

Efecto de la Radiación Láser en Semillas sobre la Germinación y Rendimiento del Cacahuate en Campo (*Arachis hypogaea* L.) Effect of Laser Radiation in Seeds on Germination and Yield of Peanuts in the Field (*Arachis hypogaea* L.)

Ivonne Ruíz-Morales¹ , José Gregorio Joya-Dávila² ,
Federico Antonio Gutiérrez-Miceli¹ y Ana Martín Santos-Espinoza^{1†}

¹ Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Carretera Panamericana km 1080, Boulevares. 29050 Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México; (I.R.M.), (F.A.G.M.), (A.M.S.E.).

[†] Autora para correspondencia: D13270770@tuxtla.tecnm.mx

² Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California. Carretera a Delta s/n, Ejido Nuevo León. 21705 Nuevo León, Baja California, México; (J.G.J.D.).

RESUMEN

El cacahuate es una planta leguminosa que, además de presentar efectos positivos en la calidad del suelo, este cultivo proporciona semillas oleaginosas, las cuales presentan múltiples usos, debido a que son nutritivas, medicinales y económicamente importantes. Actualmente, diversos estudios se enfocan en aumentar el contenido de compuestos antioxidantes, así como en mejorar la productividad y calidad de los cultivos, con el objetivo de desarrollar ingredientes y alimentos funcionales de mayor calidad. En este sentido, el objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la radiación láser en semillas de cacahuate sobre parámetros agronómicos del cultivo en condiciones de campo. El experimento se estableció en condiciones de campo en la localidad de Nicolás Bravo, perteneciente al municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. Las semillas fueron irradiadas con una barra motorizada de láser rojo de la marca steelpro® con longitud de onda de 636 nm e intensidad de 120 mW. El tiempo de exposición de semillas a láser rojo fue de 15 minutos y se emplearon semillas no irradiadas como control. Cada unidad experimental constó de 100 semillas con seis repeticiones. Se evaluó el porcentaje de germinación, características agronómicas del cacahuate y rendimiento de vainas. Los resultados muestran que la radiación láser aplicada a las semillas antes de la siembra tiene efectos positivos en las características agronómicas de las vainas y semillas, tales como: el incremento en el número de vainas y semillas por planta, el peso seco de ambos componentes, así como el rendimiento de vainas cosechadas en condiciones de campo. Por lo tanto, la aplicación de radiación láser en semillas representa una alternativa biotecnológica para incrementar la producción de cacahuate. Se sugiere realizar estudios posteriores en las semillas cosechadas para conocer si hay cambios o mejoras en la calidad nutrimental de las semillas.

Palabras clave: bioestimulación física, características agronómicas, rendimiento de vainas.

SUMMARY

Peanut is a leguminous plant that, in addition to having positive effects on soil quality, provides oilseeds, which have multiple uses, because they are nutritious, medicinal, and economically important. Currently, various studies are focused on increasing the content of antioxidant compounds, as well as improving the productivity and quality of crops, with the aim of developing higher quality ingredients and functional foods. In this sense, the objective of this study was to evaluate the effects of laser radiation on peanut seeds on agronomic parameters of the crop under field conditions. The experiment was established under field conditions in the town



Cita recomendada:

Ruiz-Morales, I., Joya-Dávila, J. G., Gutiérrez-Miceli, F. A., & Santos-Espinoza, A. M. (2025). Efecto de la Radiación Láser en Semillas sobre la Germinación y Rendimiento del Cacahuate en Campo (*Arachis hypogaea* L.) *Latinoamericana*, 43, 1-10. e2005. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2005>

Recibido: 19 de junio de 2024.
Aceptado: 12 de enero de 2025.
Artículo. Volumen 43.
Marzo de 2025.

Editor de Sección:
Dr. Víctor Manuel Ruiz Valdiviezo



Copyright: © 2025 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

of Nicolás Bravo, belonging to the municipality of Chiapa de Corzo, Chiapas. The seeds were irradiated with a motorized red laser bar of the steelpro® brand, with a wavelength of 636 nm and an intensity of 120 mW. The exposure time of seeds to the red laser was 15 minutes and non-irradiated seeds were used as a control. Each experimental unit consisted of 100 seeds with six replicates. Germination percentage, agronomic characteristics of peanuts and pod yield were evaluated. The results show that laser radiation applied to seeds before sowing has positive effects on the agronomic characteristics of pods and seeds such as: the increase in the number of pods and seeds per plant, the dry weight of both components, as well as the yield of pods harvested under field conditions. Therefore, laser radiation applied to seeds is a biotechnological alternative to increase peanut production. It is suggested that further studies be carried out on the harvested seeds to determine if there are changes or improvements in the nutritional quality of the seeds.

