Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología Agropecuaria ISSN: 2448-6620

RESPUESTA FISIOLÓGICA Y PRODUCTIVA DE FRESA (*Fragaria x ananassa*) BAJO DIFERENTES ESPECTROS DE LUZ LED

Erick Carmona-Martínez [1*]; Dulce A Guarnero-López [1]; Genaro Pérez-Jiménez [2]; Gabriela Briones-Herrera[1]

[1]Instituto de Educación Digital del Estado de Puebla, Camino a Texocuigtic S/N, 73720 Ixtacamaxtitlán, Pue.[2] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo experimental San Martinito, Santa Rita Tlahuapan, Carretera Federal México-Puebla Km 56.5, CP 74100. * Autor de correspondencia carmonamartinezerick@gmail.com

RESUMEN

El presente estudio evaluó la respuesta fisiológica y productiva del cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*) bajo diferentes espectros de luz LED en condiciones controladas. El experimento se estableció mediante un diseño completamente al azar con 16 unidades experimentales, aplicando tratamientos de luz azul (LA), verde (LV), combinación azul + roja (LAR) y verde + roja (LVR). Se analizaron variables clave como área foliar, longitud y volumen de raíz, y peso de planta, con el fin de determinar la influencia de la calidad lumínica en el desarrollo morfofisiológico del cultivo. El análisis de varianza (ANOVA) mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$), evidenciando que la calidad espectral de la luz influye directamente en el crecimiento y desarrollo de las plantas. El modelo presentó un coeficiente de determinación (R^2) de hasta 0.96 en algunas variables y coeficientes de variación bajos (4.3–10.21%), lo que indica una adecuada precisión experimental. Los resultados de la prueba de Tukey indicaron que el tratamiento LAR (luz azul + roja) promovió el mayor desarrollo de área foliar, lo que sugiere una mayor capacidad fotosintética. En el sistema radical, el tratamiento LA (luz azul) presentó los valores más altos en longitud y volumen de raíz, indicando mayor eficiencia en la exploración y absorción de agua y nutrientes. Por su parte, el tratamiento LVR (luz verde + roja) mostró el mayor peso de planta, reflejando una mayor acumulación de biomasa.

Palabras clave: *Iluminación LED, morfofisiología, área foliar, Tukey, fotosintética, biomasa, ANOVA*

ABSTRACT

This study evaluated the physiological and productive response of strawberry (Fragaria × ananassa) under different LED light spectra in controlled conditions. The experiment was established using a completely randomized design with 16 experimental units, where four light treatments were applied: blue (LA), green (LV), blue + red (LAR), and green + red (LVR). Key variables analyzed included leaf area, root length, root volume, and plant weight, in order to determine the influence of light quality on the morphophysiological development of the crop. The analysis of variance (ANOVA) revealed significant differences among treatments ($p \leq 0.05$),

demonstrating that spectral light quality directly affects plant growth and development. The model showed coefficients of determination (R^2) up to 0.96 and low coefficients of variation (4.3–10.21%), indicating adequate experimental precision. Mean comparison using Tukey's test indicated that the LAR treatment (blue + red light) produced the highest leaf area, suggesting greater photosynthetic capacity. In the root system, the LA treatment (blue light) showed the highest values for root length and volume, indicating improved water and nutrient uptake capacity. Meanwhile, the LVR treatment (green + red light) resulted in the highest plant weight, reflecting greater biomass accumulation.

Keywords: *LED lighting, morphophysiology, leaf area, Tukey, photosynthetic, biomass, ANOVA*

INTRODUCCIÓN

El crecimiento y desarrollo de las plantas está influenciado por diversos factores ambientales, entre los que la luz desempeña un papel fundamental (Gonzalías, 2016). Las especies vegetales tienen la capacidad de responder de forma diferente a la calidad de luz, entendida como el color o la longitud de onda e intensidad, es decir, la densidad de flujo de fotones o la irradiancia, y una combinación de ambos (Blanco, 2019). La luz LED permite ajustar longitudes de onda específicas, principalmente en los rangos rojo y azul, los cuales están directamente relacionados con procesos fisiológicos en las plantas. La luz roja favorece la elongación y el crecimiento vegetativo, mientras que la luz azul está asociada con la formación de hojas, apertura estomática y regulación del desarrollo morfológico (Flores, 2021).

