

Diseño e implementación de un prototipo para evaluar la germinación de semillas a diferentes longitudes de onda (fotogerminador)

RESUMEN: La educación es uno de los instrumentos indispensables para promover el progreso en las sociedades. El proceso para la formación integral de un estudiante combina la enseñanza y la aplicación práctica de esta, a través de equipos didácticos. El presente artículo describe el diseño, construcción y validación de un prototipo para evaluar la respuesta de semillas a germinar a diferentes longitudes de onda con tiempos variables de iluminación. El sistema de iluminación empleó ledes de color blanco, azul, amarillo, verde y rojo, mientras el tiempo de iluminación se controló con un temporizador comercial. El control negativo fue un compartimiento sin iluminación. El prototipo fue construido en madera, con compartimientos aislados y cerrados, que permiten iluminar a la longitud de onda que especifica el led.

El equipo se validó germinando semillas de alberjón aplicando la técnica de papel húmedo en charolas de acrílico. El análisis estadístico mostró diferencias significativas para las variables de longitud y peso de los tallos entre las plántulas iluminadas a las diferentes longitudes de onda así como con el control negativo (obscuridad). Estos resultados apoyan el uso didáctico del fotogerminador en las áreas de biología al promover una experiencia práctica, visual y tangible para explorar y comprender el papel de la luz en la germinación.

PALABRAS CLAVE: fotogerminador, LED, germinación, prototipo y luminosidad.



Colaboración

Julio David Mendoza García, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla; Arturo Cabrera Vázquez, Escuela de Bachilleres Artículo Tercero Constitucional; Rubén Enrique Cuevas Alarcón; Gabriel Grosskelwing Nuñez; Arturo Cabrera Hernandez, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 11 de enero del 2023

Fecha de aceptación: 13 de abril del 2023

ABSTRACT: Education is one of the essential instruments to promote progress in societies. The process for the integral formation of a student combines teaching and its practical application, through didactic equipment. This article describes the design, construction and validation of a prototype to evaluate the response of seeds to germinate at different wavelengths with variable illumination times. For lighting, white, blue, yellow, green and red LEDs were used, while the lighting time was controlled with a commercial timer. The negative control was an unilluminated compartment. The prototype was built in wood, with isolated and closed compartments, which allow lighting at the wavelength specified by the LED.

The equipment was validated by germinating alberjón seeds using the wet paper technique in acrylic trays. The statistical analysis showed significant differences for the variables of length and weight of the stems between the seedlings illuminated at the different wavelengths as well as with the negative control (darkness). These results support the didactic use of the photogerminator in the areas of biology by promoting a practical, visual and tangible experience to explore and understand the role of light in germination.

KEYWORDS: photogerminator, LED, germination, prototype and luminosity.

INTRODUCCIÓN

La educación es uno de los instrumentos más poderosos para promover el progreso en las sociedades. El proceso para la for-

mación integral de un estudiante combina la enseñanza en el aula de clase y la aplicación práctica de esta a través de actividades experimentales que favorezcan la comprensión del conocimiento y el razonamiento científico, así como promuevan la motivación y el trabajo en equipo de forma activa y eficaz [1].

Entre los recursos empleados para este fin están los equipos didácticos, donde el alumno desarrollará habilidades de investigación, de comunicación y entenderá la utilidad de lo aprendido en clase para la solución de un problema [2]. Sin embargo, la falta de recursos económicos para la compra y mantenimiento de tales equipos en centros educativos, es una seria limitante para complementar la formación del estudiante [3].

La autoconstrucción de equipos didácticos es una valiosa alternativa que permite a los educadores y estudiantes ser protagonistas activos del proceso de aprendizaje, fomentando la creatividad, el pensamiento crítico y la resolución de problemas, además de promover una mayor participación y motivación por parte de los estudiantes al aplicar sus conocimientos teóricos en situaciones reales, fortaleciendo así su comprensión y habilidades prácticas [4].

En este contexto, la respuesta a la iluminación por las semillas durante el proceso de germinación y el crecimiento de las plántulas es un modelo de trabajo de respuesta rápida, reproducible y de bajo costo, para explorar y comprender los efectos de las variables involucradas [5]. Estas bondades impulsaron la decisión de tomar este modelo como base para el desarrollo de un prototipo didáctico.