Index words: *physical biostimulation, agronomic characteristics, pod yield.*

INTRODUCCIÓN

El cacahuete (*Arachis hypogaea* L.) es una leguminosa que se cultiva en zonas tropicales y subtropicales (FAO, 2002). Este cultivo se ha convertido en uno de los más importantes a nivel mundial, debido a que su consumo en la dieta presenta múltiples beneficios en la salud humana, destacando el fortalecimiento del sistema inmune, previniendo enfermedades cardiovasculares y aportando energía al cuerpo humano (Akram, Shafiq y Ashraf, 2018). Los granos de cacahuete son ricos en proteínas, aceites y fibra. Además, también contiene otros componentes como resveratrol, arginina, coenzima Q1 y poliesteroles que lo hacen un alimento saludable (Davis y Dean, 2016). En los últimos años, se han desarrollado diversas biotecnologías para incrementar el contenido de estos compuestos de interés en los cultivos, incluyendo el establecimiento de la simbiosis entre plantas inoculadas con lixiviado de vermicompost y micorrizas comerciales (Sánchez-Roque, Pérez, Santos y Gutiérrez, 2022). Otras tecnologías incluyen el cebado de semillas, la cual es una técnica eficaz para mejorar la germinación, aumentar el contenido de compuestos antioxidantes y mejorar la productividad de los cultivos. Sin embargo, los métodos convencionales de cebado de semillas basados en productos químicos están limitados debido a la contaminación agrícola por la persistencia de los productos químicos en las plantas o en el medio ambiente (Thakur, Tiwari, Kataria y Anand, 2022). En este sentido, la utilización de métodos físicos de cebado de semillas para mejorar la productividad de las plantas representa una alternativa biotecnológica al tener un enfoque ecológico y rentable (Almuhayawi et al., 2020). Dentro del cebado con agentes físicos se encuentra la radiación ionizante, como los rayos X y los rayos gamma, y la radiación no ionizante, como las ondas ultrasónicas (Ding et al., 2018), el campo magnético (Hussain, Dastgeer, Afzal, Hussain y Kanwar, 2020), choque frío (Ilyas et al., 2022), la luz láser (Almuhayawi et al., 2020) y radiación UV (Zhu et al., 2020). La bioestimulación láser es un fenómeno físico que se ha utilizado en la agricultura y consiste en la capacidad de absorber y almacenar energía en semillas o plantas para transformarla en energía química y utilizarla en el proceso de germinación o en etapas posteriores de crecimiento vegetal (Hernández-Aguilar et al., 2016). La aplicación del tratamiento láser empleando láser de He-Ne (632.8nm) y diodos láser (650, 660 nm) en el sector agrícola se ha estudiado en semillas de cereales y vegetales antes de la siembra (Srećković, Vasić, Dukić, Jevtić y Jovanić, 2014). Diversos estudios han reportado que la bioestimulación láser mejora la calidad fisiológica en cultivos como *Zea mays* y *Triticum* spp. (Tóth, Szörényi y Toth, 1993; Joshi, Joshi y Agrawal, 2012), y leguminosas como *Medicago sativa*, *Vicia faba* y *Lathyrus sativus* (Wilczek, Koper, Cwintal y Kornilowicz, 2005; Qi, Yue, Han y Wang, 2002; Truchliński, Koper y Starczynowska, 2002). En contraste, otros trabajos reportan que se presentan efectos negativos o nulos en diversos cultivos de interés (Xiao, Chen y Han, 2012) debido a largos tiempos de exposición e intensidades, por lo que, es necesario identificar su efecto sobre el comportamiento de semillas provenientes de plantas de interés agrícola, lo que permitirá establecer los parámetros óptimos de irradiación solar, necesarios para un desarrollo fenológico y productivo favorable. La bioestimulación láser tipo diodo en semillas de cacahuete no ha sido estudiada como tratamiento antes de la siembra, por lo que la presente investigación tuvo como objetivo estimar la expresión fenológica y productiva de un cultivo de cacahuete, establecido con semillas previamente expuestas a radiación láser.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Vegetal

Las semillas de cacahuete (*Arachis hypogaea* L.), variedad criolla, utilizadas para este estudio fueron recolectadas en la localidad de Jericó, perteneciente al Municipio de El Parral, Chiapas, México. Se emplearon semillas de una longitud de 1.5 cm, mantenidas previamente en bolsas de poliestireno a una temperatura de 20 ± 2 °C y una humedad relativa de $45 \pm 2\%$, con la finalidad de disminuir su actividad metabólica y con ello evitar la pérdida de viabilidad.

Ubicación y Condiciones del Campo Experimental

Los experimentos se establecieron en una superficie de 240 m² del rancho "Dos regalos" en la localidad de Nicolás Bravo, perteneciente al municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas (Figura 1). Ubicado a 16° 30' 39" N y 92° 59' 32" O, que corresponde a regiones de clima cálido y subhúmedo; promedia los 24 °C. La región experimenta una precipitación media anual de 1841 mm. El suelo contiene 20.35 mg kg⁻¹ de fósforo disponible, 9.66% de materia orgánica, 0.67% de nitrógeno total, 7.31% de carbono total, 1.46 cmol kg⁻¹ de potasio disponible y 32.99 cmol kg⁻¹ capacidad de intercambio de cationes. De acuerdo con las especificaciones de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), se clasifica como suelo fértil.

Tratamientos y Condiciones de Siembra

Las semillas fueron irradiadas con una barra motorizada de láser rojo de la marca steelpro® tipo diodo, con longitud de onda de 636 nm e intensidad de 120 mW. Después de realizar pruebas para seleccionar el tiempo de exposición adecuado, las condiciones seleccionadas de exposición al láser rojo fueron: tiempo de exposición de 15 minutos a una distancia de la barra a la semilla de 15 cm. Como control, se utilizaron semillas no irradiadas. Se midió la temperatura superficial de las semillas de control y de tratamiento láser antes de ser sembradas con la ayuda de una cámara termográfica infrarroja marca UNI-T.

