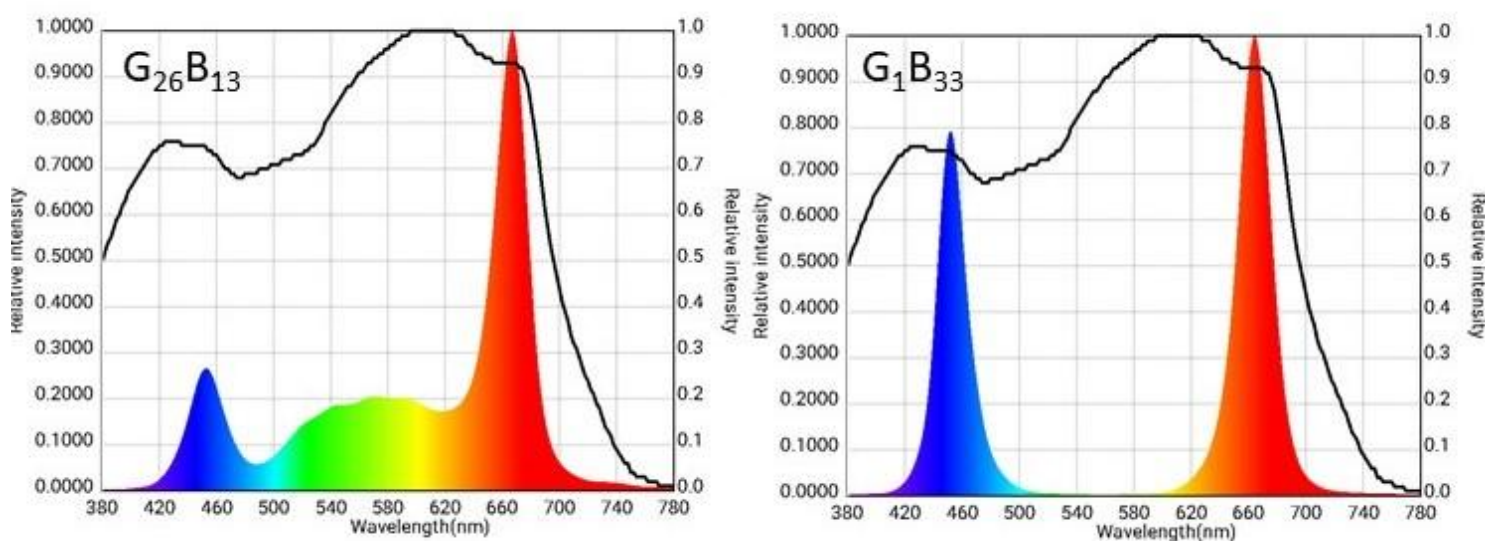
Las plantas se colocaron en dos niveles separados 0.60 m dentro de un rack de 1.72 m de largo, 0.80 m de ancho y 2.45 m de alto (Karma Verde Fresh modelo KVF7, Monterrey, México). La temperatura del sistema interior se mantuvo a 24 °C durante el día y 17.0 °C durante la noche utilizando un minisplit de 1 tonelada (Whirlpool, modelo WA5260Q, MI, EE. UU.). La humedad relativa se ajustó a 60% ± 5%, con un humidificador ultrasónico de 0.5 L·h<sup>-1</sup> (modelo MXCUD-001-001; Mist Cloud, Atizapán, México) y un extractor de 25 cm de diámetro conectado a un controlador de humedad digital programable (IHC-200; Inkbird Tech, Guangdong, China). Los ventiladores circulantes mantuvieron la circulación del aire dentro del laboratorio y mantuvieron una concentración promedio de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) de 351 ± 45 ppm (Telaire modelo 7001; Amphenol Advanced Sensors, St. Marys, PA, EE. UU.).

### **Tratamientos con luz verde y ácido glutámico**

El sistema de iluminación consistió en lámparas LED colocadas en la parte superior de cada nivel. Las lámparas LED se caracterizaron con un espectrorradiómetro (ASENSETEK, modelo ALP-01, LIGHTING PASSPORT, Taiwán) con un rango de medición de 380 nm a 780 nm con una precisión de ± 3%. La PPFD promedio y la distribución espectral se midieron segmentando cada nivel en cuadrantes de 26.7 cm × 29.7 cm a 30 cm de la fuente de luz. La caracterización de las lámparas LED y la distribución y balance del espectro utilizados en esta investigación se muestran en la Tabla 1 y la Figura 1 lo que resultó en dos tratamientos de luz. Una lámpara LED tuvo una proporción de luz verde de 0.8% mientras que la otra tuvo un 26% de luz verde (Tabla 1). La proporción de luz roja fue comparable entre ambas lámparas LED, mientras que la luz azul fue de 33% y 13%, respectivamente.

**Cuadro 1.** Caracterización espectral de lámparas LED que contienen proporciones variables de luz azul (400-500 nm), verde (500-600 nm) y roja (600-700 nm), densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD), integral de luz diaria (DLI) y fotoperíodo.

Lámparas LED	Azul	Verde	Rojo	PPFD $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	DLI $\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$	Fotoperíodo
	%					Horas
G <sub>1</sub> B <sub>33</sub>	33.20	0.83	65.98	278.71	11.04	11
G <sub>26</sub> B <sub>13</sub>	12.59	26.11	61.30	353.31	11.45	9



**Figura 1.** Distribución espectral relativa de la luz de las lámparas LED ubicadas en el sistema vertical interior utilizado para el estudio en fresa medida con un espectrorradiómetro a 20 cm.

### **Parámetros de crecimiento, rendimiento y calidad del fruto.**

El experimento finalizó el 4 de mayo de 2024. Se cosecharon las plantas y se cortaron en secciones de raíz, corona y hojas. Las partes de las plantas se secaron en un horno a 70 °C durante 72 horas. La respuesta de las plantas a los tratamientos se determinó midiendo el diámetro de la corona y la raíz, así como el peso seco de coronas, raíces y hojas. La cosecha de frutos comenzó el 4 de noviembre de 2023, cuando los frutos alcanzaron entre el 85 % y el 100 % de color rojo. Los sólidos solubles totales (SST) de los frutos se midieron con un refractómetro (ATAGO, Máster-53T, EE. UU.).

### **Actividad fotosintética**

La tasa fotosintética, la conductancia estomática, la tasa de transpiración y la concentración interna de CO<sub>2</sub> se midieron el 2 de abril de 2024 utilizando un sistema de fotosíntesis portátil (LI-COR Bio-sciences, LI-6400XT, Biosciences, Lincoln, NE, EE. UU.) en hojas jóvenes maduras y completamente expandidas. Las mediciones se realizaron de 10:00 a 12:00 horas y las condiciones ambientales en la cámara del sistema de fotosíntesis portátil se mantuvieron a una concentración de CO<sub>2</sub> de 390 mol<sup>-1</sup>, una temperatura del aire de 29.4 °C y una humedad relativa del 53.1 %.

### **Química analítica**

El análisis químico y las determinaciones de la actividad antioxidante se realizaron en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ubicada en Cuernavaca, Morelos, México. Al finalizar el estudio, se recolectaron los frutos de las plantas y se congelaron a -20 °C. Una muestra de 1 g de frutos congelados se homogeneizó con 12 mL de agua destilada (Ultra Turrax, IKA® T25DS1, Alemania) y se centrifugó a 5000 rpm (ORTOALRESA® DIGICEN 21, España) durante 5 minutos para obtener los extractos. Los extractos para la determinación de antocianinas y flavonoides se obtuvieron con 12 mL de metanol y etanol, respectivamente, en lugar de agua destilada.

### **Fenólicos totales**

La determinación de los fenoles totales se realizó con base en la metodología de Folin-Ciocalteu (Singleton et al., 1999). Se elaboró una curva de calibración utilizando una solución madre de ácido gálico pesando 0.01 g con una concentración de 100 ppm,

tomando diferentes cantidades de la solución para establecer los puntos de la curva. Se mezclaron 500  $\mu$ L del extracto y 2.5 mL de reactivo de Folin- Ciocalteu (1:10 v/v) y se dejaron reposar durante 5 minutos, después de lo cual se añadieron 2 mL de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  al 7.5%. Las muestras se agitaron y se colocaron dentro de una cámara de incubación oscura durante 2 horas. Después de la incubación, las muestras se colocaron en celdas de cuarzo y se leyó la absorbancia a 760 nm en el espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific® Genesys G10s, China).

### **Flavonoides**

La curva de calibración se realizó con quercetina, reactivo de pureza del 95 % (Sigma-Aldrich®, Alemania) según la metodología descrita por Arvouet-Grand et al. (1994). Se preparó una solución madre de quercetina, de la que se tomaron diferentes cantidades para los puntos de la curva. Se tomaron 2 mL de los extractos para la determinación de flavonoides, previamente preparados con metanol y mezclados con 2 mL de tricloruro de aluminio al 2 %, se agitaron y se dejaron reposar en oscuridad durante 10 minutos. Transcurrido el tiempo de incubación, las muestras se colocaron en cubetas de cuarzo y se leyó la absorbancia a 415 nm en un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific® Genesys G10s, China).

### **Antioxidantes**

#### **ABTS.**

La actividad antioxidante se evaluó mediante el método ABTS, según lo indicado por Re et al. (1999), empleando ácido ascórbico para la curva estándar. Las soluciones se prepararon mezclando ácido ABTS (2,2'-azino-bis-(3-etilbenzotiazolina-6-sulfónico) a 7 mM y persulfato de potasio ( $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  a 2.45 mM) en una proporción 1:1 en un recipiente ámbar, que luego se colocó en una placa de agitación (LABTECH®, LMS/1003) durante 16 horas. Posteriormente, se midió la absorbancia en un espectrofotómetro (THERMO FISHER SCIENTIFIC® GENESYS G10S, CHINA) a 734 nm y ajustando la reactivación con etanol al 20% hasta obtener una lectura de  $0.7 \pm 0.02$ . Para realizar la reacción, se colocaron 100  $\mu$ L de extracto de muestra en un tubo de ensayo y se agregaron 3 mL de la solución ABTS ajustada, se agitó en un vórtex (DAIGGER® G-560, Estados Unidos) y se dejó reposar durante 15 minutos en oscuridad total. Finalmente, se leyó la absorbancia en el espectrofotómetro a 734 nm.

### **DPPH**

La capacidad antioxidante mediante la metodología DPPH (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) indicada por (Kuskoski et al., 2005) se midió utilizando ácido ascórbico para la calibración de la curva estándar. La solución de DPPH se preparó con metanol al 80% y se agitó durante 3 horas. Luego, la solución se midió con un espectrofotómetro a 517 nm y se calibró a una lectura de  $0.7 \pm 0.02$ . La reacción involucró 100  $\mu$ L del extracto de muestra y 3 mL de la solución de DPPH ajustada, que se incubó en la oscuridad durante 30 minutos, después de lo cual se midió la absorbancia a 517 nm utilizando un espectrofotómetro (THERMO FISHER SCIENTIFIC® GENESYS G10S, CHINA).

