



## Radio sensibilidad de tres variedades de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) irradiadas con rayos gamma de Cobalto-60\*

### Radio sensitivity of three tomato varieties (*Solanum lycopersicum* L.) irradiated with Cobalt-60 gamma rays

Jorge Enrique Jaén Villarreal<sup>1</sup>, María Caridad González Cepero<sup>2</sup>, Ismael Camargo Buitrago<sup>1</sup>, Ana Elida Saéz Cigarruista<sup>1</sup>, Rodolfo Guillama Alonso<sup>2</sup>, José Ángel Guerra Murillo<sup>1</sup>

\* Recepción: 1 de marzo, 2023. Aceptación: 11 de julio, 2023. El presente trabajo formó parte de la tesis de doctorado del primer autor, financiada por La Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá (SENACYT), Panamá.

<sup>1</sup> Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá. Ciudad del Saber, Clayton, Panamá. [jorgejaen02@gmail.com](mailto:jorgejaen02@gmail.com) (autor para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-2816-0562>); [camargo.ismael@gmail.com](mailto:camargo.ismael@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0003-4199-0621>); [ansacig@gmail.com](mailto:ansacig@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-4901-7263>); [guerra.joseangel@gmail.com](mailto:guerra.joseangel@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-4114-0814>).

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. [mcaridad9450@gmail.com](mailto:mcaridad9450@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-1154-1756>); [rodolfoguillama@gmail.com](mailto:rodolfoguillama@gmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-6961-7864>).

## Resumen

**Introducción.** El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es considerado uno de los cultivos más importantes en el mundo. La mejora genética del tomate ha empleado diferentes métodos para generar variabilidad, la inducción de mutaciones es una de las técnicas empleadas en la obtención de variedades mejoradas. El primer paso, en el uso de esta herramienta, es el estudio de radiosensibilidad para determinar la dosis de irradiación a emplear. **Objetivo.** Determinar la radiosensibilidad y la dosis de rayos gamma de cobalto-60 a emplear en tres variedades de tomate. **Materiales y métodos.** Esta investigación se desarrolló en enero del año 2020, en el Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas de Cuba. Se irradiaron con rayos gamma de Cobalto-60 semillas de tres variedades de tomate, con dosis entre 100 Gy y 900 Gy, con intervalos de dosis de 100 Gy; también se empleó un control sin irradiar. Se evaluaron el porcentaje de germinación, la altura y la sobrevivencia de las plántulas. **Resultados.** Se observó que a mayores dosis de irradiación se redujo la germinación, la sobrevivencia y la altura de las plántulas. Las variedades IDIAP T-7 e IDIAP T-9 redujeron su germinación a la dosis de 400 Gy y el cultivar DINA RPs a los 300 Gy. Los genotipos presentaron valores de sobrevivencia por debajo del 50 % a la dosis de 800 Gy. La reducción de altura inició a la dosis de 200 Gy para la variedad IDIAP T-7, 300 Gy para DINA RPs y 400 Gy para IDIAP T-9. **Conclusión.** Las dosis de DL-50 identificadas fueron 692, 588 y 630 Gy y las dosis de GR-50 fueron 407, 467 y 380 Gy para las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 Y DINA RPs, respectivamente. Se seleccionó la dosis GR-50 de cada una de las variedades para el programa de mejora por mutaciones.

**Palabras claves:** mutación, irradiación, variabilidad genética, dosis mutagénica.

## Abstract

**Introduction.** Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is considered one of the most important crops in the world. Genetic improvement of tomatoes has employed different methods to generate variability, and mutation the induction



of mutations is one of the techniques used to obtaining improved varieties. The first step in using this tool is studying radiosensitivity to determine the irradiation dose to be used. **Objective.** To determine the radiosensitivity and the dose of cobalt-60 gamma rays to be used in three tomato varieties. **Materials and methods.** This research was conducted in January 2020 at the Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas of Cuba. Seeds of three tomato varieties were irradiated with cobalt-60 gamma rays, with doses ranging from 100 Gy to 900 Gy, at intervals of 100 Gy; an unirradiated control was also used. The percentage of germination, plant height, and seedling survival were evaluated. **Results.** It was observed that higher irradiation dose reduced germination, survival, and plant height. The IDIAP T-7 and IDIAP T-9 varieties reduced germination at a dose of 400 Gy, while the DINA RPs cultivar reduced germination at 300 Gy. Genotypes showed survival values below 50 % at a dose of 800 Gy. Height reduction began at doses of 200 Gy for IDIAP T-7, 300 Gy for DINA RPs, and 400 Gy for IDIAP T-9. **Conclusion.** The DL-50 doses were identified as 692, 588, and 630 Gy, and the GR-50 doses were 407, 467, and 380 Gy for the IDIAP T-7, IDIAP T-9, and DINA RPs varieties, respectively. The GR-50 dose of each variety was selected for the mutation breeding program.