Las semillas de control y tratamiento láser se sembraron en condiciones normales de campo, mediante siembra tradicional, a contra pared con una profundidad de 4-5 cm, bajo un arreglo topológico que incluyó una distancia entre plantas de 30 cm y de 40 cm entre hileras, colocando 100 semillas por hilera. La densidad de siembra fue de 2.5 plantas m⁻². La unidad experimental constó de 100 semillas por hilera con 6 repeticiones por tratamiento.

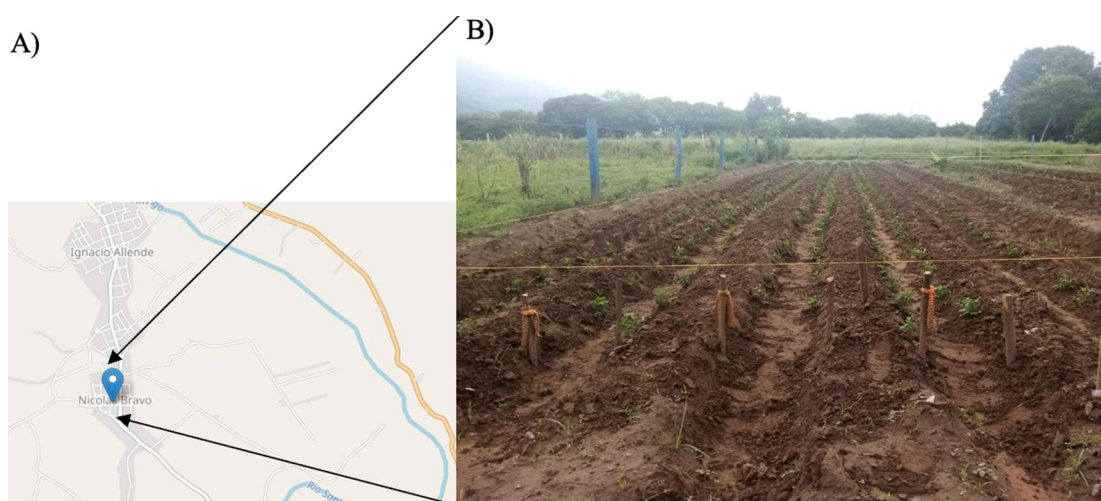


Figura.1 A) Localización y ubicación en el mapa, B) Vista de campo y distribución aleatoria de los tratamientos láser evaluados. Fuente del mapa: Google maps.

Figure 1 A) Location and positioning on the map, B) Field view and random distribution of the evaluated laser treatments. Map source: Google maps.

Cosecha y Muestreo de Plantas

La cosecha se realizó de forma manual, a los 115 días, realizando un muestreo completamente al azar, tomando 10 plantas de cada hilera.

Evaluación de Características Agronómicas del Cacahuete

El porcentaje de germinación de semillas se calculó con base en las semillas germinadas y semillas no germinadas con y sin tratamiento láser de cada unidad experimental, los datos se analizaron con una prueba de Chi cuadrada ($P > 0.05$) para comprobar la dependencia de las variables usando el software estadístico Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, 2018).

De los parámetros morfométricos del cacahuete se determinaron el número de vainas por planta, peso seco de vainas por planta (g), longitud, ancho ecuatorial y grosor de vainas (mm), número de semillas por planta, peso de semillas por planta, longitud, ancho ecuatorial y grosor de las semillas (mm) y peso del cascabello por planta (g). Para el análisis de datos de las características agronómicas antes mencionadas, se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) para las variables de interés del control y tratamiento para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa ($P \leq 0.05$) usando el software estadístico Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, 2018).

Los rendimientos de vainas se reportaron en kg de vainas producidas en una superficie de 240 m² y en kg de vainas por hectárea (kg ha⁻¹), considerando la distancia de siembra, producción por planta y masa de las vainas. Este cálculo se realizó multiplicando por la densidad de siembra en una hectárea y el porcentaje de germinación. Los datos obtenidos se analizaron con una prueba de Chi cuadrada para comprobar la dependencia de las variables usando el software estadístico Statgraphics Centurion XVIII (Statgraphics Technologies, 2018).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la radiación láser de semillas de cacahuete como pretratamiento antes de la siembra aumentó el porcentaje de germinación de semillas en condiciones de campo, como se observa en la Figura 2. Puesto que el valor- P de la prueba de independencia fue mayor a 0.05 ($P = 0.0914$), nos indicó que el incremento en la germinación de semillas es independiente del tratamiento láser con un nivel de confianza del 95.0%. Esto está relacionado con que la germinación de semillas se ve afectada por diversos factores, tanto bióticos como abióticos, por ejemplo, el contenido de agua imbibida de una semilla, la velocidad de hidratación, temperatura, luz, oxígeno, dióxido de carbono, la presencia de diversos patógenos, entre otros (Lamichhane *et al.*, 2018), por lo que, aunque los resultados no indican una dependencia del aumento de la germinación con el tratamiento láser, esto podría deberse a la sinergia de eventos simultáneos y condiciones óptimas que favorecen la germinación de las semillas. Se ha reportado por Hernández-Aguilar *et al.* (2016) que el láser aplicado a semillas puede generar una acción térmica, provocando un calentamiento de las células o moléculas que eficientemente absorban la luz a esa longitud de onda. Esa energía, en consecuencia, es convertida en calor, lo que podría estar causando aumentos en las actividades enzimáticas del proceso de germinación y acelerar los procesos metabólicos para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