El área foliar es un indicador directo de la capacidad fotosintética, mientras que variables como el volumen y la longitud de raíz reflejan la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes. La manipulación del ambiente lumínico mediante tecnología LED puede modificar estas variables, permitiendo optimizar el crecimiento y desarrollo de las plantas bajo condiciones controladas (Fan et al., 2013).

Diversos estudios han reportado que la aplicación de diferentes combinaciones de luz LED genera respuestas diferenciadas en el crecimiento vegetal; sin embargo, estas respuestas dependen del cultivo, la intensidad lumínica y la proporción de espectros utilizados. Por lo tanto, es necesario evaluar el efecto de distintas condiciones de iluminación sobre variables de crecimiento para identificar las combinaciones más eficientes. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes tratamientos de luz LED en cultivo de fresa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo experimental San Martinito, (CESMAR), localizado en el municipio de Santa Rita Tlahuapan, Puebla. Se utilizaron plantas de fresa de la variedad frontera (*Fragaria x ananassa*), de segundo ciclo productivo a una corona, establecidas en charolas de aluminio con piedra pomex como sustrato a una densidad de 14 plantas por metro lineal.

Se elaboraron cámaras independientes por tratamiento de luz, que se iluminaron con focos de luz LED de marca AKSI® de 4 W, en espectros de color azul, rojo y verde. El fotoperiodo se mantuvo en 12 horas luz en tiempo nocturno durante cinco meses, programado por un temporizador de la marca VOLTECK®. Se calculó el flujo lumínico con un luxómetro (Steren® HER- 408). La intensidad fue constante durante todo el experimento. El diseño experimental fue completamente al azar, se evaluaron cuatro tratamientos de iluminación LED, establecidos de la siguiente manera: luz azul (LA) donde se obtuvo 76.5 Lu m^{-2}, luz verde (LV) 41.2 Lu m^{-2}, combinación azul + rojo (LAR) 21.3 Lu m^{-2} y combinación verde + rojo (LVR)16.2 Lu m^{-2} (figura). Las fuentes de luz se instalaron de manera uniforme sobre el dosel de las plantas con divisiones de nailon negro de polietileno, garantizando una distribución uniforme de radiación y evitando mezclas entre longitudes de onda. La temperatura dentro del área experimental se midió con un DataLogeer marca ELITECH®, donde se mantuvo constante entre 24°C±3, considerando fenómenos climáticos que ocurrieron cuando la temperatura descendió a -1, -3, -4,-7°C.

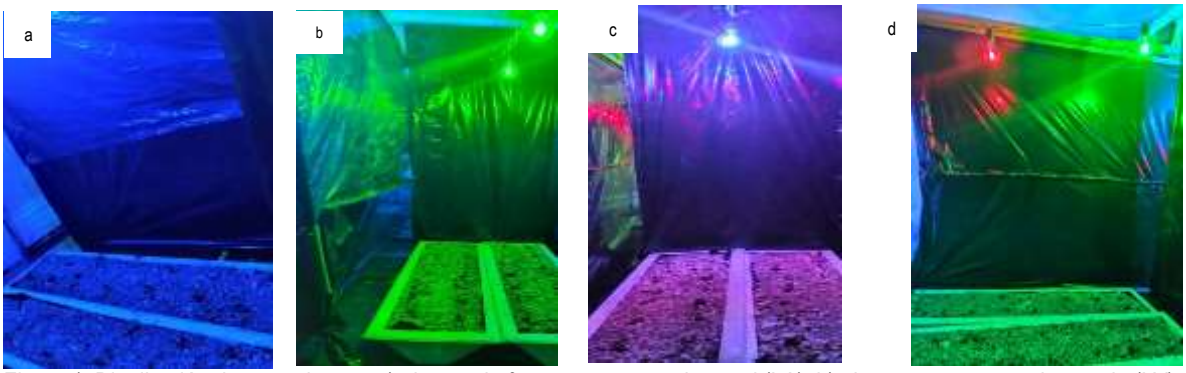

Figura 1. Distribución de tratamientos, a) plantas de fresa expuestas a luz azul (LA), b) plantas expuestas a luz verde (LV), c) plantas expuestas a luz azul+ rojo (LAR), d) plantas expuestas a luz verde + rojo (LVR). Fuente: elaboración propia.