**Keywords:** mutation, irradiation, genetic variability, mutagenic dose.

## Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es considerado una de las hortalizas más importantes en el mundo, debido a su alto valor nutricional y sus múltiples usos como alimento fresco, cocido y procesado (Trivedi et al., 2016). Es una planta modelo de la familia Solanaceae, debido a su ciclo de vida corto, genoma diploide simple y secuencia de genoma disponible (Just et al., 2013; Ranjan et al., 2012).

La mejora genética del tomate ha empleado diferentes métodos para generar la variabilidad, la inducción de mutaciones es una de las técnicas empleadas para la obtención de variedades mejoradas (Ali Zafar et al., 2022; Villaseñor Mir, 2018). La principal ventaja de esta técnica es el menor tiempo requerido para obtener un cultivar con caracteres mejorados, al compararlo con el proceso de hibridación y selección (Çelik & Atak, 2017), ya que se pueden variar uno o pocos caracteres sin modificar el resto del genotipo (Patil et al., 2017). La radiación gamma induce mutaciones por medio de aberraciones estructurales del cromosoma en forma de deleción y translocación (Shu et al., 2012). Los rayos gamma tienen ventajas sobre otros agentes mutagénicos, debido a su fácil disponibilidad, mayor grado de penetración en el tejido vegetal, buena reproducibilidad y elevada frecuencia de mutaciones (Gruère & Rosegrant, 2008; Laskar & Khan, 2014).

El éxito de la mutagénesis inducida depende del uso de la dosis óptima de agentes mutagénicos (Ernest et al., 2020; Hazra et al., 2021). El uso eficiente de la radiación gamma para ampliar la variabilidad genética, implica realizar pruebas que permitan determinar la dosis óptima de irradiación, la cual dependerá de las características físicas del material vegetal (Madriz-Martínez et al., 2022). La dosis óptima del agente mutagénico se determina a partir de la dosis letal media (DL-50) y reducción media del crecimiento (GR-50), esta última es la dosis que reduce el crecimiento en un 50 % (Gruère & Rosegrant, 2008; Mudibu et al., 2012).

Este estudio se realizó con el objetivo de determinar la radiosensibilidad y dosis óptima de irradiación gamma de cobalto-60 de tres variedades de tomate.

## Materiales y métodos

Esta investigación se desarrolló en el mes de enero del año 2020. Semillas de las variedades de tomate IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá (IDIAP) con un 12 % de humedad,

fueron irradiadas. Como fuente de irradiación se utilizó un irradiador MPX de Cobalto-60 con una potencia de dosis de 2,463 kGy/h del Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear (CEADEN) de Cuba.

Las semillas se irradiaron con dosis de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 y 900 Gy. En el tratamiento control se utilizaron semillas sin irradiar de cada cultivar, con base en el protocolo de pruebas de radiosensibilidad descrito por Spencer-Lopes et al. (2021). Al día siguiente de la irradiación, se sembraron las semillas en bandejas de germinación de poliestireno expandido de 200 alveolos, con una mezcla de suelo ferralítico rojo (Hernández-Jiménez et al., 2019) y humus de lombriz en proporciones de 3:1. Las bandejas se colocaron en un invernadero tipo túnel del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), San José de las Lajas, provincia de Mayabeque, Cuba; ubicado a 23°00'08" de latitud norte y 82°08'24" de longitud oeste, a una altitud de 126 m s. n. m., a una temperatura entre los 25 °C y 28 °C.

Se sembraron veinte semillas por cada tratamiento bajo un diseño completamente aleatorizado con arreglo factorial con dos factores (cultivares y dosis de irradiación), diez tratamientos y cuatro repeticiones. El manejo del semillero se realizó según el manual técnico del IDIAP (Guerra Murillo et al., 2016).

A los 10 días después de la siembra (dds), se evaluó el porcentaje de germinación de las semillas y a los 15 días se midió la altura de las plántulas (mm), los cuales se expresaron como porcentaje del control de cada cultivar. Se determinó, además, la sobrevivencia de las plántulas al final del experimento (15 dds).

