

Germinación de la semilla y vigor de plántula de chiles apaxtlecos en respuesta a la radiación gamma ^{60}Co

Seed germination and seedling vigor of apaxtleco peppers in response to ^{60}Co gamma radiation

Antúñez-Ocampo, O.M.¹ , Croseños-Palazin, M.I.² , Espinosa-Rodríguez, M.² ,
Vázquez-Villamar, M.² , Rojas-García, A.R.³ , Sabino-López, J.E.^{2*} 

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Iguala. Carretera Iguala Tuxpan, km. 2.5. C.P. 40000, Iguala de la Independencia., Guerrero, México.

² Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Universidad Autónoma de Guerrero. Periférico poniente S/N, Colonia Villa de Guadalupe, CP. 40040. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

³ Facultad de Medicina Veterinaria Zootecnia Num. 2. Universidad Autónoma de Guerrero. Carretera Acapulco-Pinotepa Nacional, km 197. CP. 41940. Guerrero, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Antúñez-Ocampo, O.M., Croseños-Palazin, M.I., Espinosa-Rodríguez, M., Vázquez-Villamar, M., Rojas-García, A.R., Sabino-López, J.E. (2024). Seed germination and seedling vigor of apaxtleco peppers in response to ^{60}Co gamma radiation. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1591. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1591>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: October 16th 2023.

Accepted/Aceptado: May 07th 2024.

Available on line/Publicado: May 29th 2024.

RESUMEN

Se estudió el efecto de la radiación gamma en la germinación de la semilla y vigor de plántula de chiles apaxtlecos. Se estudió el efecto de la dosis de irradiación a la semilla con rayos gamma con ^{60}Co (0, 50, 100, 150, 200, 250 y 300 Gy) en genotipos de chile apaxtleco (*Ancho chino 1*, *Ancho chino 2* y *Ancho liso*), en diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para germinación (en laboratorio) y 10 para emergencia y vigor de plántula M_1 (en invernadero). La irradiación con 100 y 300 Gy estimuló la germinación en laboratorio, pero con 150 Gy se redujo en invernadero. La altura de plántula disminuyó, excepto con 50 Gy. El tamaño (diámetro y longitud) del tallo de plántulas aumentó con 0 a 150 Gy; y el peso fresco con 0 a 50 Gy y 250 a 300 Gy. El número de hojas disminuyó con más de 250 Gy y su peso fresco aumentó con 50 y 300 Gy. Mayor longitud de raíz hubo con 50 y 100 Gy. El genotipo sobresaliente fue *Ancho chino 1*. Los resultados aportan información del comportamiento de la semilla y el vigor de la plántula de chiles apaxtlecos por la irradiación gamma ^{60}Co .

PALABRAS CLAVE: *Capsicum*, Germinación, Mutagénesis, Radiación, Semilla.

*Corresponding Author:

Juan Elías Sabino López. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales. Universidad Autónoma de Guerrero. Periférico poniente S/N, Colonia Villa de Guadalupe, CP. 40040. Iguala de la Independencia, Guerrero, México.

E-mail: juanelias_sab@hotmail.com

ABSTRACT

The gamma radiation effect on seed germination and seedling vigor of apaxtle chili was studied. The combined impact of seed irradiation doses using gamma rays from ^{60}Co (0, 50, 100, 150, 200, 250, and 300 Gy) was assessed on apaxtleco chili bell pepper genotypes (*Ancho chino 1*, *Ancho chino 2*, and *Ancho liso*) in a completely randomized design. Five replicates were used for germination tests in the laboratory, while ten replicates were employed for seedling emergence and vigor (M_1) in the greenhouse. Irradiation at 100 and 300 Gy stimulated seed germination in the laboratory, whereas 150 Gy led to reduced seedling emergence under greenhouse conditions. Seedling height generally decreased, except when exposed to 50 Gy. Seedling stem size (diameter and length) increased within the 0 to 150 Gy range, while fresh weight increased from 0 to 50 Gy and 250 to 300 Gy. Leaf number decreased beyond 250 Gy, while fresh weight increased at 50 and 300 Gy. Root length showed increments at 50 and 100 Gy. The outstanding genotype was *Ancho chino 1*. Obtained data provide insights into seed performance and seedling vigor of apaxtleco chili peppers under gamma ^{60}Co irradiation.

KEY WORDS: *Capsicum*, germination, mutagenesis, radiation, seed.

Introducción

El chile (*Capsicum* spp.) es un cultivo de importancia económica y nutricional en el mundo (Contreras *et al.*, 2011; FAO, 2022); es endémico de México y parte del Cetro y Sur de América (Aguirre y Muñoz, 2015). Las variantes de *Capsicum* tienen gran adaptación a diversos climas, suelos y altitudes (0 a 2 500 m); lo que ha permitido su amplia distribución geográfica (Pérez-Castañeda *et al.*, 2015). En México, se cultivan principalmente cinco especies de chile: *C. annuum*, *C. chinense*, *C. pubescens*, *C. frutescens* y *C. baccatum*; así como, alrededor de 25 silvestres y semicultivadas (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010); pero, *Capsicum annuum* L. es la de mayor distribución, variantes morfológicas, superficie cultivada, producción, comercialización y consumo, debido a su tamaño, picor, sabor, aroma y color, aspectos indispensables en la gastronomía mexicana; además de diversos usos en la industria, medicina y religión (Vázquez *et al.*, 2020). Sin embargo, la mayor diversidad de *Capsicum* solo es conocida y utilizada regional o localmente (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010).

En la región Norte del estado de Guerrero, México, se cultiva el chile apaxtleco (Ancho Liso, Ancho Chino, Delgado Liso y Carricillo), considerado material endógeno (nativo) y de importancia cultural y económica de Apaxtla de Castejón, Guerrero (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010; Vázquez-Casarrubias *et al.*, 2011), cuyos productores cultivan esta especie tradicionalmente en condiciones de temporal (ciclo P-V), en pequeñas superficies y con mano de obra familiar para las labores culturales. La variabilidad genética de los chiles apaxtlecos ha sido alterada por la selección y manejo de los productores que, influye en la calidad de la semilla, la pureza genética, viabilidad y germinación, así como en el vigor de la planta; mientras que, el fruto resalta cambios en tamaño, forma, color, sabor y olor (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010). Además, existen los efectos de los factores climáticos, biológicos y técnicos, como son los periodos de sequía o precipitación, incidencia de plagas y enfermedades, aunado al escaso manejo de la nutrición y malezas (Aguilar-Rincón *et al.*, 2010; Contreras *et al.*, 2011).

En condiciones naturales, la germinación de la semilla del chile apaxtleco disminuye en 24 %, por lo que se siembran grandes cantidades para satisfacer la demanda de plántula de los productores (Hernández-Verdugo *et al.*, 2010). La baja tasa de germinación en algunas especies de *Capsicum*, aun en condiciones favorables, se debe a la impermeabilidad y dureza de la cubierta seminal o limitada permeabilidad del endospermo y latencia del embrión (Bañuelos *et al.*, 2008; Araiza *et al.*, 2011). Se ha descrito que la calidad y el vigor de la semilla están determinados por factores genéticos, fisiológicos, morfológicos y fitosanitarios (Mazvimbakupa *et al.*, 2015). Ante esto, la mutagénesis con irradiación gamma puede ser una herramienta para incrementar y acelerar la germinación de las semillas (López-Mendoza *et al.*, 2012; Rangel-Castillo *et al.*, 2022; Warade *et al.*, 2022).