### **FRAP**

El poder antioxidante reductor férrico (FRAP) se evaluó según Benzie y Strain (1996). Se utilizó ácido ascórbico para la curva estándar que oscilaba entre 0 y 100 mg L<sup>-1</sup>. Para preparar el reactivo FRAP, se combinaron 25 mL de solución de acetato de sodio (0.3 mM, pH ajustado a 3.6 con ácido clorhídrico 40 mM) con 2,5 mL de cloruro férrico hexahidratado (30 mM), seguido de la adición de 2.5 mL de solución de TPTZ (2,4,6-Tris(2-piridil)-s-triazina a 10 mM). En la reacción, se introdujeron 100  $\mu$ L del extracto de muestra en un tubo de ensayo, seguido de la adición de 1.9 mL del reactivo FRAP. A continuación, la mezcla se agitó vigorosamente con un vórtice (DAIGGER® G-560, EE. UU.) y se incubó durante 30 minutos en una estufa de secado (LUZEREN®, DHG9070A) a 37 °C. Finalmente, se determinó la absorbancia a 593 nm con el espectrofotómetro (THERMO FISHER SCIENTIFIC® GENESYS G10S, CHINA).

### **Azúcares totales**

La cuantificación de azúcares totales se realizó siguiendo la metodología descrita por Whitham et al. (1971), utilizando glucosa para la calibración de la curva. Las muestras se extrajeron utilizando etanol al 80% y se refrigeraron durante 7 días. Luego, 1 mL del extracto se evaporó en una placa calefactora (Labtech ®, Lms /1003) y se añadieron 20 mL de agua destilada. Luego se transfirió una alícuota de 1.5 mL a tubos de reacción y se añadieron 3 mL de antrona. Los tubos de reacción se colocaron en un baño de hielo debido a la reacción exotérmica. Luego se sumergen en un baño de agua durante 5 minutos en

una placa calefactora (Labtech®, Lms /1003). Las muestras se dejaron enfriar antes de colocarlas en celdas de cuarzo para su análisis en el espectrofotómetro a una absorbancia de 600 nm (Thermo Fisher Scientific® Genesys G10s, China). Al calibrar la curva con glucosa, se utilizaron las lecturas del espectrómetro para calcular los azúcares totales.

### **Antocianinas**

La cuantificación de antocianinas (Lee et al., 2005), no necesita una curva de calibración; se requieren dos soluciones tampón, pH 1.0 y pH 4.5. La solución tampón de pH 1 se prepara disolviendo 1.86 g de KCl en 980 mL de agua destilada. Posteriormente, el pH se ajusta a 1.0 ( $\pm 0.05$ ) utilizando HCl al 10% y se diluye hasta un volumen final de 1000 mL. La solución tampón de pH 4.5 se prepara disolviendo 54.43 g de acetato de sodio trihidratado en 960 mL de agua destilada y ajustando el pH a 4.5 ( $\pm 0.05$ ) utilizando HCl al 10% y luego diluyendo hasta un volumen final de 1000 mL.

Para preparar los extractos, se homogeneizan 1.0 g de tejidos de fruta con 10 mL de solución tampón a pH 1.0; De forma similar, se pesa 1.0 g de tejido de fruta y se homogeneiza con 10 mL de solución tampón a pH 4.5. Los extractos se filtran con papel de filtro mediante un embudo y se centrifugan a 5000 rpm durante 5 minutos. La absorbancia se registra con un espectrofotómetro (Thermo Fisher Scientific® Genesys G10s, China) a longitudes de onda de 520 y 700 nm para los extractos de solución a pH 1,0 o 4,5. El agua destilada sirve como muestra de control.

### **Diseño experimental y análisis estadístico**

El estudio se realizó mediante un diseño de bloques aleatorizados con arreglo factorial. Un factor fue la concentración de ácido glutámico y el otro la proporción de luz verde y azul proporcionada por las lámparas LED. Cada tratamiento contuvo seis repeticiones de una sola planta. Se realizó un análisis de varianza (SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.) con los datos recopilados y, cuando se detectó significancia estadística, se realizó una prueba de comparación de medias múltiple mediante la prueba de Duncan ( $p < 0.05$ ).

## RESULTADOS

### Rendimiento de la fruta y atributos de calidad

El rendimiento total de la fruta se vio afectado por la proporción de luz verde y ácido glutámico. Las plantas de fresa que recibieron una baja proporción de luz verde tuvieron en promedio una reducción del 49% en el rendimiento de la fruta en comparación con la de las plantas que recibieron una alta proporción de luz verde, mientras que el ácido glutámico mejoró la productividad de la fruta (Figura 2). La interacción significativa sugiere que el mayor rendimiento se obtuvo con  $150 \text{ mg L}^{-1}$  de ácido glutámico en las plantas iluminadas con una alta proporción de luz verde, sin embargo, se requirió una mayor concentración de ácido glutámico ( $300 \text{ mg L}^{-1}$ ) para obtener un aumento significativo en el rendimiento de las plantas deficientes en luz verde (Figura 2). Los resultados mostraron que, a esta concentración, el ácido glutámico puede compensar las condiciones estresantes de las plantas cultivadas bajo luz verde casi nula, ya que su rendimiento ( $1534,7 \text{ g m}^{-2}$ ) fue comparable al de las plantas control ( $1939,1 \text{ g m}^{-2}$ ) que recibieron una mayor proporción de luz verde sin aplicaciones de ácido glutámico.

El menor rendimiento de frutos en plantas deficientes en luz verde se asoció con una reducción del 37% en el número de frutos producidos (Figura 2), sin embargo, la interacción significativa muestra que en estas plantas hubo un aumento significativo en el número de frutos producidos cuando se roció con ácido glutámico a  $300 \text{ mg L}^{-1}$ , siendo comparable al de las plantas que recibieron mayores proporciones de luz verde.

La longitud (Figura 3) y el diámetro (Tabla 2) de los frutos no se vieron afectados por las proporciones de luz verde o ácido glutámico; sin embargo, los frutos producidos por las plantas deficientes en luz verde fueron de menor peso (Figura 3). El ácido glutámico mejoró la longitud y el peso de los frutos, así como los sólidos solubles totales cuando se aplicó a  $150 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 3). La proporción de luz verde no afectó la distribución de frutos según su clase de peso; sin embargo, el ácido glutámico redujo la proporción de frutos de bajo peso ( $<10 \text{ g}$ ) mientras que aumentó la de frutos de  $10 - 15 \text{ g}$  y  $15 - 20 \text{ g}$  (Figura 4).

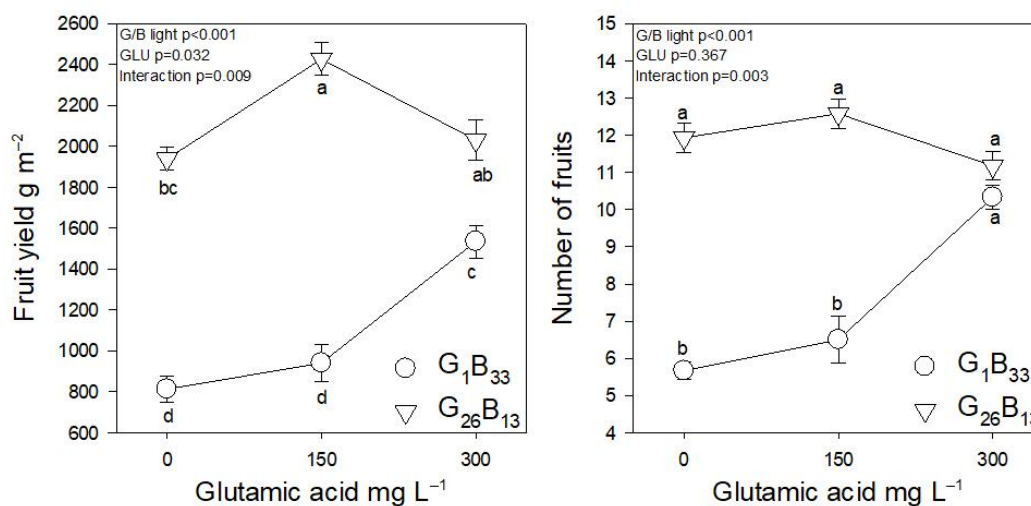


Figura 2. Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el rendimiento y el número de frutos en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior.

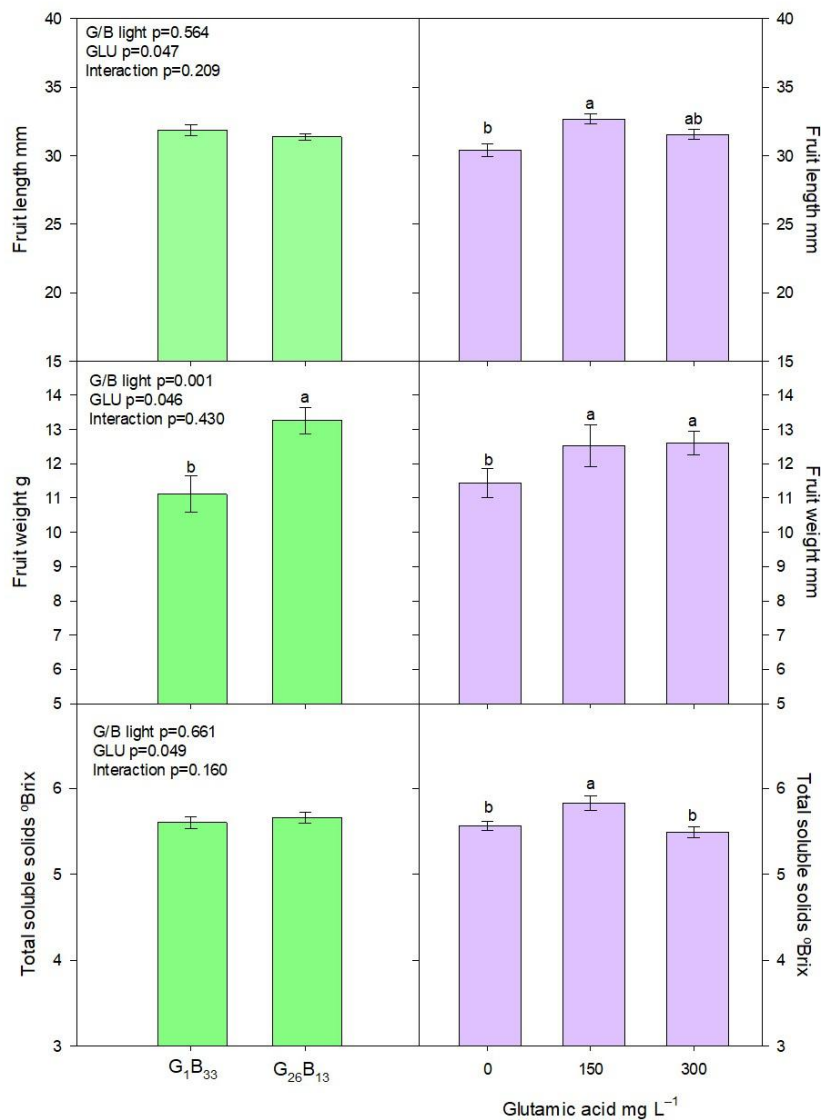


Figura 3. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la longitud del fruto, el peso y los sólidos solubles totales en plantas de fresa. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con diferentes letras indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $p < 0.05$ .