### **Análisis estadísticos**

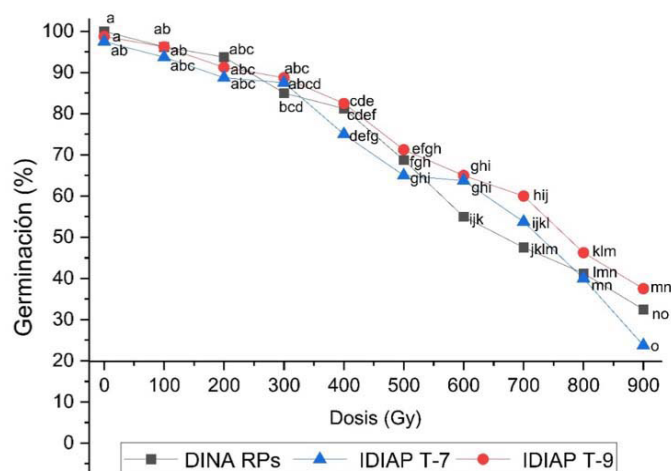
A los datos obtenidos se les verificó los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza por las pruebas de Kolmogorov - Smirnov & Levene y se procesaron mediante un análisis de varianza tipo III, mediante el programa estadístico SPSS Statistics versión 22. Las medias se compararon por la prueba de rangos múltiples de Tukey al 5 % de probabilidad y los gráficos se hicieron en el programa OriginPro 2022. La DL-50 y GR-50 se determinaron con un análisis probit en base a la sobrevivencia de las plántulas para la DL-50 y en función a la altura de las plántulas para la GR-50 (Postelnicu, 2011).

## **Resultados**

### **Germinación de las semillas (10 dds)**

Los resultados para la germinación de las semillas presentaron diferencias altamente significativas ( $P < 0,05$ ) entre los tres genotipos, las dosis de irradiación y la interacción entre ambos factores. En general, en todas las variedades y dosis estudiadas las semillas iniciaron a germinar a los 5 días después de sembradas. Los tres controles sin irradiar presentaron valores de germinación por encima del 97 %.

Se observó una disminución de la germinación con el incremento de las dosis de irradiación gamma en los tres genotipos evaluados, sin embargo, hubo interacción genotipo x dosis, los valores medios indicaron que las variedades IDIAP T-7 y la IDIAP T-9 redujeron significativamente su germinación a la dosis de 400 Gy y la variedad DINA RPs a los 300 Gy. La germinación, inició una reducción progresiva hasta alcanzar un valor mínimo en la dosis absorbida de 900 Gy con 34 %, 32 % y 24 % en las variedades IDIAP T-9, DINA RPs e IDIAP T-7, respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Efecto de la radiación gamma de cobalto-60 sobre la germinación de las semillas de tomate en la generación M1 de las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Las variedades con diferentes letras indican porcentajes de germinación significativamente diferentes de acuerdo con la comparación de medias de rangos múltiples de Tukey ( $P < 0,05$ ).

**Figure 1.** Effect of cobalt-60 gamma radiation on the germination of tomato seeds in the M1 generation of the IDIAP T-7, IDIAP T-9, and DINA RPs varieties. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Varieties with different letters indicate significantly different germination percentages according to Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).

### Sobrevivencia de las plántulas (15 dds)

El porcentaje de sobrevivencia de las plántulas presentó diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ) para el efecto de las dosis de irradiación y para la interacción entre ambos factores. Algunas plántulas germinadas a partir de semillas expuestas a radiación, cesaron su crecimiento y murieron.

La comparación de medias mostró que, en los tres genotipos, la sobrevivencia disminuyó con el incremento de la dosis. Los genotipos presentaron valores de sobrevivencia por debajo del 50 % a las dosis de 700 Gy para la variedad DINA RPs y de 800 Gy para las variedades IDIAP T-7 y la IDIAP T-9 (Figura 2).