El efecto biológico de los rayos gamma se basa en la interacción con átomos o moléculas en la célula, particularmente agua, para producir radicales libres (*i.e.*, H⁺, OH, H₂O₂) (Borzouei *et al.*, 2010; Esnault *et al.*, 2010), quienes modifican los componentes de las células y alteran la anatomía, bioquímica, morfología y fisiología de las plantas según la dosis de radiación (Jan *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2012). Estos cambios en la estructura celular y el metabolismo de la planta ocasionan dilatación de las membranas tilacoides, perturbación de la fotosíntesis, modulación del sistema antioxidante y acumulación de compuestos fenólicos (Marcu *et al.*, 2013a; Wang *et al.*, 2017; Saputro *et al.*, 2019). Dosis bajas (< 200 Gy) de irradiación gamma estimulan procesos fisiológicos de germinación de la semilla y desarrollo de la plántula (Wiendl *et al.*, 2013; Araujo *et al.*, 2016; Jaipo *et al.*, 2019); también, aceleran la proliferación de células, actividad enzimática y el crecimiento celular (Macovei *et al.*, 2014). En cambio, dosis altas alteran la síntesis de proteínas, el equilibrio hormonal y el movimiento del agua por intercambio de gases en las hojas y la actividad enzimática de la plántula (Macovei *et al.*, 2014). Investigaciones en el cultivo de chile determinaron la radiosensibilidad de la semilla y el vigor de las plantas, la resistencia a enfermedades, el rendimiento y la calidad del fruto (López-Mendoza *et al.*, 2012; Jo *et al.*, 2016; Aisha *et al.*, 2018; Thisaweche *et al.* 2020; Meitei, *et al.*, 2020). Por lo anterior, el objetivo de la investigación fue evaluar el efecto de la radiación gamma con ⁶⁰Co en la germinación de la semilla y vigor de plántula en genotipos de chile apaxtleco. La hipótesis fue que al menos una dosis de radiación aplicada a la semilla estimula la germinación y los caracteres del vigor de al menos un genotipo de chile apaxtleco.

Material y métodos

Se utilizaron semillas de tres genotipos de Chile apaxtleco (*Capsicum annum* L.) (*Ancho chino 1*, *Ancho chino 2* y *Ancho liso*); obtenidas de frutos comercialmente maduros (color rojo) recolectados en campo en Apaxtla de Castrejón, Guerrero. Los frutos y las semillas presentaron las características descritas por Aguilar-Rincón *et al.* (2010) y Croseños-Palazín *et al.* (2023). Las semillas se irradiaron con el equipo LGI-01 Transelektro, en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), en el estado de México. Se estudió el efecto combinado de la dosis de irradiación (0, 50, 100, 150, 200, 250, 300 Gy de rayos gamma ^{60}Co , en 5 g de semilla) en la germinación, emergencia y vigor de plántula de tres genotipos de Chile apaxtleco (*Ancho chino 1*, *Ancho chino 2* y *Ancho liso*), lo que resultó en 21 tratamientos, estos se distribuyeron en un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para la germinación en contenedor en condiciones de laboratorio y, diez repeticiones para las variables relacionadas con la emergencia y el vigor de plántula M_1 en charola, en condiciones de invernadero. Las semillas irradiadas se sembraron en dos formas; la primera, depositando 20 semillas por contenedor de plástico traslucido de 15 x 15 cm cubierto con papel filtro de poro mediano y se mantuvieron en la cámara de germinación, a temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$; fotoperiodo de 8 h luz y 16 h de oscuridad y regadas cada dos días con agua destilada, la unidad experimental la constituyó un contenedor con 20 semillas. La segunda, depositando dos semillas por cavidad en charolas de polipropileno expandido de 200 cavidades llenadas con turba, la unidad experimental consistió en diez plántulas, estas se regaron manualmente con agua potable (pH 7.6 y CE de 0.5 dS m^{-1}) dos veces al día desde la siembra hasta el final del experimento. Los semilleros se alojaron en un invernadero cuyas condiciones ambientales prevalientes fueron: humedad de 58 %, temperatura mínima de $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ y máxima de $42\text{ }^{\circ}\text{C}$. La sensibilidad de la semilla se determinó a los 24 días después de la siembra (das) en laboratorio con base en los días y porcentaje de germinación, mientras que en charola se registraron los días y porcentaje de emergencia en invernadero; el vigor de la plántula M_1 en charola se cuantificó a los 30 días después de la emergencia mediante: la altura de plántula (cm) con un flexómetro (Truper[®]), desde la base del tallo hasta la hoja más joven; diámetro del tallo (mm) con un vernier (Truper[®] modelo CAL-6MP), a 1 cm de la base de la raíz y la primera hoja; longitud (cm) y peso fresco del tallo (g), el primero se midió con un flexómetro de la base del tallo hasta el ápice del mismo y el peso se determinó con una báscula digital; se registró el número de hojas y el peso fresco (g) de hojas con una báscula digital (Torrey[®] serie L-PCR); longitud (cm) y peso fresco de la raíz (g), el primero se midió con un flexómetro de la base del tallo hasta la raíz más larga y el peso se determinó con una báscula digital. Se realizó un análisis de varianza de los tratamientos resultantes de la combinación de las dosis de radiación (D) y el genotipo (G) de Chile apaxtleco, para cada variable. Las medias se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) con el programa estadístico SAS (Statistical Analysis System), versión 9.1 (SAS Institute, 2002).

Resultados y Discusión

Los parámetros de germinación de la semilla y de la emergencia y el vigor de plántula M_1 mostraron significancias estadísticas ($p \leq 0.05$) en los genotipos de chile por la dosis de irradiación (Tabla 1 y 2). En cultivos como jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Álvarez et al., 2011; Álvarez et al., 2012), chile (*Capsicum* spp.) (López-Mendoza et al., 2012; Rangel-Castillo et al., 2022), maíz (*Zea mays* L.) (Marcu et al., 2013b), trigo (*Triticum aestivum* L.) (Albokari et al., 2012; Khah & Verma, 2017), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Ulukapi & Ozmen, 2018; Jafarov et al., 2020) y okra (*Abelmoschus esculentus* L.) (Hegazi & Hamideldin, 2010), se ha reportado que diferentes dosis de radiación a la semilla afectan aleatoriamente la anatomía y morfología de las plantas, según sus características (especie, cultivar, etapa de desarrollo, arquitectura del tejido y organización del genoma) y de aspectos relacionados con la calidad (dosis y duración) de la radiación (Jan et al., 2012; De Micco et al., 2014).

Tabla 1. Análisis de varianza para la germinación de la semilla en laboratorio y emergencia de plántula en invernadero de tres genotipos de chile apaxtleco.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Germinación en contenedor	Días a germinación en contenedor	Emergencia en charola	Días a germinación en charola
TRAT	20	154.40*	38.11*	321.99*	37.29*
CV (%)	--	3	11	11	9

TRAT = Tratamientos. CV = Coeficiente de variación. * = Significativo, ns = No significativo, $p \leq 0.05$.

Tabla 2. Análisis de varianza para el vigor de plántulas M_1 de tres genotipos de chile apaxtleco en invernadero.