**Cuadro 2.** Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el diámetro del fruto y la capacidad antioxidante mediante el procedimiento DPPH en frutos de fresa.

		Diámetro de Fruto Mm	DPPH mg g <sup>-1</sup>
LEDs	G <sub>1</sub> B <sub>33</sub>	23.0	1.06
	G <sub>26</sub> B <sub>13</sub>	22.4	1.17
GLU mg L <sup>-1</sup>	0	23.1	1.04
	150	22.0	1.20
	300	22.6	1.17
ANOVA	LEDs	P=0.186	P=0.156
	GLU	P=0.156	P=0.207
	Interacción	P=0.363	P=0.408

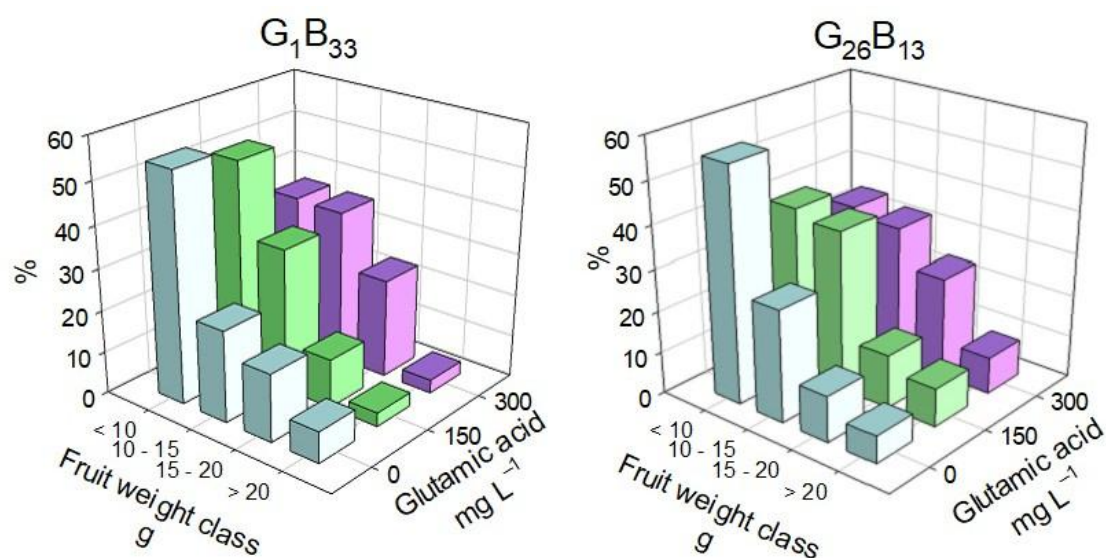


Figura 4. Distribución de la clase de peso de la fruta afectada por la aplicación de la aplicación exógena de ácido glutámico en plantas de fresa cultivadas iluminadas con diferente proporción de luz verde (G) y azul (B) (%).

### **Crecimiento de las plantas y biomasa**

El peso fresco total de las plantas fue mayor en las plantas deficientes en luz verde y aumentó cuando se aplicó ácido glutámico, sin embargo, este aumento se asoció con el aumento del peso fresco de la raíz (Figura 5), ya que los pesos frescos foliares y de copa no se vieron afectados (Tabla 3). Otros parámetros relacionados con el crecimiento radicular, como la longitud y el volumen de la raíz, fueron menores en las plantas deficientes en luz verde y en las tratadas con ácido glutámico (Figura 5).

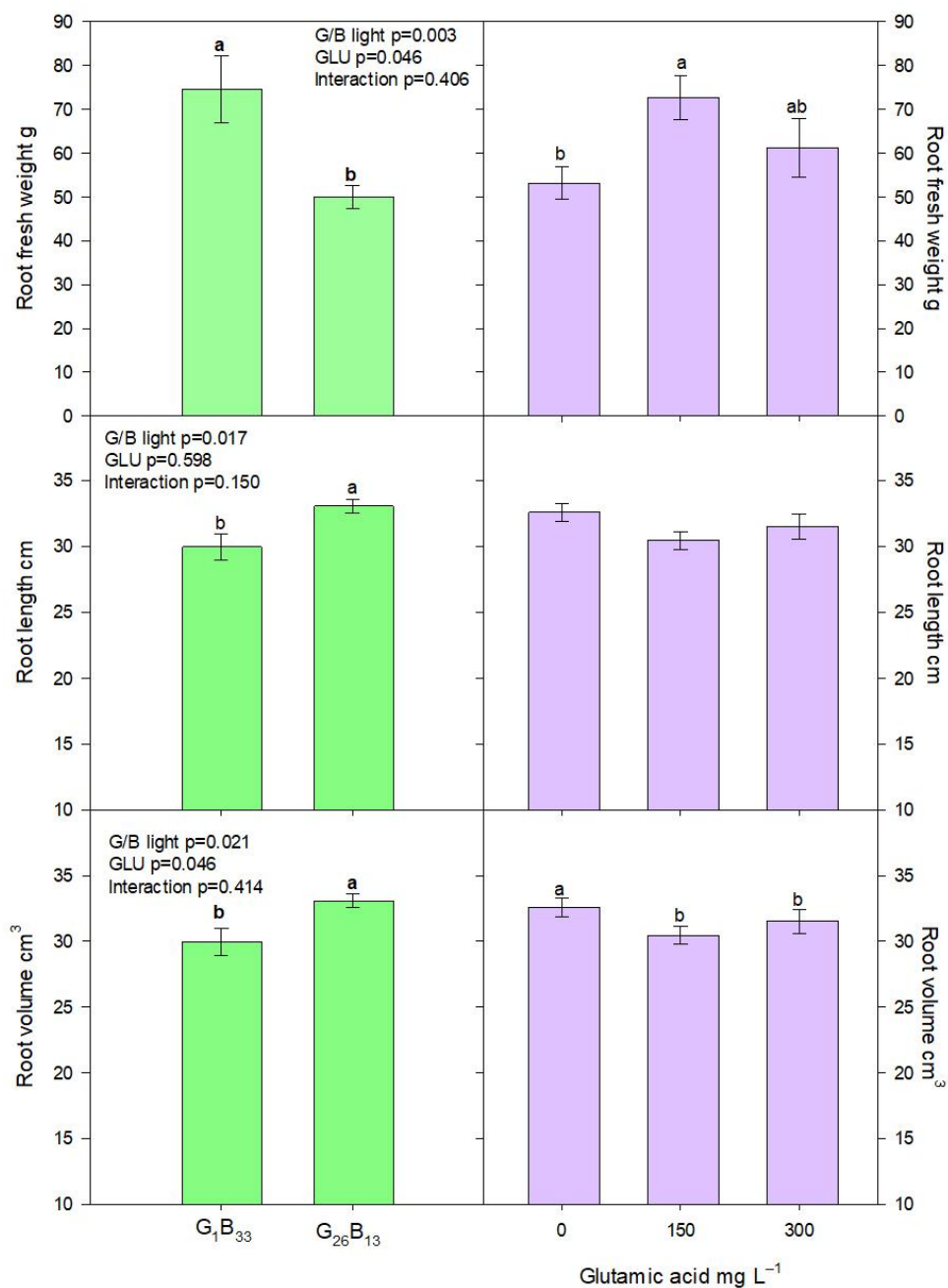


Figura 5. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre los parámetros de crecimiento radicular en plantas de fresa. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $P < 0.05$ .

**Cuadro 3.** Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre el peso fresco de las partes de la planta y el diámetro de la copa en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior.

		Peso Fresco de Hoja g	Peso Fresco de Corona g	Diámetro de Corona mm
LEDs	G <sub>1</sub> B <sub>33</sub>	36.6	15.3	11.7
	G <sub>26</sub> B <sub>13</sub>	31.0	16.1	12.5
GLU mg L <sup>-1</sup>	0	28.5	16.3	12.1
	150	37.1	17.3	13.2
	300	33.1	13.8	11.3
ANOVA LEDs		P=0.140	P=0.698	P=0.548
ANOVA GLU		P=0.149	P=0.344	P=0.384
Interacción		P=0.253	P=0.327	P=0.075

#### Propiedades fitoquímicas y antioxidantes

Las frutas cosechadas de plantas con deficiencia de luz verde contenían concentraciones más altas de azúcares totales cuando no se aplicó ácido glutámico, sin embargo, las plantas con deficiencia de luz verde se vieron más favorecidas ya que la concentración de antocianinas respondió de manera más marcada en comparación con aquellas con una mayor proporción de luz verde (Figura 6). Los frutos de fresa de plantas bajo deficiencia de luz verde mostraron concentraciones más altas de flavonoides, mientras que el ácido glutámico hizo que los fenoles aumentaran (Figura 7). La capacidad antioxidante medida por FRAP fue menor en plantas deficientes en luz verde, aunque el ácido glutámico causó un aumento cuando se midió con el ABTS (Figura 8). La capacidad antioxidante medida por DPPH no se vio afectada significativamente.