### Altura de las plántulas (15 dds)

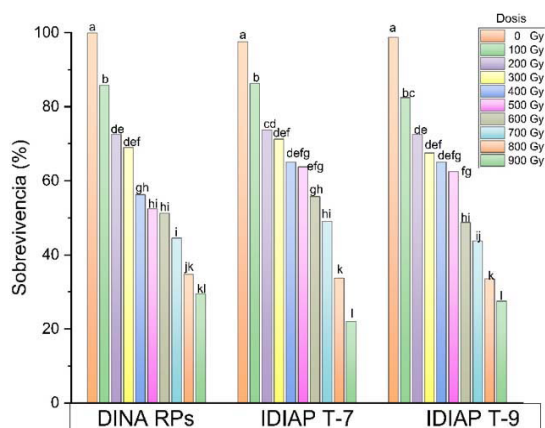
El análisis de varianza para la variable altura de las plántulas mostró diferencias altamente significativas ( $P < 0,05$ ) para las dosis de irradiación, los genotipos y la interacción entre ambos factores.

Se observaron diferencias entre las variedades irradiadas con diferentes dosis, ya que la altura de las plántulas se redujo significativamente en la variedad IDIAP T-7 a partir de los 200 Gy, en la variedad DINA RPs a partir de los 300 Gy y en la variedad IDIAP T-9 a partir de los 400 Gy (Figura 3).

La dosis que redujo la altura de la plántula en un 50 % (GR-50) varió en los tres genotipos. El valor más alto para la GR-50 lo presentó la variedad IDIAP T-9 con 467 Gy, seguido de la variedad IDIAP T-7 con 407 Gy y la variedad DINA RPs con 380 Gy. Este último el cultivar fue el más radiosensible.

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) fue alto para los tres genotipos, con valores de 0,898, 0,966 y 0,833 para DINA RPs, IDIAP T-7 e IDIAP T-9, respectivamente (Figura 4).

El análisis probit para el porcentaje de mortalidad de las plántulas indicó un incremento lineal al aumentar las dosis en los tres genotipos. Los resultados del  $R^2$  fueron altos, con valores de 0,9636, 0,8434 y 0,8815 para DINA

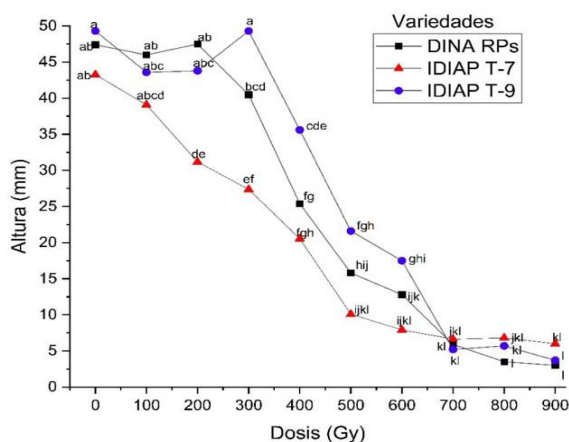


**Figura 2.** Porcentaje de sobrevivencia de plántulas de tomate obtenidas a partir de las semillas irradiadas con rayos gamma de cobalto-60 de las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Las barras con diferentes letras indican porcentaje de sobrevivencia significativamente diferentes en los genotipos evaluados de acuerdo con la comparación de medias de rangos múltiples de Tukey ( $P < 0.05$ ).

**Figure 2.** Percentage of survival of tomato seedlings obtained from seeds irradiated with cobalt-60 gamma rays of the IDIAP T-7, IDIAP T-9, and DINA RPs varieties. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Bars with different letters indicate significantly different survival percentages in the evaluated genotypes according to Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).



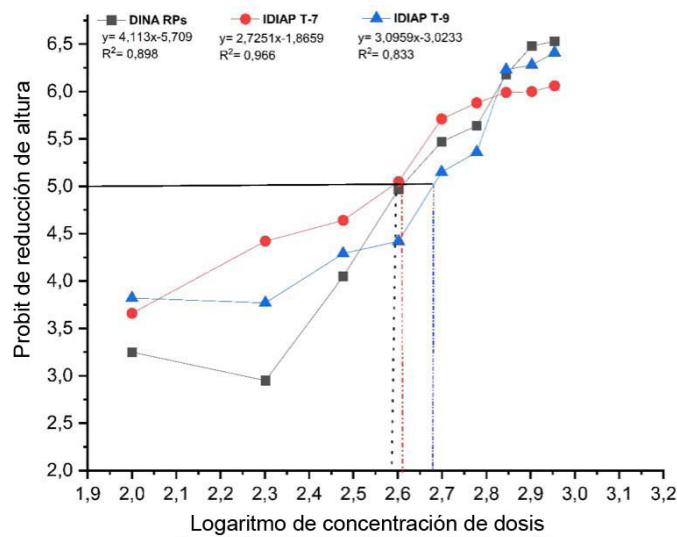
**Figura 3.** Efecto de la radiación gamma de cobalto-60 sobre la altura de las plántulas de tomate en la generación M1 de las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Las variedades con diferentes letras indican alturas de plántulas (mm) significativamente diferentes en las distintas dosis de radiación gamma de acuerdo con la comparación de medias de rangos múltiples de Tukey ( $P < 0.05$ ).