El manejo nutricional de las plantas de fresa se llevó a cabo utilizando una solución nutritiva elaborada conforme al modelo Steiner al 20 %. Con un PH-metro de marca PHMETER®, se obtuvieron parámetros de pH entre 5.5 y 6.5 y la conductividad eléctrica entre 1.5 y 2.5 dS m^{-2}. Para la preparación, se emplearon 20 litros de agua como base, asegurando que la mezcla estuviera correctamente disuelta y homogénea antes de su aplicación. El riego se realizó de manera controlada, aplicando 50 mL de la solución nutritiva por planta. Este método permitió mantener una adecuada disponibilidad de humedad en la zona radicular, favoreciendo la absorción de

nutrientes y evitando el exceso de agua que pudiera afectar el desarrollo del cultivo. El plan de nutrición fue distribuido como se muestra en el cuadro 1.

Cuadro 1. Fertilización en el cultivo de fresa: dosis, etapas fenológicas y número de aplicaciones.

Fertilizante	Fórmula	Marca	Cantidad	Etapa	Aplicación
Kapilar®	Acido 4-indol-3-butrico 125 ppm 1-(2-cloro-4-piridil)-3-fenilurea 50 ppm Tecnología Liebig Science®	Liebig Science®	20 mL	Trasplante	2
Fulvato®	Ácidos húmicos	Liebig Science®	10 mL	Trasplante	2
Nitrato de calcio	$Ca(N0_3)_24H_2O$	Compoexpert®	15.92 g	Desarrollo	5
Fosfato mono potásico	KH_2PO_4	ISAOSA ®	2.04 g	Desarrollo	5
Nitrato de potasio	$KN0_3$	ISAOSA ®	4.545 g	Desarrollo	5
Sulfato de magnesio	$MgSO_47H_2O$	ISAOSA ®	7.38 g	Desarrollo	5

La evaluación de la respuesta a los tratamientos fue después de cinco meses del trasplante, y las variables que se determinaron fueron área foliar, que se determinó con la seleccionaron de manera aleatoria cinco plantas para su estudio. El proceso de medición se realizó mediante un análisis digital de imágenes. Se tomaron fotografías de las plantas seleccionadas y dichas imágenes fueron procesadas utilizando el software ImageJ®. Durante el procesamiento, se incluyó una escala de referencia, lo que permitió convertir las dimensiones en píxeles a medidas de superficie reales, expresadas en centímetros cuadrados (cm^2).

Además, se consideró el volumen de raíz, para ello, se utilizaron las mismas plantas previamente seleccionadas en el análisis del área foliar. El procedimiento consistió en sumergir cada planta en una probeta con una cantidad de agua previamente medida (100 mL), asegurando que las raíces llegaran hasta el fondo. Se registró la diferencia en el volumen de agua para determinar el peso volumétrico radicular de cada muestra.

Se determinó la longitud de raíz, desde el punto donde empieza a la corona hasta las raíces como mayor densidad. También se consideró el peso fresco de cada plántula puesta en evaluación. Los datos obtenidos fueron procesados mediante el software InfoStat, y sometidos a un análisis de varianza y donde se mostraron diferencias significativas se realizó una prueba de comparación de medias por Tukey, todo con el mismo paquete estadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza mostró que la calidad espectral de la luz LED tuvo un efecto significativo sobre todas las variables evaluadas, evidenciando su papel como regulador del crecimiento y desarrollo morfofisiológico del cultivo de fresa. El área foliar presentó un efecto altamente significativo ($p<0.0001$), lo que confirma que la calidad espectral de la luz influye directamente en la expansión del tejido fotosintético.

En cuanto al sistema radical, la longitud de raíz y el volumen de raíz mostraron efectos significativos ($p<0.0001$ y $p = 0.0079$, respectivamente), evidenciando una alta sensibilidad del sistema radicular a la calidad de luz. Estudios previos han demostrado que la elongación radicular está estrechamente relacionada con la redistribución de auxinas y foto asimilados desde la parte aérea hacia la raíz, proceso que es modulado por señales lumínicas.

El peso de planta también presentó diferencias significativas ($p = 0.0091$), lo que indica que los tratamientos de luz LED influyen en la acumulación de biomasa. Esta variable integra múltiples procesos fisiológicos, incluyendo la fotosíntesis, la respiración y la partición de foto asimilados. Los valores de coeficiente de determinación ($R^2 = 0.60–0.96$) indican un buen ajuste del modelo, mientras que los coeficientes de variación (CV = 4.3–10.21%) reflejan una adecuada precisión experimental (Cuadro 2).