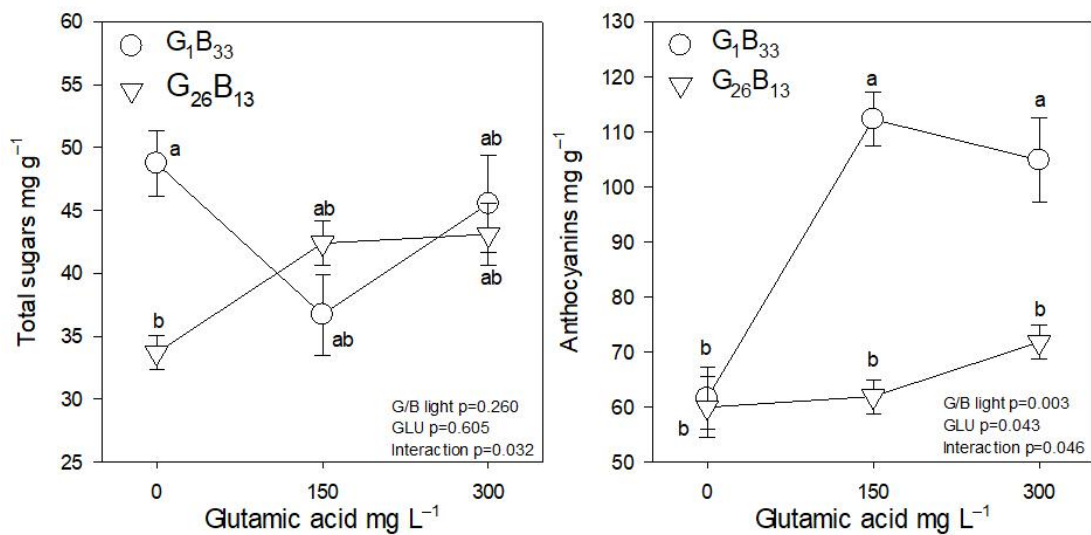


Figura 6. Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la concentración de azúcares totales y antocianinas en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. Las barras representan el error estándar de la media. Los símbolos seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $P < 0.05$ .

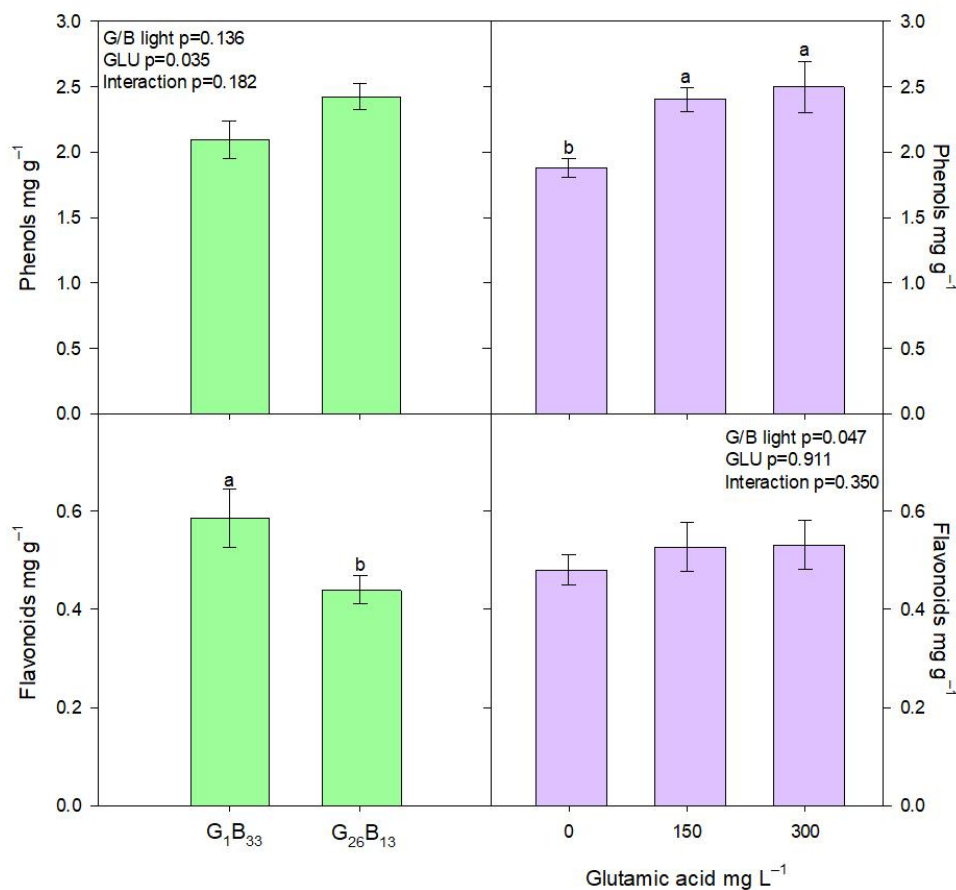


Figura 7. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la concentración de fenoles y flavonoides en frutos de plantas de fresa. Las columnas con diferentes letras indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $p < 0.05$ .

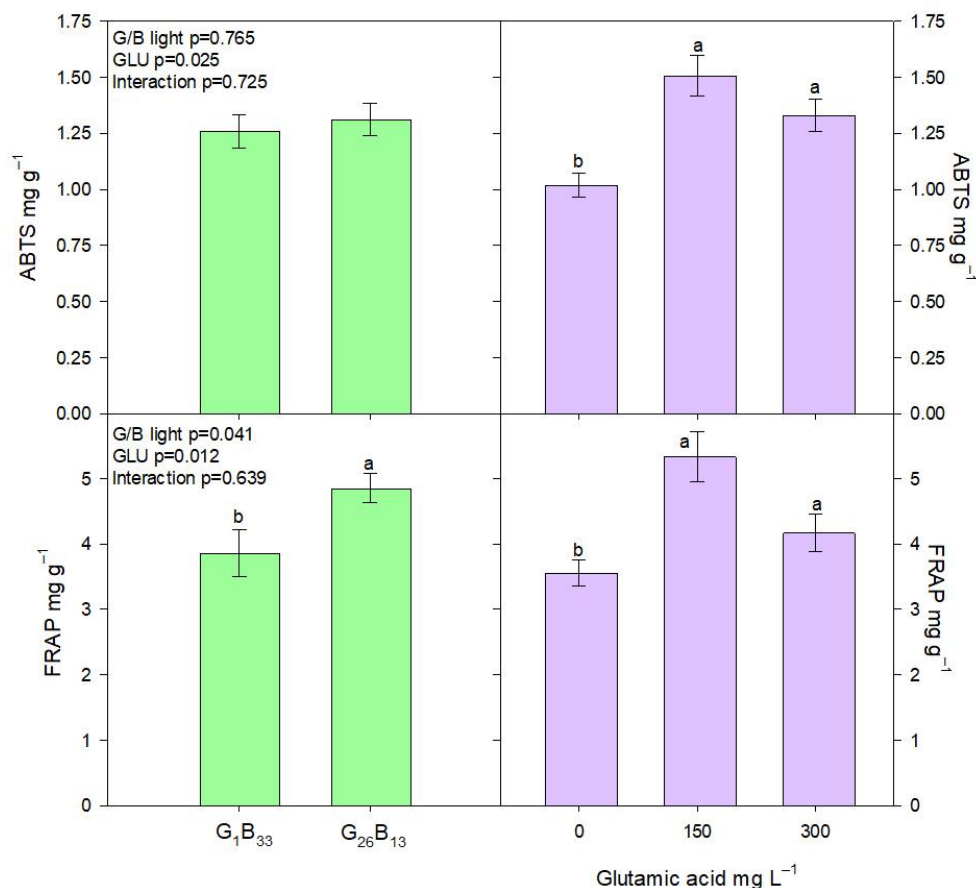


Figura 8. Efectos de la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico (GLU) sobre la capacidad antioxidante en plantas de fresa frutales. Las barras representan el error estándar de la media. Las columnas con letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $P < 0.05$

### Actividad fotosintética

Las plantas deficientes en luz verde exhibieron una tasa fotosintética reducida en relación con aquellas con una mayor proporción de luz verde (Figura 9); por el contrario, la tasa de transpiración y la concentración interna de CO<sub>2</sub> fueron elevadas en las plantas deficientes en luz verde (Figura 9). El ácido glutámico mejoró la fotosíntesis y la concentración interna de CO<sub>2</sub> en plantas con proporciones de luz verde más altas, sin embargo, en plantas deficientes en luz verde, ambos parámetros de intercambio de gases disminuyeron (Figura 9). Por el contrario, la transpiración en general aumentó tanto en las

plantas deficientes en luz verde como en las expuestas a una mayor proporción de luz verde, aunque estas últimas tuvieron una reacción más pronunciada al ácido glutámico (Figura 10). El ácido glutámico a 150 mg L<sup>-1</sup> hizo que la conductancia estomática aumentara tanto en las plantas con deficiencia de luz verde como en las de luz verde alta, pero cuando se aplicó a 300 mg L<sup>-1</sup> hubo una disminución en esta respuesta, que fue más notable en las plantas con deficiencia de luz verde (Figura 9).

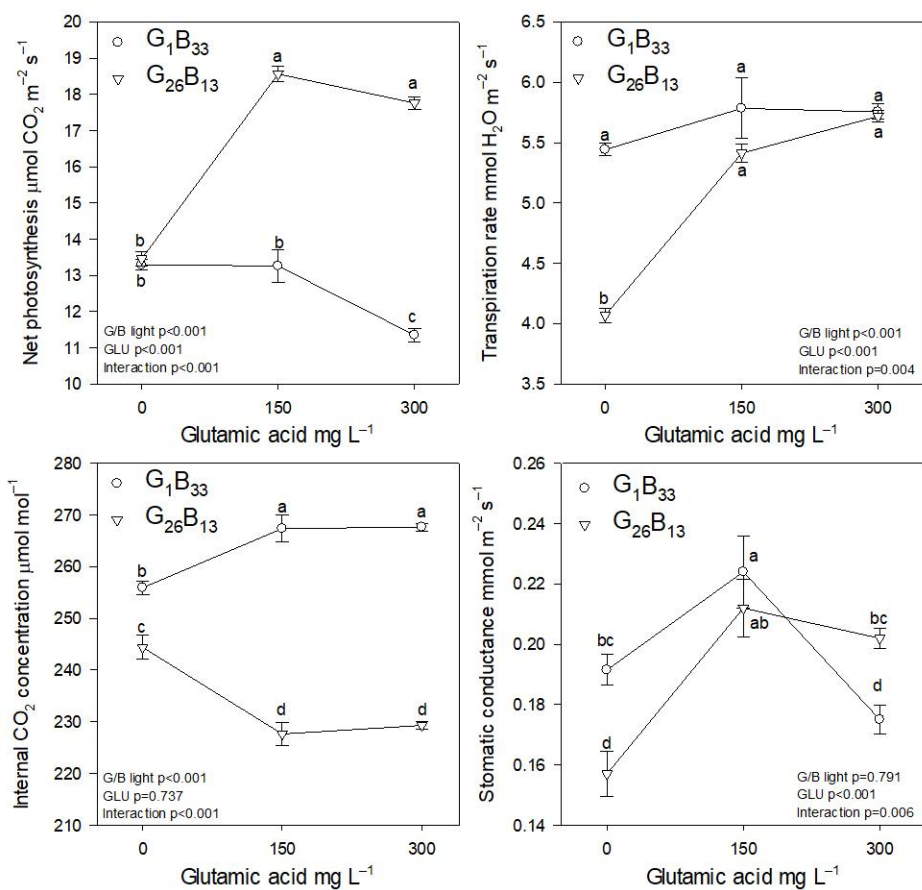


Figura 9. Efectos de la interacción entre la proporción de luz verde (G) y azul (B) (%) y la aplicación exógena de ácido glutámico sobre la tasa neta de fotosíntesis, la concentración interna de CO<sub>2</sub>, la conductancia estomática y la tasa de transpiración en plantas de fresa cultivadas en una granja vertical de interior. Los símbolos seguidos de letras diferentes indican diferencias significativas según el procedimiento de comparación múltiple de Duncan con  $P < 0.05$ .