**Figure 3.** Effect of cobalt-60 gamma radiation on the height of tomato seedlings in the M1 generation of the IDIAP T-7, IDIAP T-9, and DINA RPs varieties. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

Varieties with different letters indicate significantly different seedling heights (mm) at different gamma radiation doses according to Tukey's multiple range test ( $P < 0.05$ ).

RP, IDIAP T-7 e IDIAP T-9, respectivamente. La dosis letal media (DL-50) para la variedad IDIAP T-9 fue de 588 Gy, para DINA RPs de 630 Gy y para IDIAP T-7 de 692 Gy (Figura 5).

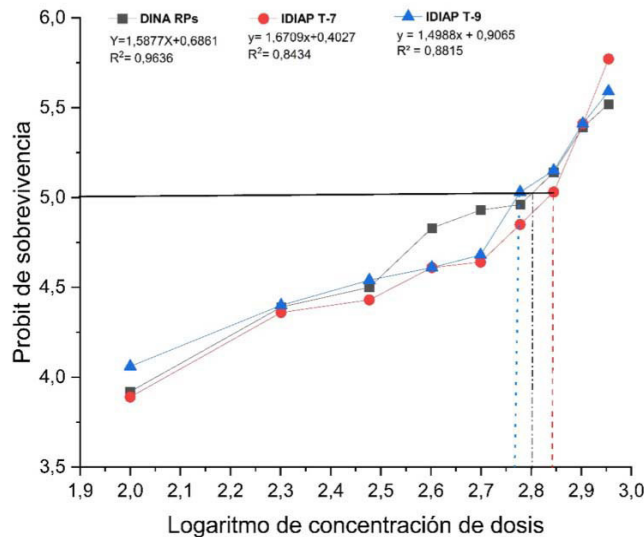


**Figura 4.** Análisis probit sobre el efecto de la radiación gamma de cobalto-60 en la altura de las plántulas de tomate de las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

El punto de intersección de la línea horizontal y las líneas verticales indica el valor logarítmico de la dosis media de reducción del crecimiento.

**Figure 4.** Probit analysis on the effect of cobalt-60 gamma radiation on the height of tomato seedlings of the IDIAP T-7, IDIAP T-9, and DINA RPs varieties. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

The intersection point of the horizontal line and the vertical lines indicates the logarithmic value of the median growth reduction dose.



**Figura 5.** Análisis probit sobre el efecto de la radiación gamma de cobalto-60 en la sobrevivencia de las plántulas de tomate de las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

El punto de intersección de la línea horizontal y las líneas verticales indica el valor logarítmico de la dosis letal media.

**Figure 5.** Probit analysis on the effect of cobalt-60 gamma radiation on the survival of tomato seedlings of IDIAP T-7, IDIAP T-9 and DINA RPs. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas, San José de Las Lajas, Mayabeque, Cuba. 2020.

The point of intersection of the horizontal line and the vertical lines indicates the logarithmic value of the median lethal doses.

## Discusión

Los resultados del presente estudio mostraron la interacción cultivar-dosis de radiación, así como una disminución de los parámetros evaluados con el incremento de las dosis. Algunos autores reportaron resultados similares en el cultivo de tomate (Hazra et al., 2022; Norfadzrin, 2007) y otros cultivos (Ahumada-Flores et al., 2020; Hernández-Muñoz et al., 2017; Iglesias-Andreu et al., 2010; Kon et al., 2007)

El efecto reductor sobre la germinación, la sobrevivencia y la altura de las plántulas, como resultado de la exposición a la radiación gamma, podría deberse a varias razones, ya que la irradiación gamma causa algunas lesiones que dan como resultado una reducción en la germinación de las semillas y el desarrollo de fenotipos aberrantes, debido a una composición genética alterada (Ali Zafar et al., 2022). Estudios realizados en otros cultivos, indicaron que una disminución en la germinación podía deberse a lesiones cromosómicas después de eventos mitóticos anormales provocados por la radiosensibilidad de las células vegetales, especialmente a dosis más altas (Datta, 2009), actividad enzimática alterada y bloqueo en la formación de ADN celular, lo que hace que el crecimiento de la planta se ralentice o se detenga (Roslim et al., 2015).