Sources of variation	DF	SH	SD	SL	SFW	NL	FWL	RL	FWL
TRAT	20	4.47*	0.77*	17.08*	0.020*	6.85*	0.021*	32.08*	0.004*
CV (%)	--	13.03	16.67	23.31	45.63	18.82	50.44	24.10	111.68

DF = Grados de libertad. TRAT = Tratamientos. CV = Coeficiente de variación. SH= Altura de plántula. SD= Diámetro de tallo. SL = Longitud de tallo. SFW = Peso fresco del tallo. NL = Número de hojas. FWL = Peso fresco de hojas. RL = Longitud de la raíz. RFW = Peso fresco de la raíz. * = Significativo, ns = No significativo, $p \leq 0.05$.

Germinación de la semilla

La germinación de la semilla varió en función del genotipo y de la dosis de radiación aplicada (Tabla 1; Figura 1 y 2). En condiciones de laboratorio, la germinación la semilla de *Ancho chino 2* irradiadas con 300 Gy tuvieron mayor germinación que los genotipos *Ancho chino 1* y *liso* con todas las dosis de radiación aplicadas, a excepción de la germinación alcanzada en *Ancho chino 1* con semillas sin irradiar (97 %) e irradiadas con 250 y 300 Gy (96 %), respectivamente; por el contrario, en el resto de los tratamientos la germinación disminuyó de 7 % a 13 %. En este proceso fisiológico las semillas de *Ancho liso* fueron más sensibles a la radiación gamma, al presentar menor germinación (66 %); en cambio, mayor germinación mostró este genotipo cuando sus semillas se trataron con 50 y 150 Gy (92 %) (Figura 1a).

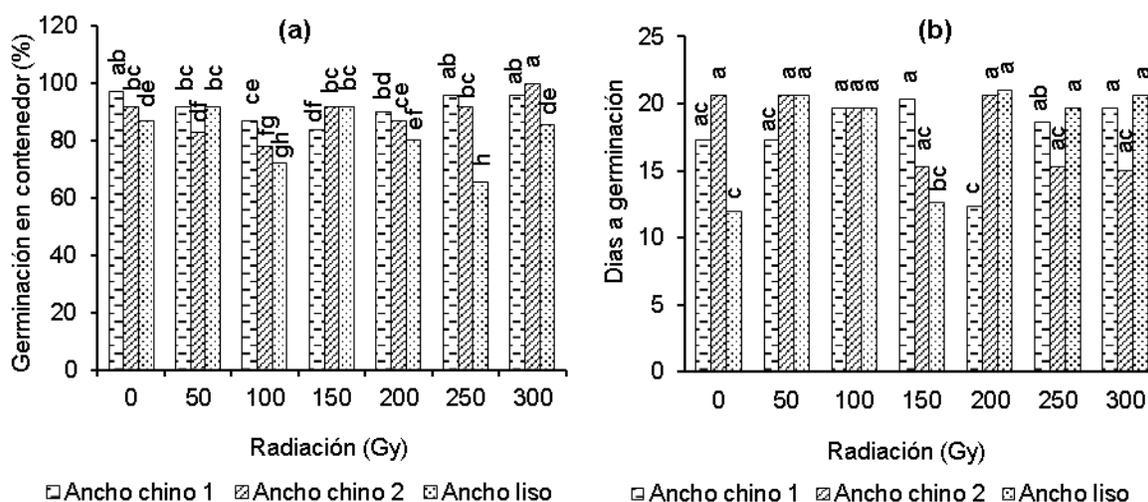


Figura 1. Efecto de la radiación gamma ^{60}Co en el porcentaje (a) y tiempo (b) de germinación de la semilla de tres genotipos de Chile apaxtleco, establecidas en contenedor en condiciones de laboratorio.

Medias con distintas literal son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). SMD (a)= 7.59. SMD (b) = 6.10. SMD = Diferencia mínima significativa.

Con respecto a los días a germinación, las semillas del genotipo *Ancho liso* no irradiadas e irradiadas con 150 Gy tuvieron menor tiempo de germinación, con 12 y 13 d, respectivamente; el mismo comportamiento se tuvo con los días a germinación de las semillas de *Ancho chino 1* irradiadas con 200 Gy, al germinar más pronto (12 d) que el resto de los tratamientos (Figura 1b), en comparación con las semillas de *Ancho chino 2* sin irradiar o irradiadas con dosis bajas (50 y 100 Gy) que, retardaron este proceso hasta 21 d. En contraste, la germinación de la semilla de *Ancho chino 2* irradiadas con 200, 250 y 300 Gy tardó 15 d, respetivamente. Sin embargo, en el

genotipo *Ancho chino 1*, a excepción la dosis de 200 Gy, las semillas sin irradiar e irradiadas con el resto de las dosis tuvieron un periodo de germinación que osciló de 17 a 20 d. El efecto de la radiación gamma también se ha reportado en semillas de *Lathyrus chrysanthus*, donde dosis de 50 a 250 Gy estimularon la germinación en condiciones de laboratorio, sobresaliendo las dosis de 100 y 150 Gy (Beyaz et al., 2016).

En invernadero, la irradiación gamma a la semilla influyó en la emergencia de la plántula M_1 de los genotipos evaluados, siendo de 0 a 100 Gy las dosis más sobresalientes (68 % a 73 %), mientras que la dosis de 150 Gy la disminuyó en 16 a 23 % en ambos genotipos. En este sentido, las semillas de *Ancho chino 1* sin irradiar (84%) e irradiadas con 250 (78 %) y 300 Gy (75 %) produjeron mayor emergencia de plántulas; mientras que, en *Ancho chino 2* más plántulas emergieron con semillas sin irradiar (83 %) e irradiadas con 100 Gy (81.22 %). Diferente comportamiento hubo en *Ancho liso* cuyas plántulas provenientes de semillas irradiadas con 50, 100 y 200 Gy, tuvieron 72 % a 73 % de emergencia (Figura 2a). Así mismo, el efecto combinado de la radiación con los genotipos de chile apaxtleco también se observó en el tiempo de emergencia de las plántulas M_1 , puesto que las semillas de *Ancho chino 1* tratadas con 100 y 150 Gy favorecieron la emergencia de la plántula en menor tiempo (14 a 17 d), en tanto que, las semillas no irradiadas del chile *Ancho liso* emergieron a los 16 después de la siembra, a diferencia del resto de los tratamientos cuyo tiempo de emergencia fluctuó de 20 a 26 d. Estos resultados difieren con lo reportado en semillas de chile de Agua (*Capsicum annuum* L.) irradiadas con 0 a 120 Gy, donde la germinación no se estimuló (López-Mendoza et al., 2012). También, contrastan con lo descrito por Rangel-Castillo et al. (2022) y Omar et al. (2008) en semillas de dos variedades de chile (*C. annuum*); el primero indicó que dosis de 100 a 400 Gy disminuyeron en 33 % la geminación de semillas en chile Jalapeño; el segundo mencionó que las semillas del cultivar Kulai irradiadas con 300 y 400 Gy tuvieron germinación (36 % a 42%) similar a las semillas sin irradiar (43 %); pero, dosis altas (500, 600 y 800 Gy) disminuyeron este indicador, siendo más notorio con 800 Gy al inhibir la germinación, esto se atribuye a la formación de radicales libres que alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos de las semillas irradiadas (Esnault et al., 2010), es decir, dosis altas de irradiación provocan cambios histológicos y citológicos, interrupción y desorganización de la cubierta de la semilla y alteración o supresión de la división celular en las zonas meristemáticas durante la germinación (FAO/OIEA, 2021).