Las semillas de las plantas al germinar son capaces de responder a la intensidad y al color de luz por medio de sus fotorreceptores, causando ajustes en la toma de decisiones para germinar, así como en la expansión de la hoja, percepción de vecinos, evitar la sombra, elongación del tallo, germinación de la semilla y la inducción de la floración, estableciendo un sistema donde la luz constituye una fuente de información sobre el entorno [5].

Dado el papel fundamental que la luz tiene en las diferentes etapas de crecimiento de las plantas, los sistemas de iluminación en ambiente controlado han tomado relevancia, siendo la luz emitida a través de led (light emitting diode) una alternativa segura y económica, para estos fines [6].

El presente artículo reporta el diseño y auto-construcción de un material didáctico, el fotogerminador, como material de apoyo para la ejecución de prácticas demostrativas, empleando como modelo de trabajo el efecto de la iluminación a diferentes longitudes de onda sobre la germinación de semillas.

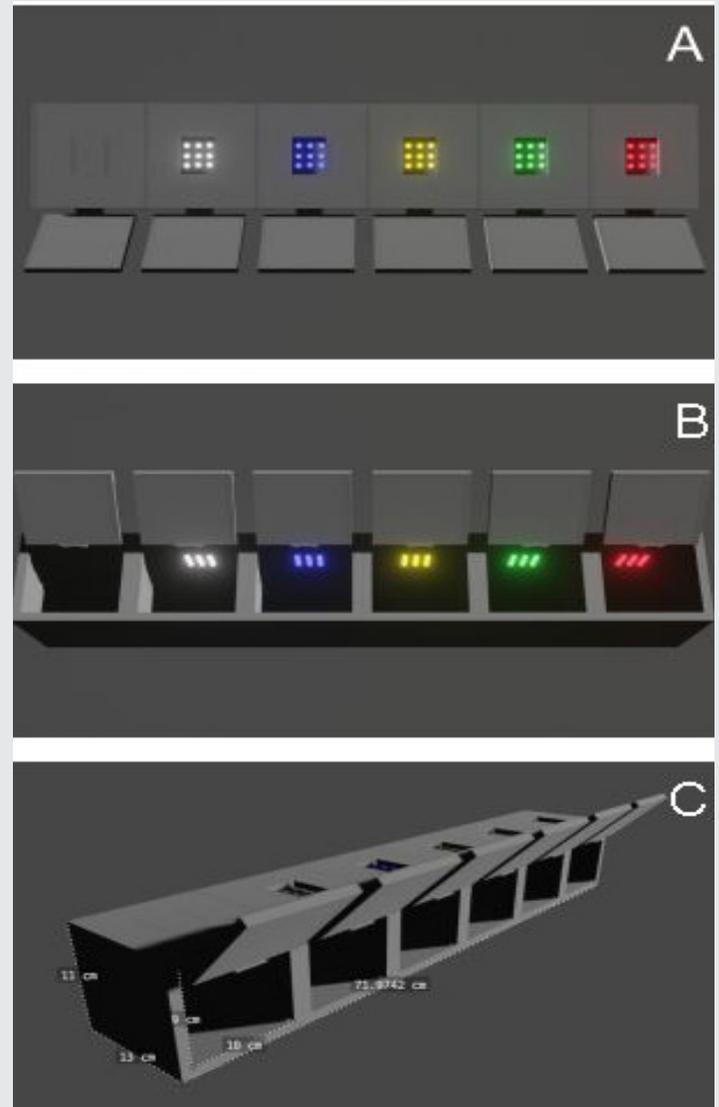


Figura 1. Imagen del diseño del fotogerminador en el programa Blender. Se presenta en el panel A la vista superior del equipo, en el panel B la vista frontal y en C, la proyección isométrica y las dimensiones del fotogerminador.