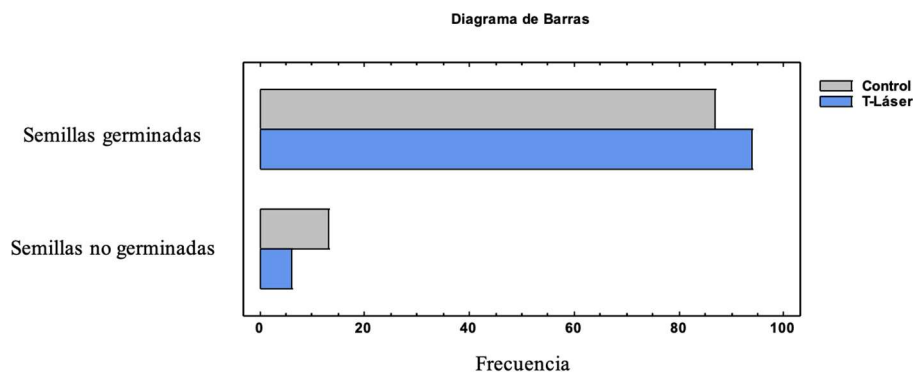


Figura 2. Diagrama de barras de la germinación de semillas no irradiadas (control) y semillas irradiadas con tratamiento láser. Media de cien semillas con seis repeticiones e intervalo de confianza para $P \leq 0.05$.

Figure 2. Bar chart of germination of non-irradiated seeds (Control) and seeds irradiated with laser treatment. Mean of one hundred seeds with six replicates and confidence interval for $P \leq 0.05$.

Específicamente en cultivos de cacahuete, se ha descrito que los factores que influyen significativamente sobre la germinación de las semillas son la fecha de siembra, la temperatura y el cultivar, según lo reportado por Prasad, Boote, Thomas, Allen y Gorbet (2006). El efecto de la temperatura está directamente relacionado con las enzimas que regulan la velocidad de las reacciones bioquímicas que ocurren en la semilla tras su rehidratación durante el proceso de germinación (Rajjou *et al.*, 2012).

Diversos estudios han considerado la radiación láser como un factor estimulante para la germinación de semillas en cultivos de interés agrícola como abeto y alerces (Grishkanich *et al.*, 2016), maíz (Hernández-Aguilar, Domínguez, Cruz y Tsonchev, 2015), trigo (Samiya, Aftab y Younus, 2020), guisantes (Podlešna, Gładyszewska, Podlešny y Zgrajka, 2015) y semillas de girasol (Perveen *et al.*, 2010). Por lo tanto, este es el primer reporte que indica que la radiación de láser rojo aplicada a semillas como pre-tratamiento antes de la siembra en tiempos de exposición de 15 minutos mejora la germinación de cacahuete en condiciones de campo.

Estas respuestas al láser rojo probablemente estén relacionadas con el mecanismo del funcionamiento del fitocromo. Debido a que cuando la luz láser es absorbida por los fitocromos presentes en el endospermo de las semillas, aumenta la energía interna de esta estructura vegetal porque convierte la energía luminosa en energía química (Asghar, Jamil, Iqbal y Abbas 2016). En consecuencia, la energía producida se utiliza para incrementar las actividades enzimáticas, mejorando así los procesos metabólicos. También se ha descrito que puede inducir propiedades termodinámicas y procesos fisiológicos y bioquímicos, lo que resulta en un mejor crecimiento y mayor rendimiento de las plantas (Perveen *et al.*, 2010). Adicionalmente, se ha descrito que el tratamiento láser de semillas inicia reacciones inmediatas y de radicales libres que inducen la activación celular, acelerando la división celular, generando un aumento en el número de células (índice mitótico) (Dudareva, Lankevich, Sumtsova, Rudikovcka y Salyaev, 2007).

Por otro lado, es importante conocer los cambios de temperatura en las semillas irradiadas con láser respecto a las no irradiadas porque esto podría tener una importancia sustancial en las mejoras de los procesos fisiológicos y bioquímicos que ocurren en la germinación y en las etapas posteriores de crecimiento vegetal. Por lo anterior, se determinó la temperatura superficial de las semillas de cacahuete antes de la siembra (Cuadro 1). Los resultados muestran que existió una variación de temperatura en las semillas, producida por la exposición de 15 minutos a radiación láser; este aumento corresponde a 4.45 °C con respecto a las semillas control.

En el Cuadro 2 se presentan los resultados de los parámetros morfométricos de las vainas cosechadas, los datos muestran que la radiación láser de semillas como pretratamiento antes de la siembra generó un efecto positivo sobre algunos de los parámetros morfométricos de las vainas de cacahuete, principalmente en el número de vainas por planta, peso seco de vainas por planta y en la longitud de vainas. Puesto que el valor-*P* del ANOVA fue menor a 0.05 de las variables antes mencionadas, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del tratamiento láser y control con un nivel del 95.0% de confianza.