## DISCUSIÓN

Las plantas de fresa expuestas a una alta proporción de luz verde demostraron un mayor rendimiento de frutos en comparación con las sometidas a poca luz verde; Sin embargo, la proporción de luz verde no influyó en el crecimiento de la corona o aérea. A diferencia de los componentes aéreos de las plantas, la biomasa de las raíces disminuyó cuando las plantas se sometieron a una gran cantidad de luz verde, a pesar de un aumento en la longitud y el volumen de las raíces. Nuestros hallazgos se alinean con estudios que demuestran que aumentar la luz verde del 7% al 39% mejoró el rendimiento de la fruta del tomate (*Solanum lycopersicum*); sin embargo, la biomasa de hojas y tallos también mostró un aumento (Kaiser et al., 2019). Se ha determinado que el impacto de la luz verde varía según la especie; afecta positivamente a la lechuga (*Lactuca sativa*) y a los microgreens, mientras que afecta negativamente al tomate y la albahaca (Chen et al., 2024). Nuestros hallazgos indican que el sistema radicular sirvió como órgano sumidero en plantas expuestas a poca luz verde, pero en plantas sometidas a luz verde alta, los órganos sumideros fueron los frutos. Se ha documentado que la adición de un 30% de luz verde al espectro azul y rojo facilita el enraizamiento de los portainjertos de tomate al mejorar el transporte de auxinas desde las hojas hasta la zona de enraizamiento (Li et al., 2021). Este fenómeno puede dilucidar el aumento observado en la longitud de la raíz y la ramificación, lo que resulta en un mayor volumen, mientras que la disminución de la biomasa puede atribuirse a una asignación reducida de carbohidratos.

La respuesta de las plantas a la luz verde se considera una reacción normal a circunstancias de poca luz, lo que facilita la adaptación para el crecimiento cerca de otras plantas o debajo de su follaje (Wang y Folta, 2013). A pesar de los hallazgos inconsistentes con respecto a la influencia de la luz verde en la regulación de la floración fotoperiódica, se ha establecido que, en ciertas especies de días largos, el aumento de la densidad de flujo de fotones verdes de cero a  $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  aceleró la floración, mientras que en las especies de días cortos, resultó en un retraso (Meng y Runkle, 2019). Se ha documentado que la luz verde contrarresta la influencia de la luz azul en la aceleración de la inducción de flores a través de un receptor de criptocromo 2 (Wang y Folta, 2013), como lo demuestra un retraso en la floración de *Arabidopsis* (Banerjee et al., 2007). Sin embargo, la luz verde ocasionalmente facilita la floración en otras especies (Wang y Folta, 2013). En las fresas,

la floración está influenciada por la temperatura y el fotoperíodo (Durner, 2015). Ciertos cultivares se clasifican como plantas de día corto, mientras que otros se identifican como plantas de día neutro (García y Kubota, 2017). El cultivar de fresa utilizado en este estudio, San Andreas, se clasifica como una planta de día neutro / siempre productiva, y se informa que su rendimiento y cantidad de frutos no se ven afectados por las proporciones de luz azul (Stuemky y Uchanski, 2020). Sin embargo, nuestros hallazgos indicaron que el rendimiento elevado de la fruta se correlacionó con mayores proporciones de luz verde y un mayor número de frutos por planta, lo que sugiere que la luz verde contribuye a mejorar las tasas de desarrollo de la fruta, como lo demuestra un aumento del 19% en el peso individual de la fruta o la maduración completa de las frutas de las flores. La calidad de las frutas de fresa se vio afectada por la proporción de luz verde. En las plantas que carecían de tratamientos con ácido glutámico, alrededor del 55% de los frutos cosechados pesaban menos de 10 g cada uno, independientemente de si las plantas se cultivaron en condiciones de luz verde alta o baja. Sin embargo, la proporción de frutos en el rango de 10 a 15 g aumentó del 22% al 27% en las plantas expuestas a luz verde elevada, mientras que las plantas sometidas a luz verde baja mostraron un mayor porcentaje de frutos más grandes, con un 16% en el rango de 15 a 20 g, en comparación con solo el 11% en plantas en condiciones de luz verde alta. La mayor aparición de frutos grandes en plantas con poca luz verde puede estar asociada con una disminución del rendimiento de frutos, lo que lleva a una menor competencia por nutrientes, agua y reservas entre ellos (Liu et al., 2024). Rosa et al. (2023). También informó que las aplicaciones foliares y en el suelo de ácido glutámico mejoran significativamente la calidad de la zanahoria (*Daucus carota* Subsp. *Sativus*), lo que resulta en una mayor proporción de raíces comercializables, mientras que Abou-Zaid y Eissa. (2019). Se observó un aumento de la calidad en las vides sin semillas de Thompson (*Vitis Vinifera*).

Las fresas se consideran frutas de alta calidad para el consumo humano debido a su rico contenido de sustancias químicas fisiológicamente activas, incluidos fenólicos, antocianinas, flavonoides y otros antioxidantes que ofrecen protección contra el daño oxidativo (Milosavljević et al., 2022). El estudio actual reveló que las plantas expuestas a una fuerte luz verde exhibieron una mayor actividad antioxidante según lo determinado por FRAP; sin embargo, no se observó tal aumento utilizando los métodos ABTS o DPPH.

Además, el contenido total de azúcar y los niveles de flavonoides disminuyeron, mientras que los niveles de antocianinas se mantuvieron sin cambios Dou et al. (2020). Encontró que la capacidad antioxidante total y el contenido de flavonoides en las hojas de albahaca verde y morada, mostaza roja (*Brassica juncea*) y col rizada roja (*Brassica oleracea* Var. Sabellica) disminuyeron cuando se agregó luz verde a los espectros de luz roja y azul, mientras que la mostaza roja y la col rizada verde no se vieron afectadas. Bian et al. (2016) mostraron que exponer las plantas de lechuga a la luz verde junto con luces rojas y azules bajo iluminación continua no alteró la actividad antioxidante según lo evaluado por el método DPPH, mientras que Fan et al. (2023) demostraron que la exposición a la luz verde a una integral de luz diaria de  $12.96 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  resultó en una disminución de la concentración de azúcares totales en los frutos de tomate, corroborando nuestros hallazgos; Esta reducción en la concentración de azúcares totales altera el perfil de sabor de las frutas al mejorar el sabor agrio.

Estudios recientes indican la importancia de la luz verde en la fotosíntesis (Liu y van Iersel, 2021), ya que mejora la fijación neta de carbono en las áreas del dosel sometidas a una sombra sustancial y en las regiones más profundas del mesófilo (Smith et al., 2017). Mochizuki et al. (2019). Mostró que la influencia de la luz verde en la mejora de la fotosíntesis neta es más pronunciada tanto en las superficies adaxial como abaxial de las hojas jóvenes de fresa, incluso a bajas densidades de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD) de  $100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Por el contrario, las hojas maduras requieren niveles más altos de PPFD ( $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) para lograr un aumento notable en el lado abaxial. La presente investigación no encontró influencia de la luz verde en la tasa fotosintética neta; sin embargo, las cantidades elevadas de luz verde condujeron a una reducción de la conductancia estomática, la tasa de transpiración y la concentración interna de  $\text{CO}_2$ . Chen et al. (2024) informaron que las plantas exhiben una disminución del 15% en la conductancia estomática, lo que sugiere que la luz verde revierte los efectos de la luz azul en la apertura estomática, lo que es comparable a los resultados obtenidos en el presente estudio. Guiamba et al. (2022) mostraron una mejora en la tasa fotosintética de plantas de fresa expuestas a un 20% de luz verde en comparación con las que no tenían luz verde; el contenido interno de  $\text{CO}_2$  y la tasa de transpiración también fueron elevados. Sin embargo, los hallazgos de Guiamba et al. (2022) se derivaron de luces LED sin luz verde y 20% de

luz verde, ambas con un 30% de luz azul, mientras que nuestra investigación utilizó lámparas con proporciones variables de luz azul (33% en lámparas de luz verde baja y 13% en lámparas de luz verde alta). La ausencia de un efecto sobre la fotosíntesis observada en nuestro estudio se relacionó con una disminución de la conductancia estomática bajo luz verde elevada, lo que indica una disminución en la apertura y/o densidad estomática, lo que resultó en una disminución en los parámetros de intercambio gaseoso, reduciendo así la transpiración y la concentración interna de CO<sub>2</sub>. La disminución de la conductancia estomática y los parámetros de intercambio de gases puede atribuirse a la disminución de las proporciones de luz azul en las lámparas LED de alta luz verde empleadas en nuestra investigación. Innes et al. (2025) indicaron que el 5% de luz azul resultó en una densidad estomática reducida en pepinos (*Cucumis sativus*) en comparación con las plantas expuestas a un 30% de luz azul, lo que se correlacionó con una tasa de transpiración disminuida, mientras que Wei et al. (2020). Demostró que las plantas de fresa exhibían poros estomáticos más grandes y aumentaban la densidad estomática en condiciones de luz azul. En plantas expuestas a luz verde, la aplicación de ácido glutámico a 150 mg L<sup>-1</sup> aumentó el rendimiento de la fruta en un 25%. Por el contrario, en plantas sometidas a baja luz verde, fue necesaria una mayor concentración de ácido glutámico para lograr un rendimiento de fruto comparable al de las plantas no tratadas bajo luz verde elevada, específicamente 1535 g m<sup>-2</sup> y 1939 g m<sup>-2</sup>, respectivamente. La mejora en el rendimiento de las plantas con poca luz verde se correlacionó con un aumento del 82% en la producción de frutos de plantas tratadas con 300 mg L<sup>-1</sup> de ácido glutámico, en contraste con aquellas sin ningún tratamiento. El ácido glutámico puede haber aumentado la productividad de los frutos a través de su función en la asimilación de nitrógeno (Alfosea-Simón et al., 2021), un nutriente directamente relacionado con el número de frutos producidos (Cvelbar Weber et al., 2021). El aumento de la cantidad de frutos puede atribuirse a la función del ácido glutámico en la promoción de la transición de ciertas especies vegetales de la fase de desarrollo vegetativa a la generativa (Almutairi et al., 2022). Por ejemplo, en gerbera (*Gerbera jamesonii*) y arándano (*Vaccinium corymbosum*), la aplicación de ácido glutámico a 4 g L<sup>-1</sup> resultó en una mejora del 69% en la producción de flores sin nitrógeno ni potasio (Farahmandi et al., 2022), y se observó un aumento en los botones florales con ácido glutámico a 500 mg L<sup>-1</sup>.