Las variables de entrada serán las longitudes de onda de los ledes y el tiempo de iluminación, mientras las variables cuantitativas de salida son la longitud y el peso del tallo y raíz de las plántulas germinadas así como el porcentaje de germinación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Diseño del fotogerminador

Se propuso seguir las cinco etapas de la metodología de innovación "Design thinking" centrada en el usuario, donde definimos el público al que se dirige nuestro diseño como estudiantes de nivel bachillerato y superior de las áreas de biología.

Después de una búsqueda bibliográfica sobre el tema de la participación de la luz durante la germinación y con la participación del equipo de trabajo se efectuó una lluvia de ideas. Con ayuda del software Blender se

modeló el fotogerminador, considerando diversos factores como el tiempo de germinación, la disponibilidad de ledes en el mercado, el precio total del equipo, lo llamativo de los colores, la seguridad del usuario y la facilidad de construcción.

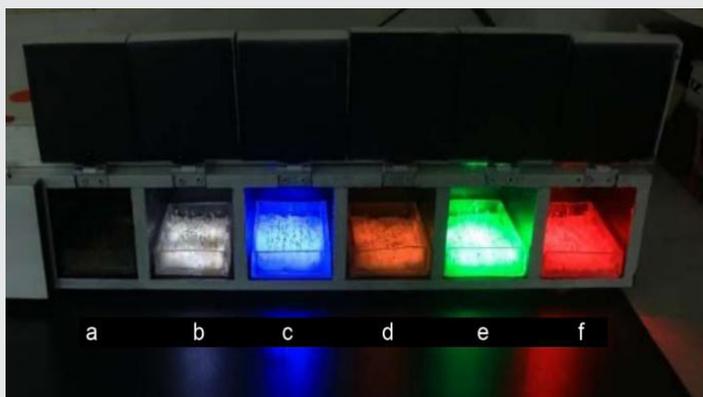


Figura 2. Prototipo de fotogerminador funcional. Se observan los cinco compartimientos iluminados con luz de leds de color azul (c), amarillo (d), verde (e) y rojo (f), así como el control positivo blanco (b) y el control negativo (a), correspondiente a la ausencia de luz.

El prototipo se construyó en madera y por la experiencia previa en ensayos de germinación con semillas de alberjón, se empleó este modelo para la validación del equipo.

Construcción del fotogerminador

Todo el proyecto fue realizado en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México, durante el mes de marzo del 2016.

Se diseñó un modelo de caja rectangular con 6 compartimientos cuboides independientes y aislados (12 x 9 x 14) con espacio suficiente para albergar una caja petri. El diseño se realizó empleando el programa Blender (Figura 1). El material en el que se construyó el prototipo fue madera contrachapada tipo triplay con un espesor de 9 mm.



Figura 3. Fotogerminador al día 3 posterior a la siembra. Se presentan los recipientes de acrílico fuera de cada compartimiento, con las semillas de prueba germinadas para cada longitud de onda irradiado, así como los controles positivos (luz blanca) y negativo (obscuridad).

La altura de los ledes se ajustó para permitir una iluminación uniforme de la superficie de germinación. En la parte frontal de cada compartimiento se colocó una puerta con apertura hacia arriba que al cerrar, garantiza eliminar la infiltración de luz parásita y permite un espacio aislado, donde la semilla esté únicamente irradiada con la luz de interés.

El sistema emplea como fuente de luz diodos ledes estándar tipo "piraña" de 3 mm de diámetro, de diferentes colores: rojo, verde, amarillo, azul y luz blanca, los cuales emiten luz en un intervalo de longitud de onda y luminosidad especificado por el fabricante con emisión en un espectro reducido de ancho de banda de +/-15 nm (full watt, Ribera de Elorrieta 7C, 48015 Bilbao, España).

Los máximos de emisión son de 700 nm, 585 nm, 568 nm y 470 para el led rojo, amarillo, verde y azul. El led de luz blanca irradia en las diferentes áreas del espectro visible. Un compartimiento sin iluminación se definió como el control negativo.

A la parte superior se le realizaron orificios con un taladro a fin de insertar los grupos de 9 ledes, fijados y conectados en arreglo en paralelo con placas para soldar a través de resistencias de 4.7 ohms. La alimentación fué de forma general a través de un adaptador de corriente comercial que reduce el voltaje de 127 volts a 5 volts.