Las vainas cosechadas provenientes de semillas tratadas con láser incrementaron en un 37% el número de vainas por planta, 33% en peso seco de las vainas por planta y 24% en la longitud de las vainas con respecto a las vainas control.

Cuadro 1. Temperatura superficial de semillas no irradiadas (Control) y semillas irradiadas con tratamiento láser antes de la siembra en condiciones de campo.
Table 1. Surface temperature of non-irradiated seeds (Control) and seeds irradiated with laser treatment before sowing under field conditions.

Tratamientos	Temperatura superficial
	°C
Control	29±0.43
Tratamiento láser	33.45±0.72

Valores promedios ± desviación estándar.
 Average values ± standard deviation.

Cuadro 2. Parámetros morfométricos de vainas cosechadas derivadas de semillas no irradiadas (Control) y semillas irradiadas con tratamiento láser antes de la siembra.
Table 2. Morphometric parameters of harvested pods derived from non-irradiated seeds (Control) and seeds irradiated with laser treatment before sowing.

Tratamientos	Número vainas por planta	Peso seco de vainas por planta	Longitud de vainas	Ancho ecuatorial de vainas	Grosor de vainas
		g		mm	
Control	24.66±5.45	32.69±8.89	24.35±4.52	13.01±2.18	13.16±1.24
T-láser	38.97±0.41	48.99±1.83	32.14±0.86	14.58±0.38	13.96±0.69
C.V.(%)	26.92	25.99	18.29	11.90	7.39
Valor-P	0.0106	0.0358	0.0430	0.2871	0.3878

Valores promedios ± desviación estándar. ANOVA de las variables evaluadas, C.V. (%) = coeficiente de variación y valor-P para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los tratamientos.
 Mean values ± standard deviation. ANOVA of the variables evaluated, C.V. (%) = coefficient of variation and P-value to determine if there is a statistically significant difference between the mean of the treatments.

El incremento en el número de vainas formadas y la longitud de las vainas podría estar relacionado con las propiedades bioestimulantes de la luz láser roja. Diversos trabajos como el de Mozdzeń, Barabasz y Zandi, (2020) mencionan que el láser rojo aplicado a semillas estimula el crecimiento de las plantas desde las primeras etapas fenológicas del cultivo, generando así una mayor biomasa foliar. Estas respuestas se deben a que la luz láser rojo genera cambios en la fisiología de las plántulas, mediante la estimulación del contenido de clorofila en las hojas de las plantas y aumentando la actividad fotosintética, ya que es la fuente de energía para la fijación de carbono.

Es importante mencionar que en esta investigación, la radiación láser rojo generó cambios en el crecimiento y biomasa foliar de las plantas que se observaron desde las primeras etapas de crecimiento y perduraron hasta la maduración del fruto (Figura 3).

La formación de mayor número de vainas y el mayor tamaño de estas, puede deberse a que la luz láser aumenta la actividad fotosintética y la transpiración (Rybiński y Garczyński, 2004) lo que se relaciona con una mayor tasa de fotosíntesis, así como la tasa de asimilación media diaria de CO₂ durante el ciclo de producción del cultivo, incrementando el rendimiento en la producción de frutos (Zhang *et al.*, 2020).



Figura 3. Biomasa foliar de plantas de cacahuete de 39 días de edad bajo la influencia del tratamiento láser (B) y control (A).
Figure 3. Leaf biomass of 39-day-old peanut plants under the influence of laser treatment (B) and control (A).

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de los parámetros morfométricos de las semillas cosechadas, los datos muestran que la radiación láser en semillas como pretratamiento antes de la siembra generó un efecto estimulante sobre algunos de los parámetros morfométricos de las semillas de cacahuate, principalmente en el número de semillas por planta, peso seco de semillas por planta y la longitud de las semillas.

Puesto que el valor-*P* del ANOVA fue menor a 0.05 de las variables antes mencionadas, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias del tratamiento láser y control con un nivel del 95.0% de confianza. Las semillas recolectadas en la cosecha derivadas de semillas tratadas con láser incrementaron en un 10% el número de semillas por planta, 23% el peso seco de las semillas por planta y 29% en la longitud de semillas con respecto a las semillas control.

Respecto a los parámetros morfométricos de las semillas, como ancho ecuatorial, grosor y peso del cascabillo podemos observar que no hubo efecto estimulante significativo del tratamiento láser con respecto al control (Cuadro 3), lo que sugiere que la estimulación que generó la radiación láser aplicado a las semillas se observó en la etapa final de la maduración de las semillas, esto puede deberse a que el crecimiento individual de los frutos y su tamaño dependen de la salud y el vigor de las hojas más próximas al fruto, es decir, cuanto mayor sea el número de hojas, mejor será la habilidad de las plantas para aprovechar el agua y producir carbohidratos para el llenado del fruto (Okello, Heuvelink, Visser, Struik y Marcelis, 2015).

La radiación láser de semillas de cacahuate como pre-tratamiento antes de la siembra incrementó el rendimiento de vainas producidas (kg) en la superficie de 240 m² y el rendimiento de vainas por hectárea (kg ha⁻¹), como se observa en el Cuadro 4. Con base a las vainas producidas con y sin tratamiento láser se realizó la prueba de independencia de chi cuadrada (*P* > 0.05). Puesto que el valor-*P* de la prueba de independencia fue menor a 0.05, nos indicó que el incremento en el rendimiento de las vainas es dependiente del tratamiento láser con un nivel de confianza del 95.0 por ciento.