Los resultados de este trabajo sugieren que existen dosis particulares e intermedias que estimulan la germinación, lo cual se relaciona con la especie y el grado de deterioro de la semilla. Al respecto, diferente porcentaje de germinación entre las dosis de irradiación se atribuye a la inhibición o estimulación de procesos bioquímicos y fisiológicos (Hasbullah et al., 2012), relacionados con la activación de la síntesis de ARN y proteínas (Piri et al., 2011) y desestabilidad en el desarrollo y división celular (Oladosu et al., 2016; Thole et al., 2011), provocados por el incremento de la tasa de respiración o por el metabolismo de auxinas. Sin embargo, mayor porcentaje de germinación con dosis altas se relaciona con la eliminación de las poblaciones bacterianas y hongos (esporas) presentes en la semilla (Rassam et al., 2012).

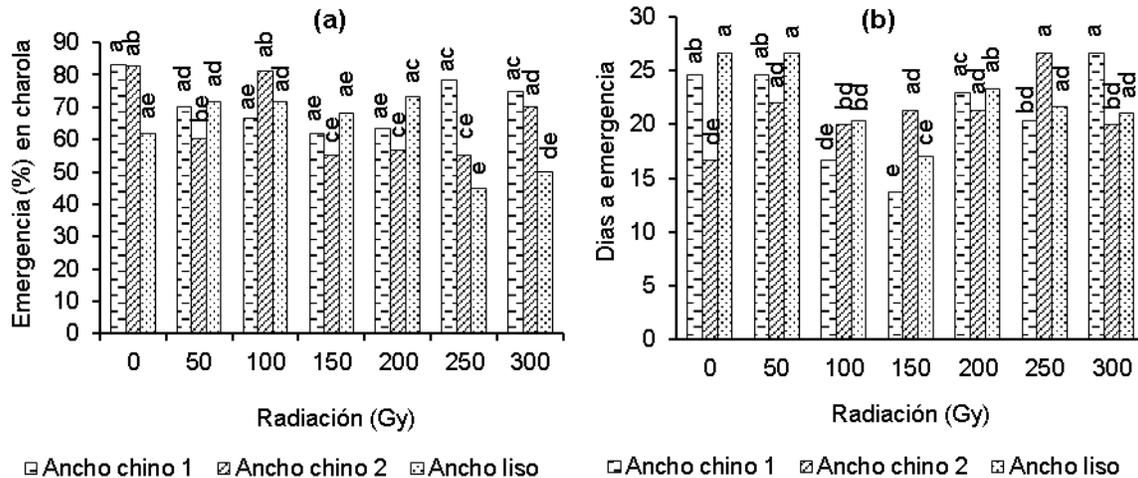


Figura 2. Efecto de la radiación gamma ^{60}Co en el porcentaje (a) y tiempo (b) de germinación de la semilla de tres genotipos de Chile apaxtleco, establecidas en charola en condiciones de invernadero.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). SMD (a) = 22.84. SMD (b) = 6.22. SMD = Diferencia mínima significativa.

Vigor de la plántula

La irradiación a la semilla afectó significativamente algunos parámetros del crecimiento en las plántulas M_1 de los chiles apaxtlecos (Tabla 2). La altura de plántula de los tres genotipos disminuyó de 9 % a 67 % en aquellas provenientes de semillas irradiadas con 100 Gy en adelante, principalmente en los genotipos *Ancho chino 2* y *liso*. En cambio, en el testigo (sin irradiar) las plántulas de *Ancho chino 1* y *2* fueron más altas; en tanto que, en *Ancho liso* lo fueron cuando las semillas se irradiaron con 50 Gy (Figura 3a). Comportamiento similar se reportó en *Glycine max*, donde la altura de plántula disminuyó en 50 % con más de 200 Gy (Alikamanoglu *et al.*, 2011); en tanto que, dosis mayores de 300 Gy redujeron el vigor de planta en dos variedades (TC 9-6 y A-4) de frijol caupí (*Vigna unguiculata*) (Lemus *et al.*, 2002). Por el contrario, plántulas de *C. annuum* provenientes de semillas irradiadas con dosis bajas fueron similares al testigo en altura, mientras que, dosis altas (600 y 800 Gy) la redujeron considerablemente (Omar *et al.*, 2008).

El diámetro y la longitud del tallo mejoraron con 0 a 150 Gy y el peso fresco se estimuló con dosis bajas (0 a 50 Gy) y altas (250 a 300 Gy) en ambos genotipos, no obstante, la ganancia en el primer y tercer parámetro fue mayor en plántulas de *Ancho chino 1* y *Ancho liso* (Figura 3b, d), por el contrario, los tres genotipos tuvieron similar longitud del tallo (4.50 a 4.86 cm) (Figura 3c). En los tres genotipos de Chile, las plántulas testigo y tratadas con 50 y 100 Gy presentaron mayor diámetro y longitud del tallo; excepto en el peso fresco, donde las dosis de 250 y 300

Gy estimularon este indicador únicamente en plántulas de *Ancho liso* (Figura 3d), debido a que la irradiación con rayos gamma a la semilla origina plántulas con menor biomasa (Omar et al., 2008). En el mismo contexto, la estimulación del crecimiento por dosis bajas se debe a cambios de señalización hormonal en las células o por incremento de la capacidad antioxidante de las células para superar factores de estrés, como la fluctuación de la intensidad de la luz y la temperatura que prevalecen durante el crecimiento (Liu et al., 2008; Lagoda, 2012). Por el contrario, la inhibición del crecimiento por dosis altas se atribuye a la detención del ciclo celular en la fase G2/M durante la división de células somáticas, síntesis de auxinas y al daño en el genoma (Hernández-Muñoz et al., 2019; FAO/OIEA, 2021).