Para ajustar los ciclos de iluminación, el control de alimentación del fotogerminador se adaptó a un temporizador programable comercial General Electric modelo 15075. A fin de optimizar el espacio de germinación, se construyeron charolas de germinación en acrílico de 11 x 12 x 1 cm de alto, con lo cual se optimiza la superficie al interior de la cámara, aunque también puede emplearse cajas de petri para este propósito.

Germinación de semillas

A fin de evaluar el desempeño del fotogerminador, se efectuó la germinación de semillas aplicando el método de papel húmedo, el cual es aceptado oficialmente y permite la germinación rápida, controlada y reproducible de semillas en ambiente controlado. En charolas de acrílico se colocaron 25 semillas distribuidas de forma homogénea sobre la superficie de un papel filtro humedecido con 10 ml de agua [7].

Los diferentes contenedores se colocaron en cada compartimiento y se cerraron las puertas. Este punto se definió como el inicio de la germinación. Los ciclos de iluminación se ajustaron con el temporizador para ciclos de 12 horas de iluminación y 12 horas de obscuridad.

El fotogerminador fue incubado a condiciones ambiente de temperatura, humedad e iluminación. Diariamente, por un breve momento se abrieron las puertas y se

realizó un monitoreo de las semillas, las cuales se consideraron germinadas cuando se observó un desarrollo de la radícula de 2 mm.

Obtención y acopio de resultados:

A fin de establecer las relaciones causa-efecto entre las variables de entrada (longitud de onda irradiada) y las variables de salida (porcentaje de germinación, longitud y peso), se efectuó una investigación descriptiva cuantitativa, con un diseño experimental de bloques al azar, con 25 semillas por bloque para cada longitud de onda evaluada.

Al día 7 posterior a la siembra se contabilizaron las semillas germinadas a fin de obtener el porcentaje de semillas germinadas. Adicionalmente, se midieron con una regla comercial las longitudes de raíz y tallo de cada plántula germinada.

En paralelo, empleando una balanza analítica Mettler-Toledo modelo AE-160, se pesaron los tallos y las raíces de cada plántula. Los datos fueron capturados en bitácora, transcritos y ordenados empleando el programa excel.

Análisis estadístico

A los datos ordenados se les aplicó estadística descriptiva a fin de observar su comportamiento para cada bloque y determinar que no presentaran datos atípicos. Con apoyo del software SSPS, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks y Levene para determinar que los datos se ajustaran a una distribución normal y presentarán homogeneidad de varianzas.

Para verificar si existen diferencias significativas entre el control positivo (luz blanca), el control negativo (oscuridad) y cada longitud de onda particular evaluada, se realizó un análisis estadístico tipo ANOVA ($p < 0.05$). También se determinó la significancia entre las medias de las diferentes variables de respuesta con la prueba post-hoc de Tukey. Las diferencias significativas se señalan con una letra en la parte superior de cada barra en la Figura 4.

RESULTADOS

La autoconstrucción de equipos didácticos establece escenarios de aprendizaje que combina el desarrollo de habilidades y destrezas al permitir que se visualice y experimente con condiciones controladas conceptos teóricos aprendidos, siendo una alternativa real que permite enmendar la insuficiencia y carencia de equipos didácticos.

El diseño sencillo y objetivo del fotogerminador presentado en la Figura 1, permite manipular 4 longitudes de onda así como el control positivo de luz blanca y la oscuridad como control negativo. Estas se definieron como las variables de entrada durante la germinación de semillas como se observa en la Figura 2 y 3.

Usualmente, los estudios de sensibilidad a la luz durante la germinación son realizados en condiciones de luz y oscuridad [8], por lo que al manipular cuatro longitudes de onda permitirá al alumno observar y cuantificar las variables de respuesta con mayor escrutinio. Además, se ha demostrado que el empleo de colores en el desarrollo de material didáctico juega un papel importante en la captación de la atención del joven estudiante [9].