El efecto de la radiación láser de semillas como pre-tratamiento antes de la siembra sobre el rendimiento de cultivos ha sido poco estudiado debido a que la mayoría de los experimentos se han realizado en condiciones de laboratorio e invernadero y no se ha evaluado el ciclo de crecimiento completo y la productividad de los cultivos de interés en condiciones de campo. Pocos trabajos como Podlešna *et al.* (2015) han evaluado el efecto de la radiación láser de semillas de guisantes en la emergencia, tasa de crecimiento y rendimiento del cultivo. Sus resultados presentan un efecto estimulante sobre las etapas de crecimiento, provocando una aceleración en la floración y maduración de las plantas. Además, destacaron que el tratamiento láser mejoró las características morfológicas de las plantas, el rendimiento de los órganos vegetativos y reproductivos del guisante, lo que resultó en un aumento en el rendimiento de vainas y semillas por planta. Estas respuestas estimulantes del tratamiento láser son similares a lo reportado en esta investigación, al observar el crecimiento más rápido de las plantas de cacahuate y la generación de mayor biomasa vegetal y raíces secundarias, las cuales fueron notorias desde las primeras etapas de crecimiento del cultivo.

Por otro lado, también se ha reportado que diferentes longitudes de onda láser influyen positivamente en el crecimiento, desarrollo, productividad y rendimiento de otros cultivos de interés, como el maíz (Hasan, Hanafiah, Aeyad, AlHilfy y Said, 2020), generando aumentos significativos sobre la altura de la planta, área foliar, número de hileras por mazorca, rendimiento de semilla y peso del grano.

Cuadro 3. Parámetros morfométricos de semillas cosechadas derivadas de semillas no irradiadas (Control) y semillas irradiadas con tratamiento láser antes de la siembra.

Table 3. Morphometric parameters of harvested seeds derived from non-irradiated seeds (Control) and seeds irradiated with laser treatment before sowing.

Tratamientos	Número de semillas por planta	Peso de semillas por planta	Longitud de semillas	Ancho ecuatorial de semillas	Grosor de semillas	Peso del cascabillo
		g	----- mm -----			g
Control	57.64±2.82	28.46±2.07	13.14±2.29	10.10±1.63	7.76±0.40	12.36±0.69
T-láser	63.36±1.60	35.11±1.82	16.94±0.20	9.24±0.24	7.63±0.24	13.41±0.47
C.V. (%)	6.19	12.71	16.88	11.88	4.03	6.07
Valor-P	0.0379	0.0141	0.0463	0.4187	0.6619	0.0964

Valores promedios ± desviación estándar. ANOVA de las variables evaluadas, C.V. (%) = coeficiente de variación y valor-*P* para determinar si existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de los tratamientos.

Mean values ± standard deviation. ANOVA of the variables evaluated, C.V. (%) = coefficient of variation and *P*-value to determine if there is a statistically significant difference between the mean of the treatments.

Cuadro 4. Rendimientos de vainas cosechadas derivadas de semillas no irradiadas (Control) y semillas irradiadas con tratamiento láser antes de la siembra.
Table 4. Yields of harvested pods derived from non-irradiated seeds (Control) and seeds irradiated with laser treatment before sowing.

Tratamientos	Rendimiento de vainas cosechadas	
	kg vainas producidas	kg vainas ha ⁻¹
Control	19.62 ± 2.63	2724.99 ± 365.57
Tratamiento láser	29.36 ± 0.84	4078.96 ± 116.90
Valor-P	0.0017	0.0000

Valores promedios ± desviación estándar. Prueba chi cuadrada para comprobar la dependencia de las variables ($P \leq 0.05$).
Mean values ± standard deviation. Chi-square test to evaluate the dependence of the variables ($P \leq 0.05$).

Por lo tanto, la longitud de onda y el tipo de láser empleado pueden generar estímulos en la semilla, y que estos estímulos perduren en las plantas como especie de "memoria vegetal", la cual ayuda a mejorar el crecimiento y desarrollo de las plantas y, como resultado, aumentan la productividad de las cosechas. Adicionalmente, es importante mencionar que la sinergia de diversos procesos metabólicos y genéticos que ocurren simultáneamente cuando la semilla es irradiada con láser podría ser la responsable de mejorar la productividad de los cultivos en condiciones de campo.

Por otro lado, el rendimiento de los cultivos también es el resultado de la interacción de múltiples factores ambientales, la intensidad de la luz y la longitud de onda son uno de los muchos factores que impulsan principalmente la producción de cultivos (Możdżeń *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

La radiación láser de semillas de cacahuete como pre-tratamiento antes de la siembra es una alternativa biotecnológica eficiente que estimuló los parámetros morfométricos de las vainas, semillas y mejoró el rendimiento del cacahuete en condiciones de campo. Estos resultados permiten concluir que el láser rojo aplicado a semillas de cacahuete genera diversos estímulos en la semilla, y que estos estímulos perduran en las plantas como una especie de "memoria vegetal" al inducir cambios en la fisiología y bioquímica de las plantas, lo que da como resultado mejores características morfométricas de vainas y semillas de cacahuete.