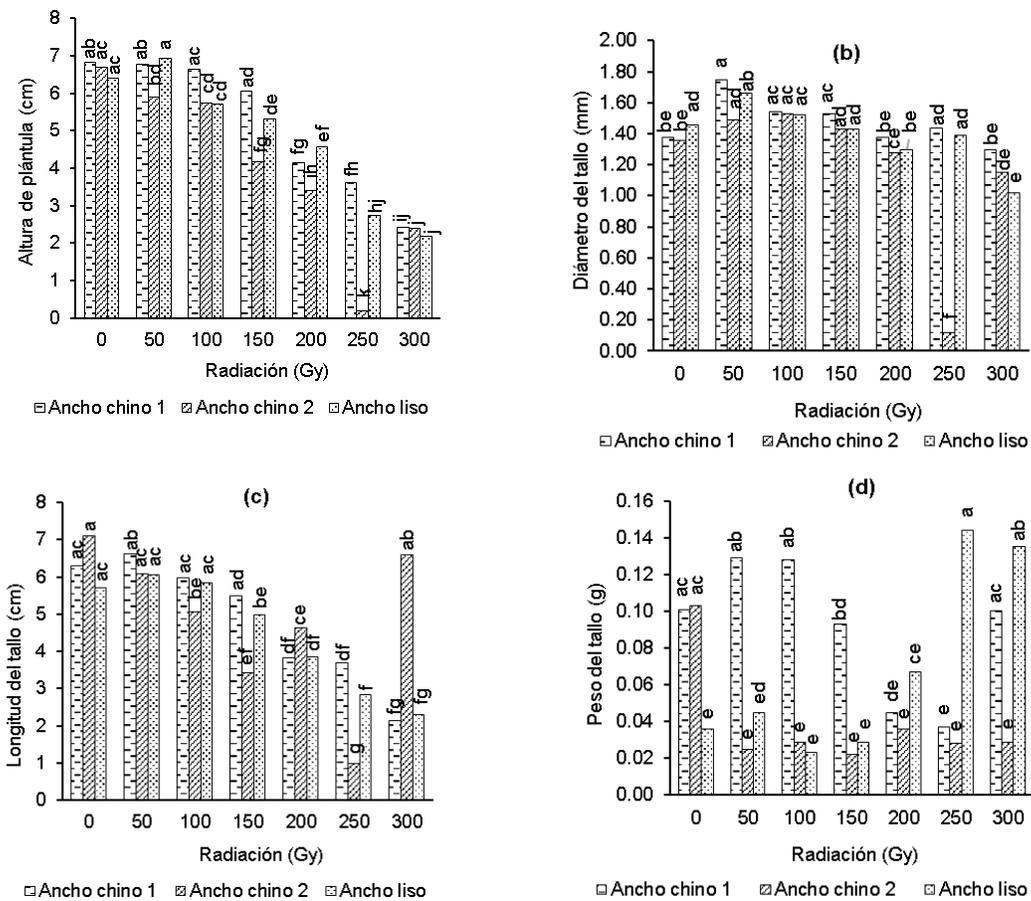


Figura 3. Efecto de la radiación gamma ⁶⁰Co en la altura (a) y tamaño del tallo (diámetro (b), longitud (c), peso fresco (d)) de la plántula de tres genotipos de chile apaxtleco.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). SMD (a) = 0.99. SMD (b) = 0.37. SMD (c) = 1.79. SMD (d) = 0.05. SMD = Diferencia mínima significativa.

Por otro lado, el número de hojas se redujo con dosis mayores de 250 Gy que, limitaron su formación (Figura 4a) principalmente en el genotipo *Ancho chino 2* de semillas irradiadas con 250 Gy, en comparación con el genotipo *Ancho chino 1* al producir mayor número de hojas cuando las semillas se irradiaron con 50 a 250 Gy y sin irradiar, también con respecto a *Ancho liso* con 0 a 200 Gy. En cambio, el peso fresco de la hoja aumentó en las plántulas de *Ancho chino 1* provenientes de semillas irradiadas con 50, 200 y 300 Gy (Figura 4b). Sin embargo, la radiación redujo el peso de las hojas en las plántulas de *Ancho chino 2*, principalmente cuando las semillas se irradiaron con 250 Gy; la misma respuesta mostró el genotipo *Ancho liso*, todas las dosis redujeron el peso de las hojas (Figura 4b). Efecto similar se reportó en plántulas de soya, donde la irradiación (0 a 500 Gy) de la semilla disminuyó el número de hojas (Kara *et al.*, 2016); pero sin afectar el peso fresco de la plántula, cuyos mutantes (100 a 500 Gy) fueron plántulas con peso similar al testigo (Alikamanoglu *et al.*, 2011). En contraste, la irradiación con 0 a 300 Gy a semillas de frijol caupí (TC 9-6 y A-4) no afectó el follaje de las plantas, sin embargo, dosis de 400 a 750 Gy disminuyeron la formación de hojas (Lemus *et al.*, 2002).

La estimulación de la radiación (dosis bajas < 100 Gy) en la formación de biomasa se relaciona con las alteraciones genéticas (cambios aleatorios en el DNA), citológicos, bioquímicos, fisiológicos y morfogenéticos en las células y tejidos; estos incluyen el aumento de clorofila, azúcar y carbono (C) total (Jan *et al.*, 2013; Ulukapi & Ozmen, 2018). En cambio, la disminución del follaje se asocia con alteraciones en la síntesis de proteína, equilibrio hormonal, intercambio de gases en las hojas, intercambio de agua y actividad enzimática (Lagoda, 2012; Macovei *et al.*, 2014), principalmente cuando las semillas son irradiadas con más de 200 Gy (Borzouei *et al.*, 2010). La importancia de la biomasa es que es un indicador del crecimiento de las plantas, este expresa el equilibrio entre la producción de fotoasimilados y la respiración (Reyes-Pérez *et al.*, 2013). En esta investigación algunas dosis de radiación favorecieron la formación y el peso de hoja, sobre todo en el genotipo *Ancho chino 1*.

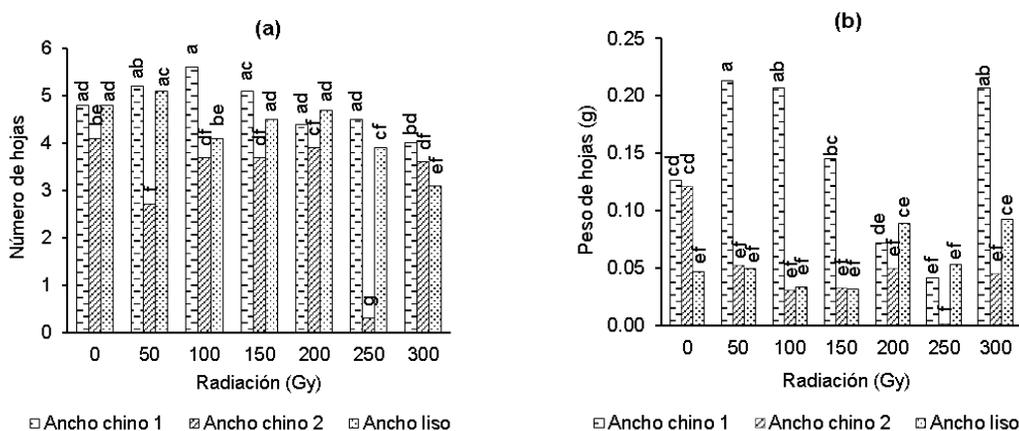


Figura 4. Efecto de la radiación gamma ^{60}Co en el número (a) y peso fresco (b) de hoja en la plántula de tres genotipos de Chile apaxtleco.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). SMD (a) = 1.25. SMD (b) = 0.07.