Tabla 1. Porcentajes de germinación de semillas de alberjón (*L. hispanicus*) germinadas con iluminación de ledes de diferentes colores. Se presentan los valores promedio obtenidos para tres replicas con 25 semillas por ensayo.

Color de luz emitida por el led	Porcentaje de germinación
Rojo	87.5
Amarillo	85.4
Verde	81.3
Azul	72.9
Blanco	91.7
Oscuridad	72.9

En el ANEXO A se presentan los porcentajes de germinación de semillas de alberjón (*L. hispanicus*), las cuales al germinar de forma rápida y uniforme se establecieron como modelo de trabajo. Para los colores de led rojo, amarillo, verde y blanco los porcentajes de germinación oscilaron entre un 80 y 90%, valores similares a los obtenidos en ensayos con luz natural bajo condiciones ambientales análogas, sin embargo se observa una disminución al 73% con el led azul y en ausencia de luz.

La germinación es una etapa importante y crucial en el desarrollo de una futura planta, siendo un puente entre un estado protegido en la semilla a un estado vulnerable en la plántula que emerge, por ello la semilla ha desarrollado mecanismos que permiten censar variables mediambientales para elegir el momento preciso de efectuar este proceso [10]. Se ha establecido a los fitocromos como los fotorreceptores que perciben la luz roja (R) y roja lejana (FR) jugando importantes roles en la germinación de semillas, la eliminación de la etiolación, inducción de la floración, entre otras acciones [11].

En particular, la relación de germinación y la dependencia de la luz se ha documentado en pequeñas semillas con peso menor a 2 mg, mientras que para semillas de tamaño mayor se ha establecido que son independientes [12]. Por lo anterior, se justifica que no se observaran diferencias entre los porcentajes de germinación

ya que la semilla modelo de este trabajo tiene un peso promedio superior a los 300 mg.

En contraste, los resultados del crecimiento de la plántula sí fueron significativamente influenciados por las longitudes de onda empleadas. La Figura 5 presenta los promedios y la desviación estándar de los datos de crecimiento de las plántulas. En el panel A y B se presentan histogramas de las variables longitud de tallo y raíz, mientras en el panel C y D los correspondientes al peso de tallo y raíz. Los valores más altos de longitud de tallo se obtuvieron para las condiciones de oscuridad donde se alcanzó un valor de 8 cm. En contraste, en los colores blanco y azul la longitud promedio del tallo fue la más baja, mientras valores intermedios fueron encontrados para los colores amarillo verde y rojo. Un comportamiento similar se observó para la variable del peso del tallo.

Estos resultados se ajustan bien a lo reportado previamente y permite visualizar en el control negativo, en ausencia de luz, el fenómeno de etiolización de una plántula, el cual se caracteriza por un crecimiento prolongado del tallo, hojas más pequeñas y una particular clorosis, asociada al desarrollo de etioplastos los cuales no contienen clorofila ni membranas tilacoides apiladas, además presenta un fenotipo denominado "skotomorfogénico" caracterizado por hipocótilos alargados, raíces acortadas y cotiledones pequeños y cerrados [13].

Las diferencias significativas en las longitudes y peso de los tallos irradiados a diferentes longitudes de onda están apoyados por diversos reportes que muestran que la manipulación de la composición espectral con la que se ilumina durante el desarrollo de la plántula influye en el crecimiento y se pueden obtener diversos cambios funcionales o estructurales, como una mayor fotosíntesis y una morfogénesis modificada [14].

Los efectos en la longitud y peso de raíz no se ven afectados por la presencia o ausencia de luz al no existir diferencias significativas entre tratamientos, como se observa en la Figura 5, panel B y solo una pequeña diferencia en el panel D. Lo anterior es una excelente herramienta para que el alumno a través de la estadística inferencial contraste ambos factores de salida.

Los anteriores resultados respaldan el éxito de este fotogerminador y permiten recomendarlo como material didáctico para fortalecer la comprensión del papel que tiene la luz en el desarrollo de una planta, así como desarrollar su habilidad práctica para efectuar un experimento científico bajo un estricto rigor científico.