Cuadro 2. ANAVA de variables fisiológicas en fresa bajo luz LED.

	Media	Tratamiento	Error	R^2	CV (%)
			Cuadrados medios		
Area foliar	241.27	9305.47 **	101.78	0.96	4.3
Volumen raiz	107.31	16.75 **	2.63	0.61	1.51
Longitud Raiz	16.06	42.43 **	1.08	0.91	6.5
Peso planta	14.06	12.50 **	2.04	0.6	10.21

FV = Fuente de variación, gl = grados de libertad, ** = Diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$), ** = Diferencia estadística significativa ($P \leq 0.05$), ns = No existe diferencia significativa estadística ($P \geq 0.05$), CV (%) = Coeficiente de variación; gl = grados de libertad.

La comparación de medias mediante la prueba de Tukey evidenció diferencias significativas entre tratamientos en todas las variables evaluadas. El tratamiento 2 LAR presentó el mayor valor de área foliar, diferenciándose estadísticamente del resto, lo que indica una mayor expansión del área fotosintética bajo este espectro de luz (Cuadro 3). El área foliar representa la superficie fotosintéticamente activa de la planta y está directamente relacionada con la capacidad de interceptación de radiación y fijación de carbono. Este parámetro es altamente sensible a la calidad de luz, particularmente a los espectros azul y rojo, los cuales activan fotorreceptores como criptocromos y fitocromos, responsables de regular la expansión celular y el desarrollo foliar (Hogewoning et al., 2010; Ouzounis et al.,2015).

Este comportamiento ha sido reportado en cultivos hortícolas bajo iluminación LED, donde combinaciones de luz azul y roja favorecen el crecimiento vegetativo y la acumulación de biomasa, como lo documentan Paradiso y Proietti (2022) en sistemas de producción bajo ambiente controlado.

Este comportamiento puede explicarse por la acción de fotorreceptores como fitocromos y criptocromos, los cuales regulan la expresión génica relacionada con la división y expansión celular en hojas. La luz azul favorece la apertura estomática y la actividad fotosintética, mientras que la luz roja interviene en la elongación celular y la acumulación de biomasa, lo que en conjunto promueve una mayor superficie foliar. Por ello, el tratamiento 2

LAR presentó los valores más altos, indicando una mayor capacidad de interceptación de radiación y fijación de carbono. Estos resultados coinciden con lo reportado por Ouzounis et al. (2015) y Bantis et al. (2018), quienes documentaron que combinaciones de luz roja y azul incrementan significativamente el desarrollo foliar en cultivos hortícolas específicamente, en lechuga (*Lactuca sativa*) cultivada en ambiente controlado.

Los resultados de la evaluación del sistema radicular mostraron que el tratamiento 4LA obtuvo los mayores valores en volumen y longitud de raíz, el crecimiento está determinado por la redistribución de auxinas y foto asimilados hacia la raíz, procesos que pueden ser modulados por la calidad de luz, influyendo en la elongación celular y en la capacidad de exploración del sustrato (Chen et al., 2004; Bantis et al., 2018). La expansión radicular refleja la capacidad total del sistema radicular para la absorción de agua y nutrientes, integrando procesos de elongación, ramificación y engrosamiento de raíces. Este parámetro depende de la disponibilidad de foto-asimilados generados en la parte aérea, los cuales son influenciados por la eficiencia fotosintética bajo diferentes espectros de luz (Paradiso y Proietti, 2022).

El peso de planta corresponde a la acumulación total de biomasa y representa la integración de procesos fisiológicos como la fotosíntesis, respiración y partición de asimilados. La calidad de luz, especialmente en los espectros rojo y azul, influye en la eficiencia fotosintética y en la síntesis de compuestos orgánicos, determinando el crecimiento y desarrollo general de la planta (Ouzounis et al.,2015; Bantis et al., 2018). En los resultados de peso por planta el tratamiento 1LVR presentó los valores más altos en comparación a los otros tratamientos, evidenciando una mayor acumulación de biomasa.