Con respecto a la longitud de la raíz, esta se alteró por la radiación gamma (Tabla 2). Las plántulas provenientes de semillas irradiadas con 50 y 100 Gy (9.18 y 9.57 cm) y no irradiadas (9.01 cm) tuvieron mayor longitud de raíz; mientras que, el peso fresco de la raíz fue similar entre las plántulas de semillas no irradiadas e irradiadas (0.03 a 0.07 g) (Figura 5a). No obstante, el genotipo más sobresaliente en ambos aspectos fue el *Ancho chino 1* (9.20 cm y 0.10 g). Por lo tanto, la radiación con 50 y 100 Gy aumentó el tamaño de la raíz en plántulas de *Ancho chino 1* y 2, en contraste, en las plántulas de *Ancho liso* las dosis de 200 y 300 Gy favorecieron la producción de biomasa (Figura 5b). Resultados similares que en el chile *Ancho chino 1* se reportó en *S. lycopersicum*, donde semillas irradiadas con 5 a 20 Gy originaron plántulas con raíces grandes, superiores en 15 % al testigo (Álvarez et al., 2011; Álvarez et al., 2012). En Chile Jalapeño, semillas irradiadas con 100 a 400 Gy generaron plántulas M₁ con menor peso fresco de radícula; pero, con respuesta similar entre los mutantes y el testigo (Rangel-Castillo et al., 2022). Omar et al. (2008) mencionaron que dosis de 300 y 500 Gy a semillas de *C. annuum* no afectaron la longitud y el peso de la raíz en plántulas M₁; pues tuvieron similar tamaño al de las plántulas testigo; no obstante, irradiaciones con 600 y 800 Gy afectaron negativamente ambos parámetros. En tanto que, la radiación a la semilla de *Hordeum vulgare* con 700 a 1200 Gy no modificó la longitud de la raíz (Nasab et al., 2010).

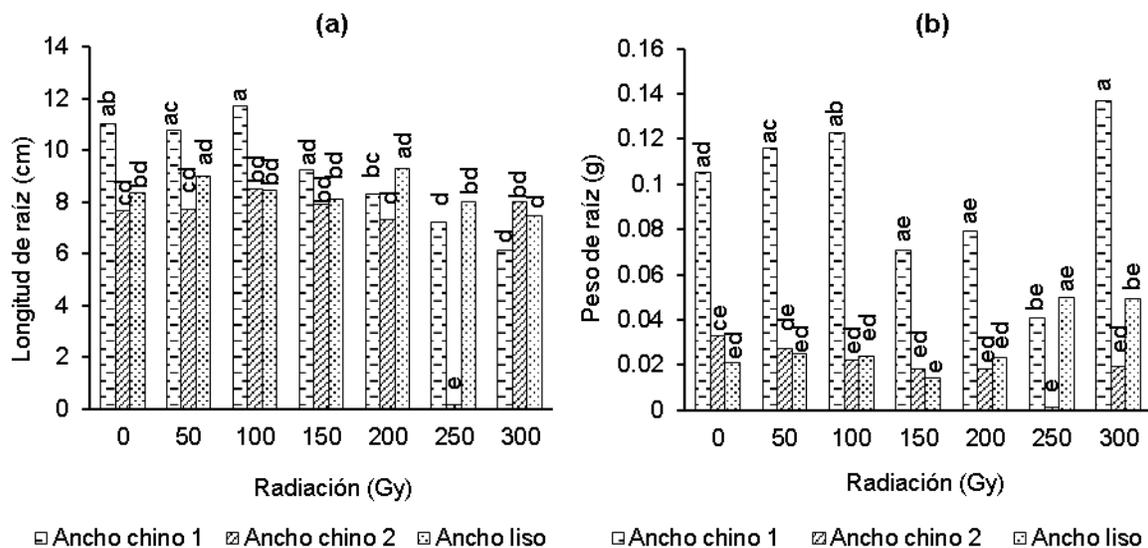


Figura 5. Efecto de la radiación gamma ^{60}Co en la longitud (a) y peso de raíz (b) de la plántula de tres genotipos de chile apaxtleco.

Medias con letras distintas son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). SMD (a) = 3.17. SMD (b) = 0.09. SMD = Diferencia mínima significativa.

El comportamiento heterogéneo de los parámetros del vigor de plántula en los chiles apaxtlecos se relaciona con los eventos individuales y aleatorios en el genoma por la radiación,

donde algunas características mejoran, mientras que otras se suprimen (Viana *et al.*, 2019). Del mismo modo, la dosis óptima para inducir mutaciones favorables depende de la susceptibilidad de la planta y del órgano irradiado. Al respecto, Meitei *et al.* (2020) señalaron que, a mayor dosis de radiación gamma, aumentan las alteraciones cromosómicas con efectos negativos en el desarrollo y fisiología de las plantas; sin embargo, las mutaciones con efectos deseables se pueden heredar durante varias generaciones; por lo tanto, para identificar estos cambios se requiere de la evaluación del comportamiento morfológico y fisiológico en cada generación.

Conclusiones

La radiación a la semilla con 250 Gy estimuló la germinación de los chiles apaxtlecos *Ancho chino 1* y *2*, pero con 150 y 200 Gy se redujo el tiempo de germinación de la semilla de *Ancho chino 1* y *liso*, en condiciones de laboratorio. La radiación a la semilla disminuyó la emergencia de plántula de los genotipos en charola hasta en 23 %, en condiciones de invernadero.

Dosis de radiación gamma a la semilla mayores a 100 Gy limitan la altura de plántula de los chiles *Ancho chino 1* y *liso*, pero mayores de 250 Gy afectan la formación de hojas en la plántula de *Ancho chino 2*. El tamaño (diámetro, longitud y peso) del tallo y longitud de la raíz de las plántulas M_1 aumentaron con dosis bajas (50 a 100 Gy) de radiación, pero las dosis de 200 y 300 Gy favorecieron el peso de las hojas de *Ancho liso*.

Los resultados de esta investigación aportan información del comportamiento de la semilla y el vigor de la plántula de los chiles apaxtlecos en respuesta a la irradiación gamma ^{60}Co , pues de momento no hay estudios que permitan conocer su nivel actual y con ello diseñar programas de conservación y aprovechamiento de estos genotipos.