Los resultados mostraron que la sobrevivencia y la altura de las plántulas se afectaron negativamente con el aumento de la dosis de radiación gamma. Esto pudo ser debido a daños en el ADN relacionados con deleciones, inserciones y traslocaciones de bases que pueden dar lugar a nuevas sustancias que influyen en la inhibición del crecimiento e incluso provocar la letalidad (Manova & Gruszka, 2015), y se inducen modificaciones indeseables de estructuras cromosómicas que inhiben la expresión de genes implicados en el ciclo celular (Saraswathi et al., 2016). Dosis altas de irradiación provocan mayores daños en los cromosomas, lo que reduce la altura de la planta (Jaipo et al., 2019).

Al analizar la curva generada por el análisis probit para la mortalidad y la altura de las plántulas, se observó, de manera general, que la dosis letal media y la reducción media de la altura de las plántulas varió entre los tres genotipos evaluados. Estos resultados corroboran la importancia de determinar la dosis a emplear en cada genotipo.

Las dosis identificadas fueron distintas en las tres variedades estudiadas. Otros estudios han abordado la temática de la variabilidad en los rangos de dosis entre diferentes genotipos y especies vegetales, entre los que se pueden citar a Kon et al. (2007) en frijol (*Vigna sesquipedalis*), Pavan Kumar y Venu-Babu (2011) en arroz (*Oryza sativa* L.), Murti et al. (2013) en fresas (*Fragaria vesca*) y Ali Zafar et al. (2022), Peng et al. (2020), Ramírez et al. (2006) y Sikder et al. (2013) en tomate. Estos estudios indicaron que la DL-50 y la GR-50 son valores específicos para cada especie, genotipo e incluso tamaño y tipo de tejido irradiado.

Los genotipos estudiados presentaron un rango para la DL-50 de 588 a 692 Gy. Para la GR-50 las dosis estuvieron comprendidas entre los 380 y 467 Gy, valores que coinciden con los expuestos por otros autores, quienes han establecido el GR-50 en un rango de dosis en el cultivo de tomate de 450 a 600 Gy y definen las dosis típicas en el rango de 200 a 400 G, según el genotipo (Brunner, 1995; Spencer-Lopes et al., 2021).

## Conclusiones

Se observaron diferencias en la radiosensibilidad de los genotipos evaluados, así como la reducción de la germinación, la sobrevivencia y la altura de las plántulas por el incremento de las dosis de irradiación.

Se identificaron las DL-50 de 692, 588 y 630 Gy y las GR-50 de 407, 467 y 380 Gy para las variedades IDIAP T-7, IDIAP T-9 y DINA RPs, respectivamente, además, se seleccionó la dosis GR 50 de cada una de las variedades para el programa de mejora por mutaciones.

## Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud por el apoyo brindado para el desarrollo del presente trabajo al Instituto Nacional de Ciencias Agrícola de Cuba, al Centro de Aplicaciones Tecnológicas y Desarrollo Nuclear de Cuba, al Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, al proyecto ARCAL RLA 5068 del Organismo Internacional de Energía Atómica y a La Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación de Panamá.