De lo anterior, los resultados confirman que la manipulación espectral de la luz LED induce respuestas diferenciadas en el crecimiento foliar, desarrollo radicular y acumulación de biomasa en plantas de fresa, destacando su potencial como herramienta para optimizar sistemas de producción en ambientes controlados lo cual coincide con estudios recientes que destacan el uso de iluminación LED como una herramienta eficiente para la manipulación del crecimiento vegetal en sistemas controlados (Kim y Kang, 2025).

Cuadro 3. Efectos de los tratamientos de luz LED en plantas de fresa (comparación de medias por Tukey, p ≤0.05).

Tratamiento	Area foliar	Volumen raiz	Longitud raiz	Peso planta
1LVR	173.46 d	105.50 b	14.00 bc	16.25 a
2LAR	289.20 a	107.25 ab	13.25 c	14.25 ab
3LV	227.56 c	106.50 b	16.13 b	13.50 ab
4LA	249.13 b	110.25 a	20.50 a	12.00 b
DMS*	21.18	3.4	2.18	3

Tukey*: diferencia honesta significativa; medias con diferente letra en la misma columna son estadísticamente diferentes (p α 0.05); LVR: luz verde con roja; LAR: luz azul con roja; LV: luz verde; LA: luz azul.

CONCLUSIONES

La calidad espectral de la luz LED influyó de manera significativa en el crecimiento y desarrollo morfofisiológico del cultivo de fresa (*Fragaria* × *ananassa*), evidenciando respuestas diferenciadas en función del espectro aplicado. El área foliar se consolidó como la variable sensible, destacando el tratamiento 2LAR (luz azul + roja), el cual promovió una mayor expansión del tejido fotosintético, lo que sugiere una mayor eficiencia en la captación de radiación y en la fijación de carbono.

En el sistema radicular, el tratamiento 4LA (luz azul) indujo los mayores valores en longitud y volumen de raíz, lo que refleja una mayor capacidad de exploración del sustrato y potencial de absorción de agua y nutrientes. Este comportamiento evidencia la influencia de la calidad de luz en la regulación de procesos fisiológicos asociados al desarrollo radicular.

El peso de planta mostró que plantas dentro del tratamiento 1LVR (luz verde + roja) mostraron mayor acumulación de biomasa, lo que indica una interacción favorable entre estos espectros en la eficiencia fotosintética y la distribución de foto asimilados.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias por permitir el acceso a sus instalaciones y contribuir en el establecimiento del experimento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bantis, F., Smirnakou, S., Ouzounis, T., Koukounaras, A., Ntagkas, N., and Radoglou, K. (2018). Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). Scientia Horticulturae, 235, 437–451. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.02.058

Blanco, F. F. (2019). Efecto de la calidad de luz en el crecimiento vegetal. Revista de Ciencias Agrarias, 36(2), 123–135.

Chen, M., Chory, J., and Fankhauser, C. (2004). Light signal transduction in higher plants. Annual Review of Genetics, 38, 87–117. https://doi.org/10.1146/annurev.genet.38.072902.092259.

Fan, X. X., Xu, Z. G., Liu, X. Y., Tang, C. M., Wang, L. W., and Han, X. L. (2013). Effects of light quality on growth and development of plants. Acta Horticulturae, 1004, 321–328. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1004.38.

Flores-Pérez, U. (2021). Influencia de la luz en procesos fisiológicos de plantas cultivadas. Revista Fitotecnia Mexicana, 44(3), 345–356.

Gonzalías, J. (2016). Factores ambientales que influyen en el crecimiento vegetal. Revista Agroecológica, 12(1), 45–52.

Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., and Harbinson, J. (2010). Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. Journal of Experimental Botany, 61(11), 3107–3117. https://doi.org/10.1093/jxb/erq132.

Kim, H. H., and Kang, H. M. (2025). Advances in LED lighting for controlled environment agriculture. Horticulture Research, 12(1), 1–15.

López, R., Runkle, E. W., and Han, R. D. (2020). Light management in controlled environments for crop production. HortScience, 55(9), 145–152.

Ouzounis, T., Rosenqvist, E., and Ottosen, C. O. (2015). Spectral effects of artificial light on plant physiology and secondary metabolism: A review. HortScience, 50(8), 1128–1135.

Paradiso, R., and Proietti, S. (2022). Light quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture. Agronomy,12(1), 1–20. https://doi.org/10.3390139