Se sugiere realizar estudios posteriores de las semillas cosechadas para conocer si hay cambios o mejoras en la calidad nutrimental de las semillas. Adicionalmente, es necesario realizar más investigaciones para conocer los mecanismos de acción del láser en las células vegetales que aún no se han descrito claramente.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Esta investigación fue financiada por el Tecnológico Nacional de México, a través del proyecto No.19876, titulado: "Estimulación de semillas para promover cambios en el crecimiento, rendimiento y calidad nutricional en cacahuate y maíz cultivados en campo".

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Trabajo de campo: J.G.J.D e I.R.M. Metodología: J.G.J.D. Análisis de laboratorio: I.R.M. y A.M.S.E. Análisis de datos: A.M.S.E. y F.A.G.M. Escritura de primer borrador: I.R.M. y A.M.S.E. Análisis y discusión de los resultados: A.M.S.E. y J.G.J.D. Revisión y edición de la última versión del manuscrito: I.R.M., J.G.J.D., F.A.G.M. y A.M.S.E.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Akram, N. A., Shafiq, F., & Ashraf, M. (2018). Peanut (*Arachis hypogaea* L.): A prospective legume crop to offer multiple Health benefits under changing climate. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 17(5), 1325-1338. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12383>.
- Almuhayawi, M. S., Hassan, A. H., Abdel-Mawgoud, M., Khamis, G., Selim, S., Al Jaouni, S. K., & AbdElgawad, H. (2021). Laser light as a promising approach to improve the nutritional value, antioxidant capacity and anti-inflammatory activity of flavonoid-rich buckwheat sprouts. *Food Chemistry*, 345, 128788. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128788>.
- Asghar, T., Jamil, Y., Iqbal, M., & Abbas, M. (2016). Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 165, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016>.
- Davis, J. P., & Dean, L. L. (2016). Peanut composition, flavor and nutrition. In: H. T. Stalker, & R. F. Wilson (Eds.). *Peanuts Genetics, Processing, and Utilization* (pp. 289-345). Champaign, IL, USA: AOCS Press.
- Ding, J., Ulanov, A. V., Dong, M., Yang, T., Nemzer, B. V., Xiong, S., ... & Feng, H. (2018). Enhancement of gamma-aminobutyric acid (GABA) and other health-related metabolites in germinated red rice (*Oryza sativa* L.) by ultrasonication. *Ultrasonics Sonochemistry*, 40, 791-797. <https://doi.org/10.1016/j.ulsonch.2017.08.029>.
- Dudareva, L. V., Lankevich, S. V., Sumtsova, V. M., Rudikovcka, E. G., & Salyaev, R. K. (2007). Possible paths of the impact of low-intensity laser radiation on membrane structures in plant cells. *Annu. Wheat Newsl*, 53, 70-72.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2002). GROUNDNUT: Post-harvest Operations. Consultado el 13 de marzo, 2024, desde <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/97ab89da-fa26-4821-a62c-1fd771455a3e/content>
- Grishkanich, A., Zhevnikov, A., Polyakov, V., Kascheev, S., Sidorov, I., Ruzankina, J., ... & Mak, A. (2016). Influence of laser radiation on the growth and development of seeds of agricultural plants. In *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care V* (pp. 403-408). Bellingham, WA, USA: SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2228959>.
- Hasan, M., Hanafiah, M. M., Aeyad-Taha, Z., Al-Hilfy, I. H. H., & Said, M. N. M. (2020). Laser Irradiation Effects at Different Wavelengths on Phenology and Yield Components of Pretreated Maize Seed. *Applied Sciences*, 10(3), 1189. <https://doi.org/10.3390/app10031189>.
- Hernández-Aguilar, C., Domínguez-Pacheco, F. A., Cruz-Orea, A., & Tsonchev, R. I. (2015). Thermal Effects of Laser Irradiation on Maize Seeds. *International Agrophysics*, 29(2), 147-156. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0028>.
- Hernández-Aguilar, C., Domínguez-Pacheco, A., Cruz-Orea, A., Podlešna, A., Ivanov, R., Carballo-Carballo, A., ... & López-Bonilla, J. L. (2016). Bioestimulación láser en semillas y plantas. *Gayana. Botánica*, 73(1), 132-149. <https://doi.org/10.4067/s0717-66432016000100015>.
- Hussain, M. S., Dastgeer, G., Afzal, A. M., Hussain, S., & Kanwar, R. R. (2020). Eco-friendly magnetic field treatment to enhance wheat yield and seed germination growth. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100299>.
- Ilyas, M., Khan, W. A., Ali, T., Ahmad, N., Khan, Z., Fazal, H., ... & Rizwan, M. (2022). Cold stress-induced seed germination and biosynthesis of polyphenolics content in medicinally important Brassica rapa. *Phytomedicine Plus*, 2(1), 100185. <https://doi.org/10.1016/j.phyplu.2021.100185>.
- Joshi, S., Joshi, G. C., & Agrawal, H. M. (2012). Study on the effect of laser irradiation on wheat (*Triticum aestivum* L.) variety PBW-373 seeds on zinc uptake by wheat plants. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 294(3), 391-394. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1615-3>.
- Lamichhane, J. R., Debaeke, P., Steinberg, C., You, M. P., Barbetti, M. J., & Aubertot, J. N. (2018). Abiotic and biotic factors affecting crop seed germination and seedling emergence: a conceptual framework. *Plant and Soil*, 432, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3780-9>.
- Możdżeń, K., Barabasz-Krasny, B., & Zandi, P. (2020). Effect of long-term of He-Ne laser light irradiation on selected physiological processes of triticale. *Plants*, 9(12), 1703. <https://doi.org/10.3390/plants9121703>.
- Okello, R. C., Heuvelink, E. P., de Visser, P. H., Struik, P. C., & Marcelis, L. F. (2015). What drives fruit growth?. *Functional Plant Biology*, 42(9), 817-827. <https://doi.org/10.1071/FP15060>.
- Perveen, R., Ali, Q., Ashraf, M., Al-Qurainy, F., Jamil, Y., & Raza-Ahmad, M. (2010). Effects of different doses of low power continuous wave He-Ne laser radiation on some seed thermodynamic and germination parameters, and potential enzymes involved in seed germination of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Photochemistry and Photobiology*, 86(5), 1050-1055. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.2010.00782.x>.
- Podlešna, A., Gładyszewska, B., Podlešny, J., & Zgrajka, W. (2015). Changes in the germination process and growth of pea in effect of laser seed irradiation. *International Agrophysics*, 29(4), 485-492. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0054>.
- Prasad, P. V. V., Boote, K. J., Thomas, J. M. G., Allen, L. H., & Gorbet, D. W. (2006). Influence of soil temperature on seedling emergence and early growth of peanut cultivars in field conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 192(3), 168-177. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037x.2006.00198.x>.