<sup>1</sup> (Pérez-León et al., 2023), respectivamente. Este fenómeno podría correlacionarse con una mayor formación y rendimiento de frutos. Los hallazgos de este estudio pueden explicarse por un aumento en la cantidad de flores y / o una mayor polinización como resultado de la aplicación de ácido glutámico a plantas cultivadas en condiciones de poca luz verde. Este fenómeno puede atribuirse a las funciones de señalización del ácido glutámico en procesos fisiológicos, incluida la germinación del polen y el crecimiento del tubo polínico debido a su influencia en la formación de canales de  $\text{Ca}^{2+}$ , que facilitan el establecimiento de gradientes de  $\text{Ca}^{2+}$  y gobiernan el crecimiento y la morfogénesis del tubo polínico (Michard et al., 2011; Qiu et al., 2020). Talukder et al. (2018) demostraron que las plantas de fresa expuestas a luces LED con diferentes proporciones de luz roja a azul exhibió un aumento en la producción de frutos y flores cuando se trató con ácido glutámico a  $319 \text{ mg L}^{-1}$ . Indicaron que este aminoácido mitiga los efectos adversos de la toxicidad de la reutilización prolongada de la solución hidropónica y los impactos perjudiciales de la reducción de la intensidad de la luz. Esto implica que, en nuestro estudio actual, el ácido glutámico puede haber contrarrestado parcialmente los efectos de la disminución de la luz verde al mejorar el desarrollo de la fruta. Kwon et al. (2025) También demostraron que la incorporación de ácido glutámico con iluminación LED suplementaria alivia con éxito el estrés causado por temperaturas elevadas y condiciones de luz insuficientes. Se ha documentado que el ácido glutámico mejora la tolerancia a otras condiciones estresantes como la toxicidad del cadmio (Jiang et al., 2020) y el arsénico (Huang et al., 2023) en el arroz (*Oryza sativa*), así como a la salinidad (Lei et al., 2016) y la sequía (Xu et al., 2020) en la canola (*Brassica napus*). El ácido glutámico no influyó en el crecimiento de las partes aéreas de las plantas; sin embargo, se relacionó con un aumento de la biomasa radicular. La arquitectura radicular es una de las funciones de señalización del ácido glutámico, ya que promueve el crecimiento de raíces primarias, aumenta la densidad de las raíces laterales y mejora el alargamiento de las raíces (Qiu et al., 2020). En *Arabidopsis* (*Arabidopsis thaliana*), se ha demostrado que el ácido glutámico inhibe el crecimiento de raíces primarias al tiempo que promueve el desarrollo de raíces laterales cerca de la punta de la raíz primaria (Kim et al., 2010). Por el contrario, en otras especies, la aplicación de ácido glutámico aumenta el peso fresco de la raíz (Ma et al., 2022) al mejorar las rizobacterias promotoras del crecimiento de las plantas y, en

consecuencia, los niveles de auxinas (Ma et al., 2022). Nuestro estudio demostró que el ácido glutámico estimulaba el crecimiento de las raíces, evidenciado por un aumento del 37% en la masa fresca; sin embargo, el volumen de la raíz disminuyó mientras que la longitud de la raíz se mantuvo sin cambios. Esto indica que el crecimiento de las raíces se vio facilitado por una acumulación de reservas de carbohidratos vinculadas a una tasa fotosintética elevada, pero esto también restringió la expansión y proliferación de las raíces laterales. Alfosea-Simón et al. (2021) Informaron una mayor tasa de fotosíntesis en plantas de tomate expuestas a aplicaciones foliares de ácido glutámico a 15 mM. En arroz, Asgher et al. (2022) informaron resultados similares en plantas de arroz con aplicaciones de ácido glutámico a 10  $\mu$ M. Nuestros resultados también mostraron que la fotosíntesis fue mejorada por el ácido glutámico, sin embargo, esta respuesta se observó solo cuando las plantas recibieron lámparas LED que contenían una alta proporción de luz verde, ya que en las plantas con poca luz verde, las aplicaciones de ácido glutámico dieron como resultado una disminución de la tasa de fotosíntesis. El efecto del ácido glutámico sobre la fotosíntesis se ha atribuido a su papel en la potenciación de enzimas como la glutamina sintetasa y la glutamato sintasa (Asgher et al., 2022), que intervienen en la asimilación de N, y a su papel precursor en la síntesis de otros aminoácidos (Kobayashi et al., 2021) y pigmentos de clorofila (Alfosea-Simón et al., 2021) como la clorofila a, clorofila b, y carotenoides (El-Metwally et al., 2022), así como I la síntesis de enzimas que llevan a cabo el proceso fotosintético (Saleem et al., 2024). El hecho de que el ácido glutámico fuera eficaz para mejorar la tasa de fotosíntesis solo cuando se proporcionaba luz verde en altas proporciones puede deberse al efecto de la luz verde en este proceso fisiológico, como se discutió anteriormente. A pesar de la baja tasa de transpiración en las plantas control con luz verde alta, la tasa de transpiración mejorada por glutámico, que se asoció con una mayor conductancia estomática y una concentración interna de CO<sub>2</sub> reducida en dichas plantas; Estas respuestas sugieren que, a pesar de la disminución de la conductancia estomática debido a la baja luz azul, el ácido glutámico promovió la apertura de los estomas, lo que provocó un mayor intercambio de gases que resultó en un menor CO<sub>2</sub> interno debido a su mayor tasa de uso en la fotosíntesis y una mayor pérdida de agua a través de la transpiración. El efecto del ácido glutámico en el aumento de la conductancia estomática ha sido reportado por Alfosea-Simón et al. (2021) y Kwon et al. (2025).

## CONCLUSIÓN

La deficiencia de luz verde resultó en una reducción del rendimiento y el tamaño de la fruta, lo que fue causado por una reducción en el crecimiento de las raíces y el número de frutos desarrollados. La tasa de fotosíntesis no se vio afectada en las plantas bajo luz verde baja, pero otros parámetros de intercambio de gases, como la transpiración y la concentración interna de CO<sub>2</sub>, aumentaron. Este aumento se asoció con una mayor conductancia estomática bajo las proporciones de luz azul más altas cuando las lámparas LED contenían espectros de luz verde bajos. El ácido glutámico restauró parcialmente los rendimientos de frutos en plantas expuestas a luz verde limitada. Esto se asoció con una mayor concentración de antocianinas, así como con una mayor producción de frutos más grandes. El ácido glutámico aumentó la tasa de fotosíntesis solo en plantas cultivadas bajo altas proporciones de luz verde, lo que también se relacionó con un mayor rendimiento de frutos. La aplicación de ácido glutámico dio como resultado frutos con mayor actividad antioxidante y fenoles, independientemente de la proporción de luz verde. En conclusión, el ácido glutámico podría ayudar a mitigar los efectos negativos de la deficiencia de luz verde, apoyando la productividad de la fresa en la agricultura vertical.

## REFERENCIAS

- Abou-Zaid, E. A. A., & Eissa, M. A. (2019). Thompson Seedless grapevines growth and quality as affected by glutamic acid, vitamin B, and algae. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 725–733. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00072-5>
- Acuña Caita, J. F., & Fischer Gebauer, G. (2020). Fresa (*Fragaria × ananassa* Duch.): Manual de recomendaciones técnicas para su cultivo en el departamento de Cundinamarca. Corredor Tecnológico Agroindustrial CTA-2. Recuperado de [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36815/Ver\\_documento\\_36815.pdf](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/36815/Ver_documento_36815.pdf)
- Afrin, S.; Gasparri, M.; Forbes, T. Y.; Reboredo, P.; Mezzetti, B.; Varela, A.; Giampieri, F. & Battino, M. (2016). Promising health benefits of the strawberry: a focus on clinical studies. United States of America. *J. Agric. Food Chem.* 64(22):4435-4449. Doi: 10.1021/acs.jafc.6b00857.
- Ahamed, M.S, Sultan, M., Monfet, D., Rahman, MS, Zhang, Y., Zahid, A., & Achour, Y. (2023). Una revisión crítica sobre el control eficiente del entorno térmico en la agricultura vertical de interior. *Journal of Cleaner Production*, 425, 138923.
- Alfosea-Simón, M., Simón-Grao, S., & Simón, I. (2021). Physiological, nutritional and metabolomic responses of tomato plants after the foliar application of amino acids aspartic acid, glutamic acid and alanine. *Front. Plant Sci.* 11, 581234.
- Almutairi, K.F., Ali, M.M., Ali, W.M., Zhang, X., Sierka, E., Lin, K., Kalaji, H.M., Telesinski, A., Yousef, A.F., & Guiamba, H. (2022). Growth performance of guava trees after the exogenous application of amino acids glutamic acid, arginine and glycine. *Horticulturae*, 8, 1110. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8121110>
- Alvarez, M. (2011). Hidroponía. Una guía esencial para cultivo en agua de frutas, hortalizas y plantas florales. Buenos Aires, Argentina: Albatros.
- Arvouet-Grand, A., Vennat, B., Pourrat, A., & Legret, P. (1994). Standardization of propolis extract and identification of principal constituents. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 49(6), 462–468. <https://doi.org/10.1002/j.2042-7158.1997.tb06912.x>