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo y desarrollo metodológico, OMAO, JESL y MICP; validación experimental y análisis de resultados; escritura y preparación del manuscrito, OMAO, JESL y MICP; Revisión y edición, MER, MVV y ARRG.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Aguilar-Rincón, V. H., Corona, T. T., López, L. P., Latournerie, M. L., Ramírez, M. M., Villalón, M. H., & Aguilar, C. J. A. (2010). Los chiles de México y su distribución. SINAREFI. Colegio de Postgraduados, INIFAP, IT-Conkal, UANL, UAN. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 114 p.
- Aguirre, H. E. & Muñoz, O. V. (2015). El chile como alimento. *Ciencia* 16-23.
- Aisha, A. H., Rafii, M. Y., Rahim, H. A., Juraimi, A. S., Misran, A., & Oladosu, Y. F. (2018). Radio-Sensitivity Test Of Acute Gamma Irradiation Of Two Variety Of Chili Pepper Chili Bangi 3 And Chili Bangi 5. *International Journal of Scientific & Technology Research* 7 (12): 90-95.
- Albokari, M. M. A., Alzahrani, S. M., & Alsaman, A. S. (2012). Radiosensitivity of some local cultivars of wheat (*Triticum aestivum* L.) to gamma irradiation. *Bangladesh Journal of Botany* 41 (1): 1-5.
- Alikamanoglu, S., Yaycili, O., & Sen, A. 2011. Effect of Gamma Radiation on Trace Elements in Soybean Plants. *Biological Trace Element Research* 141: 283-293. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8709-y>
- Álvarez, A., Ramírez, R., Chávez, L., Camejo, Y., Licea, L., Porrás, E., & García, B. (2011). Efectos del tratamiento de semillas con láser de baja potencia sobre el crecimiento y rendimiento en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Información Técnica Económica Agraria* 107 (4): 290-299.
- Álvarez, F. A., Chávez, S. L., Ramírez, F. R., Pompa, B. R., & Estrada, P. W. (2012). Indicadores fisiológicos en plántulas de *Solanum lycopersicum* L., procedentes de semillas irradiadas con rayos X. *Biotecnología Vegetal* 12(3): 173-177.
- Araiza, L. N., Araiza, L. E., & Martínez, M. J. G. (2011). Evaluación de la germinación y crecimiento de plántula de chiltepín (*Capsicum annum* L. variedad *glabriusculum*) en invernadero. *Revista Colombiana de Biotecnología* 13(2): 170-175.
- Araujo S. D. S., Paparella S., Dondi D., Bentivoglio A., Carbonera D., & Balestrazzi A. (2016). Physical methods for seed invigoration: advantages and challenges in seed technology. *Frontiers in Plant Science* 7: 646. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00646>
- Bañuelos, N., Salido, P. L., & Gardea, A. (2008). Etnobotánica del chiltepín. Pequeño gran señor en la cultura de los sonorenses. *Estudios Sociales (Hermosillo, Sonora)* 16(32): 177-205.
- Beyaz, R., Kahramanogullari, C. T., Yildiz, C., Darcin, E. S., & Yildiz, M. (2016). The effect of gamma radiation on seed germination and seedling growth of *Lathyrus chrysanthus* Boiss. under in vitro conditions. *Journal of Environmental Radioactivity* 162-163: 129-133. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.006>
- Borzouei, A., Naseriyan, B., Majdabadi, A., Kafi, M., & Khazaei, H. (2010). Effects of gamma radiation on germination and physiological aspects of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Pakistan Journal of Botany* 42(4): 2281-2290.
- Contreras, T., Aremi, R., López, S. H., Santacruz, V. A., Valadez, M. E., Aguilar, R. V. H., Corona, T. T., & López, P. A. (2011). Diversidad Genética en México de variedades nativas de chile 'poblano' mediante microsatélites. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34 (4): 225-232.
- Croseños-Palazin, M. I., Antúñez-Ocampo, O. M., Sabino-López, J. E., Espinosa-Rodríguez, M., & Cruz-Izquierdo S. (2023). Cambios herméticos por efecto de radiación gamma 60Co

- en plantas M1 de Chile apaxtleco. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 10(2): e3444. <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3444>
- De Micco, V., Paradiso, R., Aronne, G., De Pascale, S., Quarto, M., & Arena, C. (2014). Leaf anatomy and photochemical behaviour of *Solanum lycopersicum* L. plants from seeds irradiated with low-LET ionising radiation. *The Scientific World Journal* 2014: 428141. <https://doi.org/10.1155/2014/428141>
- Esnault, M., Legue, F., & Chenal, C. (2010). Ionizing radiation: Advances in plant response. *Environmental and Experimental Botany* 68 (3): 231-237. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.01.007>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2022). Producción mundial de chiles, pimientos picantes, pimientos (verdes) <http://www.fao.org/faostat/es/#home>.
- FAO/OIEA. (2021). Manual de mejoramiento por mutación – Tercera edición. Spencer-Lopes, M.M., Forster, B.P. y Jankuloski, L. (coords.), Viena, FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/i9285es>.
- Hasbullah, N., Taha, R., Saleh, A., & Mahmad, N. (2012). Irradiation effect on in vitro organogenesis, callus growth and plantlet development of *Gerbera jamesonii*. *Horticultura Brasileira* 30(2): 252-257. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362012000200012>
- Hegazi, A., Z., & Hamideldin, N. (2010). The effect of gamma irradiation on enhancement of growth and seed yield of okra [*Abelmoschus esculentus* (L.) Monech] and associated molecular changes. *Journal of Horticulture and Forestry* 2(3): 38-51.
- Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., López, P. A., Gómez-Sanabria, J. M., & Morales-García, J. L. (2019). Mutagenesis in the improvement of ornamental plants. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 25 (3): 151-167. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2018.12.022>
- Hernández-Verdugo, S., López-España, R. G., Porras, F., Parra-Terraza, S. T., Villarreal-Romero, M., & Osuna-Enciso, T. (2010). Variación en la germinación entre poblaciones y plantas de Chile silvestre. *Agrociencia* 44(6): 667-677.
- Jafarov, E. S., Guliyeva, N. R., Babayev, H. G., Gojaeva, G. A., & Mamedova, G. A. (2020). Role of Pre-Sowing Gamma-Irradiation of Seeds in the Salt-Resistance of *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry* 16 16(3): 116-125.
- Jaipo, N., Kosiwikul, M., Panpuang, N., & Prakrajang, K. (2019). Low dose gamma radiation effects on seed germination and seedling growth of cucumber and okra. *Journal of Physics: Conference Series* 1380 (1): 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012106>
- Jan, S., Parween, T., Siddiqi, T. O., & Mahmooduzzafar. (2012). Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews* 20 (1): 17-39.
- Jan, S., Parween, T., Hameed, R., Siddiqi T. O., & Mahmooduzzafar. (2013). Effects of presowing gamma irradiation on the photosynthetic pigments, sugar content and carbon gain of *Cullen corylifolium* (L.) Medik. *Chilean journal of agricultural research* 73(4), 345-350. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392013000400003>
- Jo, Y. D., Kim, S. H., Hwang, J. E., Kim, Y. S., Kang, H. S., Kim, S. W., Kwon, S. J., Ryu, J., Kim, J. B. & Kang, S. Y. (2016). Construction of mutation populations by gamma-ray and carbon beam irradiation in chili pepper (*Capsicum annuum* L.). *Horticulture, Environment, and Biotechnology* 57: 606-614. <https://doi.org/10.1007/s13580-016-1132-3>