## Referencias

- Ahumada-Flores, S., Briceño-Zamora, M. F., García-Montoya, J. A., López-Cázar, C., Pereó-Galvez, A. E., Parra-Cota, F. I., & de los Santos-Villalobos, S. (2020). Gamma radiosensitivity study on wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum). *Open Agriculture*, 5(1), 558–562. <https://doi.org/10.1515/opag-2020-0057>
- Ali Zafar, S., Aslam, M., Albaqami, M., Ashraf, A., Hassan, A., Iqbal, J., Maqbool, A., Naeem, M., Al-Yahyai, R., & Tan Kee Zuan, A. (2022). Gamma rays induced genetic variability in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) germplasm. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(5), 3300–3307. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.008>
- Brunner, H. (1995). Radiation induced mutations for plant selection. *Applied Radiation and Isotopes*, 46(6–7), 589–594. [https://doi.org/10.1016/0969-8043\(95\)00096-8](https://doi.org/10.1016/0969-8043(95)00096-8)
- Çelik, Ö., & Atak, Ç. (2017). Applications of ionizing radiation in mutation breeding. In A. M. Maghraby (Ed.), *New Insights on Gamma Rays* (pp. 111–132). InTech Open. <https://doi.org/10.5772/66925>
- Datta, S. K. (2009). A report on 36 years of practical work on crop improvement through induced mutagenesis. In Q. Y. Shu (Ed.), *Induced plant mutations in the genomics era* (pp. 253–256). Food and Agriculture Organisation, & International Atomic Energy Agency. <https://www.fao.org/3/i0956e/I0956e.pdf>
- Ernest, F. P., Noëlle, M. A. H., Godswill, N. -N., Thiruvengadam, M., Simon, O. A., Bille, N. H., Martin, B. J., Rebezov, M., & Shariati, M. A. (2020). Radiosensitivity of two varieties of watermelon (*Citrullus lanatus*) to different doses of gamma irradiation. *Brazilian Journal of Botany*, 43(4), 897–905. <https://doi.org/10.1007/s40415-020-00659-8>
- Gruère, G. P., & Rosegrant, M. W. (2008). Assessing the implementation effects of the biosafety protocol's proposed stringent information requirements for genetically modified commodities in countries of the Asia Pacific Economic Cooperation. *Review of Agricultural Economics*, 30(2), 214–232. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1467-9353.2008.00401.x>
- Guerra Murillo, J. A., Villarreal Nuñez, J. E., Herrera Vásquez, J. A., Aguilera Cogley, V., & Osorio Burgos, O. (2016). *Manejo integrado del cultivo de tomate industrial* (Manual técnico). Instituto de Investigación Agropecuaria de Panamá. <http://www.idiap.gob.pa/download/manual-tecnico-manejo-integrado-del-cultivo-de-tomate-industrial/?wpdmdl=3309>
- Hazra, S., Gorai, S., Bhattacharya, S., Bose, S., Hazra, P., Chattopadhyay, A., & Maji, A. (2022). Radio-sensitivity of diverse tomato genotypes with respect to optimization of gamma irradiation dose. *Brazilian Journal of Botany*, 45, 917–927. <https://doi.org/10.1007/s40415-022-00823-2>
- Hazra, S., Gorai, S., Umesh Kumar, V., Bhattacharya, S., Maji, A., Jambhulkar, S., Ali, N., & Chattopadhyay, A. (2021). Optimization of gamma radiation dose for induction of mutations in okra. *International Journal of Vegetable Science*, 27(6), 574–584. <https://doi.org/10.1080/19315260.2021.1894626>