- Asgher, M., Sehar, Z., Rehman, A., Rashid, S., Per, T.S., Alyemeni, M.N., & Khan, N.A. (2022). Exogenously-applied L-glutamic acid protects photosynthetic functions and enhances arsenic tolerance through increased nitrogen assimilation and antioxidant capacity in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental Pollution*, 301, 119008. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119008>
- Avendaño-Abarca, V.H., Alvarado-Camarillo, D., Valdez-Aguilar, L.A., Sánchez-Ortíz, E.A., González-Fuentes, J.A., & Cartmill, A.D. (2023). Response of strawberry to the substitution of blue light by green light in an indoor vertical farming system. *Agronomy*, 13(1), 99. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010099>
- Avgoustaki, D.D., Li, J., & Xydis, G. (2020). Basil plants grown under intermittent light stress in a small- scale indoor environment: Introducing energy demand reduction intelligent technologies. *Food Control*, 118, 107389. [doi:https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107389](https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107389)
- Baixxauli, S.C., & Aguilar, O.J. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas. Aspectos prácticos y experiencias. Edición Generalitat Valenciana. Valencia. España.
- Banerjee, R., Schleicher, E., Schleicher, S., Meier, R. M., Viana, R., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R., & Batschauer, A. (2007). The signaling state of *Arabidopsis* cryptochrome 2 contains flavin semiquinone. *Journal of Biological Chemistry*, 282, 14916–14922. <https://doi.org/10.1074/jbc.M700616200>
- Benke, K. & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainably: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. DOI: 10.1080/15487733.2017.1394054
- Benzie I.F.F. & Strain J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: the FRAP assay. *J. Anal. Biochem.* 239, 70-76.
- Bian, Z.H., Cheng, R.F., Yang, Q.C., Wang, J., & Lu, C. (2016). Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 141(2), 186–195. <https://doi.org/10.21273/JASHS.141.2.186>

- Bianchi, P.G. (1986). Guía completa de cultivo de fresa. Primera edición. Editorial De Vecchi. España. 57 p.
- Bianchi, P.G. (2018). Guía completa del cultivo de las fresas (1.<sup>a</sup> ed., eBook). Parkstone International
- Bianchi, P.G. (1999). Guía completa del cultivo de fresa. Segunda edición. Editorial De Vecchi. España. 94 p.
- Bulgari, R., Franzoni, G., & Ferrante, A. (2019). Biostimulants application in horticultural crops under abiotic stress conditions. *Agronomy* 9:306. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060306>
- Calvo, P., Nelson, L., & Kloepper, J.W. (2014). Agricultural uses of plant biostimulants. *Plant Soil* 383:3–41. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2131-8>
- Casteel, S. (2004). Strawberry Fertility and Nutrient Management. En *Strawberry Plasticulture Notebook: A Guide to Strawberry Plasticulture Production*. Raleigh, EE.UU.: The North Carolina Strawberry Association.
- Chen, Y., Bian, Z., Marcelis, L. F., Heuvelink, E., Yang, Q., & Kaiser, E. (2024). Green light is similarly effective in promoting plant biomass as red/blue light: A meta-analysis. *Journal of Experimental Botany*, 75(18), 5655–5666. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae259>
- Chiqui Chiqui, F.A., & Lema Cumbe, M.L. (2010). Evaluación del rendimiento en el cultivo de fresa (*Fragaria sp*) variedad oso grande, bajo invernadero mediante dos tipos de fertilización (orgánica y química) en la parroquia Octavio Cordero Palacios, Cantón Cuenca.
- Colla, G., Roupael, Y. (2015). Biostimulants in horticulture. *Sci Horti* (Amsterdam) 196:1–2. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.10.044>
- Cvelbar Weber, N., Koron, D., Jakopič, J., Veberič, R., Hudina, M., & Baša Česnik, H. (2021). Influence of nitrogen, calcium and nano-fertilizer on strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) fruit inner and outer quality. *Agronomy*, 11(5), 997. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050997>

- Darrow, G.M. (1966). *The strawberry: history, breeding and physiology*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Despommier, D. (2010). *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*. New York: Picador. Eurosemillas.
- Dou, H., Niu, G., Gu, M., & Masabni, J. G. (2020). Morphological and physiological responses in basil and Brassica species to different proportions of red, blue, and green wavelengths in indoor vertical farming. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, *145*(4), 267–278. <https://doi.org/10.21273/jashs.145.4.267>
- Durner, E.F. (2015). Photoperiod affects floral ontogeny in strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) plug plants. *Scientia Horticulturae*, *194*, 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.006>
- Durner, E.F., Barden, J.A., Himelrick, D.G., & Poling, E.B. (1984). Photoperiod and temperatura effects on flower and runner development in day-neutral, junebearing, and everbearing strawberries. *J. Amer. Soc. hort. Sci.* *109*: 396-400.
- Dutta Gupta, S. (Ed.). (2017). *Light emitting diodes for agriculture: Smart lighting*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>
- El-Metwally, I.M., Sadak, M.S., & Saady, H.S. (2022). Stimulation effects of glutamic and 5-aminolevulinic acids on photosynthetic pigments, physio-biochemical constituents, antioxidant activity, and yield of peanut. *Gesunde Pflanzen*, *74*, 915–924. <https://doi.org/10.1007/s10343-022-00663-w>
- Fabbrin, E.G.S., Mógor, Á.F., & Margoti, G. (2013). Purple chicory ‘*palla rossa*’ seedlings growth according to the foliar application of l-glutamic acid. *Sci Agrar* *14*:91–94
- Fan, X., Lu, N., Xu, W., Zhuang, Y., Jin, J., Mao, X., & Ren, N. (2023). Response of flavor substances in tomato fruit to light spectrum and daily light integral. *Plants*, *12*(15), 2832. <https://doi.org/10.3390/plants12152832>
- Farahmandi, S.R., Samavat, S., Mostafavi, M., Mohammadi Torkashvand, A., & Kalate Jari, S. (2022). Combined foliar-applied L-glutamic acid, nitrogen and potassium improve plant growth, physio-chemical attributes, minerals and longevity of Gerbera (*Gerbera*

*jamesonii*). *Plant Nutrition*, 45, 951–962.  
<https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1998526>

Ferrarezi, R.S., Weaver, G.M., Van Iersel, M.W., & Testezlaf, R. (2015). Subirrigation: Historical overview, *HortTechnology*, 25(3), 262-276.

Garcia, K., & Kubota, C. (2017). Flowering responses of North American strawberry cultivars. In *VIII International Strawberry Symposium* (Vol. 1156, pp. 483–490).  
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1156.71>

Gilsanz, C.J. (2007). Hidroponía. Edición: Unidad de Comunicación y Transparencia de Tecnología. Montevideo. Uruguay.

Gómez Vergara, A. (2023). Efecto de extractos de Spirulina máxima en el desarrollo vegetativo de fresa (*Fragaria x ananassa*), en sistema aeropónico vertical con luz LED blanca a partir de vitroplantas.

Goswami, B., & Yadav, V. (2022). Soil-less culture (hydroponics) a review. *Just Agric*, 2(12), 1-12 p.

Grijalva, C.M. (2015). Crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos de fresa Albion y Monterey establecidos bajo macrotúnel y a campo abierto en el trópico alto (Tesis para optar por el título de Magister en Biología Aplicada). Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Guiamba, H., Zhang, X., Sierka, E., Lin, K., Ali, M. M., Ali, W. M., Lamlon, S.F., Kalaji, H. M., Telesinski, A., & Yousef, A. F. (2022). Enhancement of photosynthesis efficiency and yield of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) plants via LED systems. *Front. Plant Sci.*, 13, 918038.

Haghighi, M. (2012). The effect of humic and glutamic acids in nutrient solution on the N metabolism in lettuce. *J Sci Food Agric*, 92:3023–3028. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5718>

Hancock, F. (1999). Strawberries. CABI Publishings. Michigan. USDA.

- Heijari, J., Kivimäenpää, M., Hartikainen, H., Julkunen-Tiitto, R., & Wulff, A. (2005). Responses of strawberry (*Fragaria × ananassa*) to supplemental UV-B radiation and selenium under field conditions. *Plant and Soil*, 282: 27-39.
- Hidaka, K., Dan, K., Imamura, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sameshima, K., & Okimura, M. (2013). Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environ. Control. Biol.*, 51, 41–47.
- Huang, S., Yang, X., Chen, G., & Wang, X. (2023). Application of glutamic acid improved As tolerance in aromatic rice at early growth stage. *Chemosphere*, 322, 138173. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138173>
- Ibrahim, S.M.M., Taha, L.S., & Farahat, M.M. (2010). Influence of foliar application of pepton on growth, flowering and chemical composition of *Helichrysum bracteatum* plants under different irrigation intervals. *Ozean. J. Appl. Sci*, 3, 1, 143–155.
- Innes, S.N., Jakobsen, S.B., Røsåsen, R.B., Ali, H., Solhaug, K.A., Olsen, J. E., & Torre, S. (2025). Blue light is a key factor in regulating stomatal movement, transpiration rate and ABA metabolism under varying vapour pressure. *Acta Physiologiae Plantarum*, 47(7), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11738-025-03818-0>
- Jiang, M., Jiang, J., Li, S., Li, M., Tan, Y., Song, S., & Huang, J. (2020). Glutamate alleviates cadmium toxicity in rice via suppressing cadmium uptake and translocation. *Journal of Hazardous Materials*, 384, 121319. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121319>
- Kaiser, E., Weerheim, K., Schipper, R., & Dieleman, J. A. (2019). Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato. *Scientia Horticulturae*, 249, 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.005>
- Kirschbaum, D.S. (2017). Características botánicas, fisiología y tipos de variedades de fresas. En: A. A. Tizio (Ed.), *Frutilla: producción, poscosecha e industrialización* (pp. 15–32). Ediciones INTA.
- Kirschbaum, D.S., Larson, K.D., Weinbaum, S.A, & DeJong, T.M. (2015). Differential response of early and intermediate flowering strawberry cultivars to nursery late-season nitrogen applications and digging date. *Afr. J. Plant Sci.*, 9: 250-263

- Kobayashi, W., Kobayashi, T., Takahashi, A., Kumakura, K., & Matsuoka, H. (2021). Metabolism of glutamic acid to alanine, proline, and  $\gamma$ -aminobutyric acid during Takuan-zuke processing of radish root. *Journal of Food Science*, 86, 563–570. <https://doi.org/10.3390/foods14111982>
- Kosai, T.; Niu, G.; & Takagaki, M. Plant Factory: An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production; Associated Press: London, UK, 2019; p. 405.
- Kuskoski, E.M.; Asuero, A. G.; A. M. Troncoso, J. & Moncini-Filho. R. Fett. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Cien. Tecnol. Aliment. Campinas*. 25 (4):726-732.
- Kwon, Y.B., Lee, J.H., Kim, M.J., Lee, D.Y., Choi, I.L., Yoon, H.S., & Kang, H.M. (2025). Effects of exogenous L-glutamic acid and supplemental LED lighting on the growth and yield of paprika. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13580-025-00728-5>
- Lakhiar, I.A., Gao, J., Syed, T.N., Chandio, F.A., & Buttar, N.A. (2018). Modern plant cultivation technologies in agriculture under controlled environment: A review on aeroponics. *Journal of plant interactions*, 13(1), 338-352 p.
- Lara, H.A. (2000). Manejo de solución nutritiva en la producción de Tomate en Hidroponia <http://www.chapingo.mx/terra/contenido/17art221-229.pdf>
- Ledesma, N.A., Nakata, M. & Sugiyama, N. (2008). Effect of High Temperature Stress on the Reproductive Growth of Strawberry cvs. ‘Nyoho’ and ‘Toyonoka’. *Scientia Horticulturae (116)*, 186-193.
- Lee, J., Durst, R. W., & Wrolstad, R. E. (2005). Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 88, 1269–1278.
- Lei, P., Xu, Z., Liang, J., Luo, X., Zhang, Y., Feng, X., & Xu, H. (2016). Poly ( $\gamma$ -glutamic acid) enhanced tolerance to salt stress by promoting proline accumulation in *Brassica napus* L. *Plant Growth Regulation*, 78(2), 233–241. <https://doi.org/10.1007/s10725-015-0088-0>