- Kara, Y., Ertem, V. H. & Kuru, A. (2016). Gamma radiation effects on crude oil yield of some soybean seeds: Functional properties and chemical composition of glycine max-ataem-7 seeds. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research* 15(12): 2579-2585. <https://doi.org/10.4314/tjpr.v15i12.7>
- Khah, M. A., & Verma, R. C. (2017). Effect of gamma irradiation on seed germination and chromosomal behaviour at meiotic division in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *The Journal of Indian Botanical Society* 96(3): 209-215.
- Lagoda, P. J. L. (2012). Effects of radiation on living cells and plants. In: Shu, Q. Y., Forster, B. F., & Nakagawa, H. (Eds.), *Plant mutation breeding and biotechnology* (pp.123-134). Italy: CAB International and FAO. <https://doi.org/10.1079/9781780640853.012>
- Lemus, Y., Méndez-Natera, J. R., Cedeño, J. R., & Otahola-Gómez, V. (2002). Radiosensibilidad de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* L. Walp) a radiaciones gamma). *Revista UDO Agrícola* 2(1): 22-28.
- Liu, B., Wu Y., Xu, X., Song, M., Zhao, M. & Fu, X. D. (2008). Plant height revertants of Dominant Semidwarf mutant rice created by low-energy ion irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 266 (7): 1099-1104. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.02.045>
- López-Mendoza, H., Carrillo-Rodríguez, J.C., & Chávez-Servia, J.L. (2012). Effects of Gamma-Irradiated Seeds on Germination and Growth in *Capsicum annum* L. Plants Grown in a Greenhouse. *Acta Horticulturae* 947: 77-81. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.947>
- Macovei, A., Garg, B., Raikwar, S., Balestrazzi, A., Carbonera, D., Buttafava, A., Jiménez, B. J. F., Sarvajeet Singh, G. S., & Tuteja, N. (2014). Synergistic Exposure of Rice Seeds to Different Doses of Y-Ray and Salinity Stress Resulted in Increased Antioxidant Enzyme Activities and Gene-Specific Modulation of TC-NER Pathway. *BioMed Research International* 2014(67634): 15 p. <https://doi.org/10.1155/2014/676934>
- Marcu, D., Cristea, V. & Daraban, L. (2013a). Dose-dependent effects of gamma radiation on lettuce (*Lactuca sativa* var. capitata) seedlings. *International Journal of Radiation Biology* 89 (3): 219-223. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.734946>
- Marcu, D., Damian, G., Cosma, C. & Cristea, V. (2013b). Gamma radiation effects on seed germination, growth and pigment content, and ESR study of induced free radicals in maize (*Zea mays*). *Journal of Biological Physics* 39(4): 625-634. <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322-z>
- Mazvimbakupa, F., Modi, A. T., & Mabhaudhi, T. (2015). Seed quality and water use characteristics of maize landraces compared with selected commercial hybrids. *Chilean Journal of Agricultural Research* 75(1):13-20.
- Meitei, T. R., Thokchom, R., Bhaigyabati, T. & Chanu, A. M. (2020). Response of radioactive cobalt (^{60}Co) teletherapy on M1 plants of *Capsicum chinense* Jacq. *Revista de innovación farmacéutica* 9(11): 87-91. <https://doi.org/10.22271/tpi.2020.v9.i11b.5320>
- Nasab, S., Sharifi-Sirchi, G., & Torabi-Sirchi, H. (2010). Assessment of dissimilar gamma irradiations on barley *Hordeum vulgare* spp. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 2 (4): 59-63.
- Oladosu, Y., Rafii, M.Y., Abdullah, N., Hussin, G., Ramli, A., Rahim, H.A., Miah, G. & Usman, M. (2016). Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 30 (1): 1-16. <https://doi.org/10.1080/1310281>

[8.2015.1087333](#)

- Omar, S. R., Ahmed, O. H, Saamin, S., & Majid, N. M. A. (2008). Gamma Radiosensitivity Study on Chili (*Capsicum annuum*). *American Journal of Applied Sciences* 5 (2): 67-70.
- Pérez-Castañeda, L., Castañón-Nájera, G., Ramírez-Meraz, M. & Mayek-Pérez, N. (2015). Avances y perspectivas sobre el estudio del origen y la diversidad Genética de *Capsicum* spp. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2 (4):117-128.
- Piri, I., Babayan, M., Tavassoli, A., & Javaheri, M. (2011). The use of gamma irradiation in agricultura. *African Journal of MicrobiologBy Research* 5 (32): 5806-5811. <https://doi.org/10.5897/AJMR11.949>
- Rangel-Castillo, A. E., Iturriaga, G., Ramírez-Pimentel, J. G. Ángeles-Santos, A., García-Andrade, J. M., Covarrubias-Prieto, J. & Aguirre-Mancilla, C. L. (2022). Effect of the physical mutagenesis with ⁶⁰Co on jalapeño pepper seed quality. *Chilean Journal of Agricultural Research* 82 (3): 390-398. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392022000300390>
- Rassam, Y. Z., Boya, A. F & Mashhadani, F. A. A. (2012). Laser treatment may enhance growth and resistance to fungal infection of hard wheat seeds. *Middle East Journal of Agriculture Research* 1 (1): 1-5.
- Reyes-Pérez, J. J., Murillo-Amador, B., Nieto-Garibay, A., Troyo-Diéguez, E., Reynaldo-Escobar, I. M. & Rueda-Puente, E. O. (2013). Germinación y características de plántulas de variedades de albahaca (*Ocimum basilicum* L.) sometidas a estrés salino. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(6): 869-880. <https://doi.org/10.29312/remexca.v4i6.1155>
- Saputro, T. B., Muslihatin, W., Wahyuni, D. K., Nurhidayati, T., Wardhani, F. O. & Rosalia, E. (2019). Variation induction of *Glycine max* through low dose gamma irradiation produces genetic and physiological alteration as source of tolerant variants in waterlogging conditions. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity* 20 (11) :3299-3308. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d201124>
- Song, J. Y., Kim, D. S., Lee, M.-C., Lee, K. J., Kim, J. B., Kim, S. H., Ha, B.-K., Yun, S. J., & Kang, S.-Y. (2012). Physiological characterization of gamma-ray induced salt tolerant rice mutants. *Australian Journal of Crop Science* 6 (3): 421-429.
- Thisaweck, M., Saritnum, O., S. Sarapirom, S., Prakrajang, K. & Phakham, W. (2020). Effects of Plasma Technique and Gamma Irradiation on Seed Germination and Seedling Growth of Chili Pepper. *Chiang Mai Journal of Science* 47(1): 73-82.
- Thole, V., Peraldi A., Worland, B., Nicholson, P., Doonan, J. H. & Vain, P., (2011). T-DNA mutagenesis in *Brachypodium distachyon*. *Journal of Experimental Botany* 63(2): 567-576. <https://doi.org/10.1093/jxb/err333>
- Ulukapi, K., & Ozmen, S. F. (2018). Study of the effect of irradiation (⁶⁰Co) on M1 plants of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars and determined of proper doses for mutation breeding. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences* 11 (2): 157-161. <https://doi.org/10.1093/jxb/err333>
- Vázquez, D., Salas, P. L., González, J. A., De la Cruz, E., Sánchez, E. & Preciado, P. (2020). Commercial and nutraceutical quality Jalapeño pepper affected by salicylic and acid levels. *Interciencia* 45(9): 423-427.
- Vázquez-Casarrubias, G., Escalante-Estrada, J. A. S., Rodríguez-González, Ma. T., Ramírez-Ayala, C., & Escalante-Estrada, L. E. (2011). Edad al trasplante y su efecto en el crecimiento y rendimiento de Chile apaxtleco. *Revista Chapingo Horticultura* 17 (1): 61-65.

- Viana, V. E., Pegoraro, C., Busanello, C. & Oliveira, A. C. (2019). Mutagénesis en arroz: La base para la cría de una nueva súper planta. *Frontiers in Plant Science* 10: 1326. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01326>
- Wang, X., Ma, R., Cui, D., Cao, Q., Shan, Z. & Jiao, Z. (2017). Physio-biochemical and molecular mechanism underlying the enhanced heavy metal tolerance in highland barley seedlings pre-treated with low-dose gamma irradiation. *Scientific Reports* 7(1):1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14601-8>
- Warade, C. A., Badere, R. S. & Kale, M. C. (2022). Effect of gamma irradiation on seed germination and seedling growth of *Capsicum annum* L. *International Journal of Researches in Biosciences, Agriculture and Technology* 10(1): 37-42.
- Wiendl, T. A., Wiendl, F. W., Franco, S. S., Franco, J. G., Althur, V., & Arthur, P. B. (2013). Effects of gamma radiation in tomato seeds. *International Nuclear Atlantic Conference*. Recife. 24–29 November. Associação Brasileira de Energia Nuclear. Rio de Janeiro, Brazil. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/084/45084467.pdf