CONCLUSIONES

Se diseñó y validó un equipo didáctico "fotogerminador" empleando la interacción de la luz con la germinación de semillas y el crecimiento de la plántula. Por su sencillez en el diseño, facilidad para obtener los mate-

riales de su construcción, fácil operación, bajo costo, factibilidad en el acceso a sus consumibles, así como resultados rápidos y reproducibles, el prototipo propuesto puede emplearse como apoyo didáctico en el área de Biología y ajustarse al aprendizaje basado en proyectos.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Bravo, A. A., Ramírez, G. P., Faúndez, C. A., & Astudillo, H. F. (2016). *Propuesta didáctica constructivista para la adquisición de aprendizajes significativos de conceptos en física de fluidos. Formación universitaria*, 9(2), 105-114.

[2] Zambrano Briones, M. A., Hernández Díaz, A., & Mendoza Bravo, K. L. (2022). *El aprendizaje basado en proyectos como estrategia didáctica. Conrado*, 18(84), 172-182.

[3] Tromp, R. E., & Datzberger, S. (2021). *Global education policies versus local realities. Insights from Uganda and Mexico. Compare: a journal of comparative and international education*, 51(3), 356-374.

[4] Lund, H. H., Exner, M., Jensen, N. E., Leggieri, M., Outzen, M., Ravn-Haren, G., Von Sehested M., Vaering A and Andersen, R. (2022). *GrowBot: An Educational Robotic System for Growing Food. Applied Sciences*, 12(11), 5539.

[5] Legris, M., Ince, Y. Ç., & Fankhauser, C. (2019). *Molecular mechanisms underlying phytochrome-controlled morphogenesis in plants. Nature communications*, 10(1), 5219.

[6] Stamford, J. D., Stevens, J., Mullineaux, P. M., & Lawson, T. (2023). *LED Lighting: A Grower's Guide to Light Spectra. HortScience*, 58(2), 180-196.

[7] Seefeldt, S. (2012). *Procedures for the Wet PaperTowel Germination Test. Fairbanks: University of Alaska Fairbanks. <https://cespubs.uaf.edu/publications/?cat=7>*

[8] Tiansawat, P., & Dalling, J. W. (2013). *Differential seed germination responses to the ratio of red to far-red light in temperate and tropical species. Plant Ecology*, 214, 751-764.

[9] Chang, Bo; Xu, Renmei; and Watt, Tiffany (2018). "The Impact of Colors on Learning," *Adult Education Research Conference. <https://newprairiepress.org/aerc/2018/papers/30>*

[10] Yang, L., Liu, S. & Lin, R. *The role of light in regulating seed dormancy and germination. J. Integr. Plant Biol.* 62, 1310-1326 (2020).