- Qi, Z., Yue, M., Han, R., & Wang, X. L. (2002). The damage repair role of He-Ne laser on plants exposed to different intensities of ultraviolet B radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 75(6), 680-686. [https://doi.org/10.1562/0031-8655\(2002\)075<0680:tdrroh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1562/0031-8655(2002)075<0680:tdrroh>2.0.co;2).
- Rajjou, L., Duval, M., Gallardo, K., Catusse, J., Bally, J., Job, C., & Job, D. (2012). Seed germination and vigor. *Annual review of Plant Biology*, 63(1), 507-533. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105550>.
- Rybiński, W., & Garczyński, S. (2004). Influence of laser light on leaf area and parameters of photosynthetic activity in DH lines of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *International Agrophysics*, 18(3), 261-267.
- Samiya, Aftab, S., & Younus, A. (2020). Effect of low power laser irradiation on bio-physical properties of wheat seeds. *Information Processing in Agriculture*, 7(3), 456-465. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.12.003>.
- Sánchez-Roque, Y., Pérez-Luna, Y. C., Santos-Espinoza, A. M., & Gutiérrez-Miceli, F. A. (2022). Evaluation of the effect of native arbuscular mycorrhizal fungi an vermicompost leachate on the yield and quality of field-grown peanuts. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1612>
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021 SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Srećković, M., Vasić, R., Dukić, M., Jevtić, S., & Jovanić, P. (2014). The influence of diode and He-Ne Lasers on corn and wheat seeds. *Journal of Agricultural Science and Technology B*, 4(3), 165-175.
- Statgraphics Technologies (2018). *Statgraphics Centurion Version 18 User's Manual*. The Plains, VA, USA: Statgraphics Inc.
- Thakur, M., Tiwari, S., Kataria, S., & Anand, A. (2022). Recent advances in seed priming strategies for enhancing planting value of vegetable seeds. *Scientia Horticulturae*, 305, 111355. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111355>.
- Tóth, Z., Szörényi, T., & Toth, A. L. (1993). Ar+ laser-induced forward transfer (LIFT): a novel method for micrometer-size surface patterning. *Applied Surface Science*, 69(1-4), 317-320. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(93\)90525-g](https://doi.org/10.1016/0169-4332(93)90525-g).
- Truchliński, J., Koper, R., & Starczynowska, R. (2002). Influence of pre-sowing red light radiation and nitragine dressing of chickling vetch seeds on the chemical composition of their yield. *International Agrophysics*, 16(2), 147-150.
- Wilczek, M., Koper, R., Cwintal, M., & Kornilowicz-Kowalska, T. (2005). Germination capacity and health status of alfalfa seeds after laser treatment. *International Agrophysics*, 19, 85-89.
- Xiao, L. I., Chen, H., & Han, R. (2012). Effects of He-Ne laser irradiation on the seeds germination and seedling growth of arabidopsis thaliana. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 1, 131-135.
- Zhang, M., Sun, D., Niu, Z., Yan, J., Zhou, X., & Kang, X. (2020). Effects of combined organic/inorganic fertilizer application on growth, photosynthetic characteristics, yield and fruit quality of *Actinidia chinensis* cv 'Hongyang'. *Global Ecology and Conservation*, 22, e00997. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00997>.
- Zhu, T., Yang, J., Zhang, D., Cai, Q., Zhou, D., Tu, S., ... & Tu, K. (2020). Effects of white LED light and UV-C radiation on stilbene biosynthesis and phytochemicals accumulation identified by UHPLC-MS/MS during peanut (*Arachis hypogaea* L.) germination. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 68(21), 5900-5909. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c01178>.