- Li, F., Li, Y., Li, S., Wu, G., Niu, X., & Shen, A. (2021). Green light promotes healing and root regeneration in double-root-cutting grafted tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 289, 110503. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110503>
- Liu, D., Samtani, J.B., Taghavi, T., & Amyotte, B. (2024). Agronomic and post-harvest performance of strawberry cultivars in high tunnel and open-field environment in southeast Virginia. *International Journal of Fruit Science*, 24(1), 242–255. <https://doi.org/10.1080/15538362.2024.2384395>
- Liu, J.; Van Iersel, M.W. (2021). Photosynthetic physiology of blue, green, and red light: Light intensity effects and underlying mechanisms. *Front. Plant Sci.* 12, 619987.
- Lv, D.G., Yu, C., & Yang, L. (2009). Effects of foliar-applied L-glutamic acid on the diurnal variations of leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bge.). *Eur J Hort Sci* 74:204–209
- Ma, H., Li, P., Liu, X., Li, C., Zhang, S., Wang, X., & Tao, X. (2022). Poly- $\gamma$ -glutamic acid enhanced the drought resistance of maize by improving photosynthesis and affecting the rhizosphere microbial community. *BMC Plant Biology*, 22(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03392-w>
- Maroto, J.V., Pascual, B., Alargada, J., & López, G. (1986). Mejora de la precocidad del cultivo de fresón (*Fragaria x ananassa* Duch. cv Pájaro) mediante aplicaciones invernales de ácido giberelico. ITEA 63: 36-38.
- Martínez, T.J., & León, G.H. (2004). Producción de fresa en invernadero. Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura, Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Torreón, Coah. México.
- Mazher, A.A.M., Zaghloul, S.M., & Mahmoud, S.A. (2011). Stimulatory effect of kinetin, ascorbic acid and glutamic acid on growth and chemical constituents of *Codiaeum variegatum* L. Plants. *Am J Agric Environ Sci*, 10:318–323
- Meng, Q., & Runkle, E.S. (2019). Regulation of flowering by green light depends on its photon flux density and involves cryptochromes. *Physiologia Plantarum*, 166(3), 762–771. <https://doi.org/10.1111/ppl.12832>

- Michard, E., Lima, P.T., Borges, F., Silva, A.C., Portes, M.T., & Carvalho, J.E. (2011). Glutamate receptor-like genes form Ca<sup>2+</sup> channels in pollen tubes and are regulated by pistil D-serine. *Science*, *17*, 1–5. <https://doi.org/10.1126/science.1201101>
- Miller, A.J., Fan, X., Shen, Q., & Smith, S.J. (2007). Amino acids and nitrate as signals for the regulation of nitrogen acquisition. *J Exp Bot* *59*:111–119. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm208>
- Milosavljević, D.M., Maksimović, V.M., Milivojević, J.M., Nakarada, Đ.J., Mojović, M.D., & Dragišić Maksimović, J.J. (2022). Rich in phenolics—Strong antioxidant fruit? Comparative study of 25 strawberry cultivars. *Plants*, *11*(24), 3566. <https://doi.org/10.3390/plants11243566>
- Mochizuki, Y., Sekiguchi, S., Horiuchi, N., Aung, T., & Ogiwara, I. (2019). Photosynthetic characteristics of individual strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.) leaves under short-distance lightning with blue, green, and red LED lights. *HortScience*, *54*(3), 452–458. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI13560-18>
- Oviedo F. (2004). Los invernaderos y el medio ambiente. En: ENCUESTO MEDIOAMBIENTAL ALMERIENSE: EN BUSCA DE SOLUCIONES.
- Ozeker, E., Eltez, R.Z., Tuzel, Y., Gul, A., Onal, K., & Tanrysever., A. (1999). Investigation on the effects of different growing media on the yield and quality of strawberries grown in vertical bags. *Acta Hort.*, *486*: 409-414.
- Paucar Guamialamá, L.J. (2022). Evaluación del rendimiento del cultivo de fresa (*Fragaria sp*) en las variedades Albión y Monterrey mediante dos sistemas de producción en el Centro Experimental “San Francisco” cantón Huaca, provincia del Carchi. UPEC.
- Pérez-León, M.I., González-Fuentes, J.A., Valdez-Aguilar, L.A., Benavides-Mendoza, A., Alvarado-Camarillo, D., & Castillo-Chacón, C.E. (2023). Effect of glutamic acid and 6-benzylaminopurine on flower bud biostimulation, fruit quality and antioxidant activity in blueberry. *Plants*, *12*, 2363. <https://doi.org/10.3390/plants12122363>
- Qiu, X.-M., Sun, Y.-Y., Ye, X.-Y., & Li, Z.-G. (2020). Signaling Role of Glutamate in Plants. *Front. Plant Sci.*, *10*, 1743.

- Rai, V.K. (2002). Role of amino acids in plant responses to stresses. *Biol Plant*. 45, 481–487. doi: 10.1023/A:1022308229759
- Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., & Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radical Biology and Medicine*, 26(9), 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Röder, C., Mógor, Á.F, & Szilagyi-Zecchin, V.J. (2018). Potato yield and metabolic changes by use of biofertilizer containing L-glutamic acid. *Comun Sci* 9:211–218. <https://doi.org/10.14295/cs.v9i2.2564>
- Rodríguez, A. (2005). INFOCIR. Boletín quincenal de inteligencia agroindustrial. Num.2. Vol.1. Universidad Nacional Agraria, La Molina, Perú. Pág. Web. <http://www.focir.gob.mx/documentos/boletin/infocirjul1.pdf>
- Rosa, R., Hajko, L., Franczuk, J., Zaniewicz-Bajkowska, A., Andrejiová, A., & Mezeyová, I. (2023). Effect of L-tryptophan and L-glutamic acid on carrot yield and its quality. *Agronomy*, 13, 562. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020562>
- Ruiz, R., & Piedrahíta, W. (2012). Manual para el cultivo de frutales en el trópico: Fresa. Produmedios.
- Saleem, M.H., Zafar, S., Javed, S., Anas, M., Ahamed, T., Ali, S., Mirmazloun, I., & Ahmad, A. (2024). Modulatory effects of glutamic acid on growth, photosynthetic pigments and stress responses in olive plants subjected to cadmium stress. *Journal of King Saud University – Science*, 36, 103540. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103540>
- Santoyo, J.A. & Martínez, C.O. (2010). Paquete tecnológico para la producción de fresa. SAGARPA-Fundación PRODUCE Sinaloa A.C. México. Folleto técnico. 21 p.
- Serna-Rodríguez, J.R., Castro-Brindis, R., & Colinas-león, M.T. (2011). Aplicación foliar de ácido glutámico en plantas de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Rev Chapingo Ser Hortic* 17:9–13
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2018, diciembre 07). Fresa mexicana: un producto con reconocimiento a nivel internacional

- <https://www.gob.mx/agricultura/aguascalientes/articulos/fresa-mexicana-producto-con-reconocimiento-a-nivel-internacional?idiom=es> de un
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2019). SIACON: Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta. Ciudad de México.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2023). Panorama Agroalimentario 2023. Ciudad de México.
- Singleton, V.L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(99\)99017-1](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1)
- Smith, H.L., McAusland, L., & Murchie, E.H. (2017). Don't ignore the green light: Exploring diverse roles in plant processes. *Journal of Experimental Botany*, 68, 2099–2110. <https://doi.org/10.1093/jxb/erx098>
- Stuemky, A., & Uchanski, M.E. (2020). Supplemental light-emitting diode effects on the growth, fruit quality, and yield of two greenhouse-grown strawberry (*Fragaria × ananassa*) cultivars. *HortScience*, 55(1), 23–29. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14113-19>
- Talukder, M.R., Asaduzzman, M.D., Tanaka, H., & Asao, T. (2018). Light-emitting diodes and exogenous amino acids application improve growth and yield of strawberry plants cultivated in recycled hydroponics. *Scientia Horticulturae*, 237, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.05.033>
- Terés, T. (2001). Relaciones aire agua en sustratos de cultivo como base para el control de riego. Metodología de laboratorio y modelización. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.
- Viljoen & K, Bohn. (2005). “Continuous Productive Urban Landscapes: urban agriculture as an essential infrastructure,” *Urban Agriculture Magazine*, vol 15, pp.34-36.
- Viso, E. (2016). Así es la granja de lechugas del futuro: sin granjero, sin luz y sin tierra. Recuperado <https://tecvolucion.com/granja-lechugas-futuro-sin-granjero-luz-y-tierra/>

- Wang, Y., & Folta, K.M. (2013). Contributions of green light to plant growth and development. *American Journal of Botany*, *100*(1), 70–78. <https://doi.org/10.3732/ajb.1200354>
- Wei, H., Liu, C., Hu, J., & Jeong, B.R. (2020). Quality of supplementary morning lighting (SML) during propagation period affects physiology, stomatal characteristics, and growth of strawberry plants. *Plants*, *9*(5), 638. <https://doi.org/10.3390/plants9050638>
- Whitham F.H.; Blaydes D.F.; & Devlin R.M. (1971). *Experiments in Plant Physiology*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold Company.
- Xu, Z., Ma, J., Lei, P., Wang, Q., Feng, X., & Xu, H. (2020). Poly- $\gamma$ -glutamic acid induces system tolerance to drought stress by promoting abscisic acid accumulation in *Brassica napus* L. *Scientific Reports*, *10*(1), 252.
- Yoshida, H., Mizuta, D., Fukuda, N., Hikosaka, S., & Goto, E. (2016). Effects of varying light quality from single-peak blue and red light emitting diodes during nursery period on flowering, photosynthesis, growth, and fruit yield of everbearing strawberry. *Plant Biotechnol.*, *33*, 267–276.
- Zaragoza Nieto, R. D. (2013). Evaluación de técnicas hidropónicas de producción en el cultivo de fresa (*Fragaria x ananassa*) bajo invernadero (Tesis de maestría, Centro de Investigación en Química Aplicada, CIQA). Saltillo, Coahuila, México.