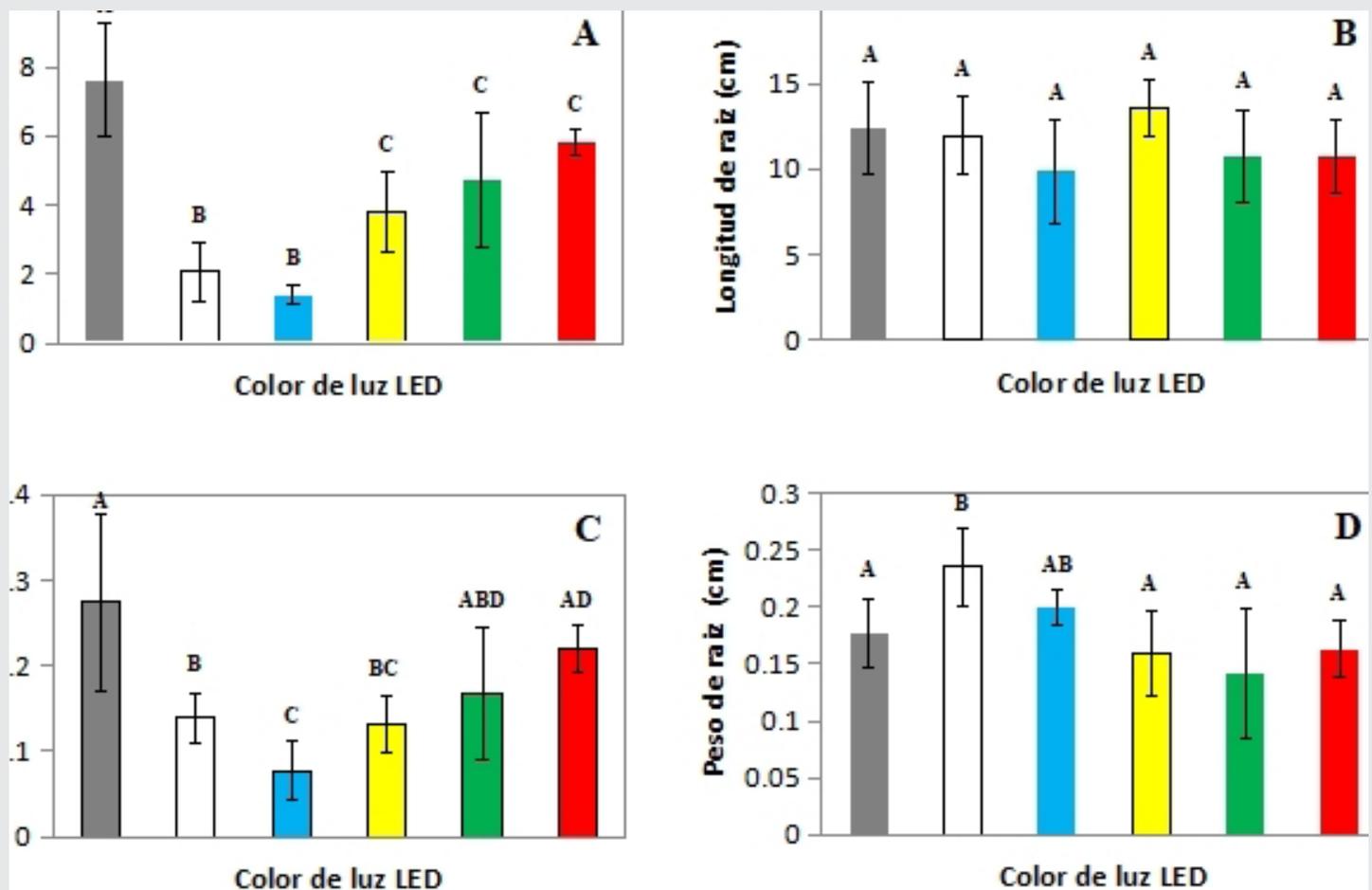
[11] Li, Z., Sheerin, D. J., von Roepenack-Lahaye, E., Stahl, M., & Hiltbrunner, A. (2022). The phytochrome interacting proteins ERF55 and ERF58 repress light-induced seed germination in *Arabidopsis thaliana*. *Nature Communications*, 13(1), 1656.

[12] Pearson TRH, Burslem DFRP, Mullins CE, Dalling JW (2003). Functional significance of photoblastic germination in neotropical pioneer trees: a seed's eye view. *Funct Ecol* 17:394-402

[13] Armarego-Marriott, T., Sandoval-Ibañez, O., & Kowalewska, Ł. (2020). Beyond the darkness: recent lessons from etiolation and de-etiolation studies. *Journal of experimental botany*, 71(4), 1215-1225.

[14] Moe, R., Grimstad, S.O., Gislserod, H.R., 2006. The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. *Acta Hort.* 711, 35-42

ANEXO A



Datos del crecimiento y peso de plántulas de alberjón (*L. hispanicus*) germinadas con iluminación de ledes de diferentes colores. Grupos de 25 semillas fueron germinadas bajo iluminación de ledes de color blanco, azul (470 +/-15nm), amarillo (585 +/-15nm), verde (568 +/-15nm) y rojo (700 +/-15nm) al día 7 posterior a la siembra. Cada barra corresponde con el color del led empleado. La barra oscura corresponde al control negativo (obscuridad). En el panel A y B se presenta el promedio de la longitud de tallo y raíz, mientras en el panel C y D se indica el promedio del peso de tallo y raíz de las plántulas germinadas a las condiciones indicadas.