- Hernández-Jiménez, A., Pérez-Jiménez, J. M., Bosch-Infante, D., & Speck, N. C. (2019). La clasificación de suelos de Cuba: énfasis en la versión de 2015. *Cultivos Tropicales*, 40(1), a15–e15. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1504/2622>
- Hernández-Muñoz, S., Pedraza-Santos, M. E., López, P. A., De la Cruz-Torres, E., Fernández-Pavía, S. P., Martínez-Palacios, A., & Martínez-Trujillo, M. (2017). Determinación de la DL50 Y GR 50 con rayos gamma (60Co) en protocormos de *Laelia autumnalis* in vitro. *Agrociencia*, 51(5), 507–524. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1307/1307>
- Iglesias-Andreu, L. G., Sánchez-Velásquez, L. R., Tivo-Fernández, Y., Luna-Rodríguez, M., Flores-Estévez, N., Noa-Carrazana, J. C., Ruiz-Bello, C., & Moreno-Martínez, J. L. (2010). Efecto de radiaciones gamma en *Abies religiosa* (Kunth) Schlttd. et Cham. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16(1), 5–12.
- 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, Article 012106. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1380/1/012106>
- Just, D., Garcia, V., Fernandez, L., Bres, C., Mauxion, J.-P., Petit, J., Jorly, J., Assali, J., Bournonville, C., Ferrand, C., Baldet, P., Lemaire-Chamley, M., Mori, K., Okabe, Y., Ariizumi, T., Asamizu, E., Ezura, H., & Rothan, C. (2013). Micro-Tom mutants for functional analysis of target genes and discovery of new alleles in tomato. *Plant Biotechnology*, 30(3), 225–231. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.13.0622a>
- Kon, E., Ahmed, O. H., Saamin, S., & Majid, N. M. A. (2007). Gamma radiosensitivity study on long bean (*Vigna sesquipedalis*). *American Journal of Applied Sciences*, 4(12), 1090–1093.
- Laskar, R. A., & Khan, S. (2014). Mutagenic effects of MH and MMS on induction of variability in broad bean (*Vicia faba* L.). *Annual Research & Review in Biology*, 4(7), 1129–1140. <https://doi.org/10.9734/arrb/2014/6553>
- Madriz-Martínez, M., Fernández-Acuña, A., Hernandez-Villalobos, S., Orozco-Rodríguez, R., & Argüello-Delgado, J. (2022). Radiosensibilidad del arroz (*Oryza sativa* L. var CR5272) por irradiación gamma en Costa Rica. *Cultivos tropicales*, 43(1), Artículo 08. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1644/3233>
- Manova, V., & Gruszka, D. (2015). DNA damage and repair in plants - from models to crops. *Frontiers in Plant Science*, 6, Article 885. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00885>
- Mudibu, J., Nkongolo, K. K. C., Kalonji-Mbuyi, A., & Kizungu, R. V. (2012). Effect of gamma irradiation on Morpho-agronomic characteristics of soybeans (*Glycine max* L.). *American Journal of Plant Sciences*, 3(3), 331–337. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.33039>
- Murti, R. H., Kim, H. Y., & Yeoung, Y. R. (2013). Effectiveness of gamma ray irradiation and ethyl methane sulphonate on in vitro mutagenesis of strawberry. *African Journal of Biotechnology*, 12(30), 4803–4812. <https://doi.org/10.5897/ajb12.1386>
- Norfadzrin, F., Ahmed, O. H., Shaharudin, S., & Abdul Rahman, D. (2007). A preliminary study on gamma radiosensitivity of tomato (*Lycopersicon esculentum*) and okra (*Abelmoschus esculentus*). *International Journal of Agricultural Research*, 2(7), 620–625. <https://doi.org/10.3923/ijar.2007.620.625>
- Patil, U. H., Karale, A. R., Katwate, S. M., & Patil, M. S. (2017). Mutation breeding in chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* T.). *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 6(6), 230–232. <https://www.phytojournal.com/archives?year=2017&vol=6&issue=6&ArticleId=2083>

- Pavan Kumar, D., & Venu-Babu, P. (2011). Gamma radiosensitivity study on rice (*Oryza sativa* L.). *Asian Journal of Plant Science & Research*, 3(1), 54–68.
- Peng, C. S., Hoe, P. C. K., Bahari, N., & Shamsudin, S. (2020). Radiosensitivity test of tomato (*Solanum lycopersicum*) to gamma irradiation. *Jurnal Sains Nuklear Malaysia*, 32(1), 1–9. <https://202.186.20.70/index.php/jsnm/article/view/159>
- Postelnicu, T. (2011). Probit analysis. In M. Lovric (Ed.), *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 1128–1131). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2\\_461](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_461)
- Ramírez, R., González, L. M., Camejo, Y., Zaldívar, N., & Fernández, Y. (2006). Estudio de radiosensibilidad y selección del rango de dosis estimulantes de rayos X en cuatro variedades de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Cultivos Tropicales*, 27(1), 63–67. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/398/pdf>
- Ranjan, A., Ichihashi, Y., & Sinha, N. R. (2012). The tomato genome: implications for plant breeding, genomics and evolution. *Genome Biology*, 13(8), Article 167. <https://doi.org/10.1186/gb-2012-13-8-167>
- Roslim, D. I., Herman, & Fiatin, I. (2015). Lethal dose 50 (ld 50) of mungbean (*Vigna radiata* L. Wilczek) cultivar kampar. *SABRAO Journal of Breeding & Genetics*, 47(4), 510–516. <http://sabraojournal.org/wp-content/uploads/2018/01/SABRAO-J-Breed-Genet-47-4-510-516-Dewi.pdf>
- Saraswathi, M. S., Kannan, G., Uma, S., Thangavelu, R., & Backiyarani, S. (2016). Improvement of banana cv. Rasthali (Silk, AAB) against *Fusarium oxysporum* f.sp. *cubense* (VCG 0124/5) through induced mutagenesis: Determination of LD50 specific to mutagen, explants, toxins and *in vitro* and *in vivo* screening for *Fusarium* wilt resistance. *Indian Journal of Experimental Biology*, 54(5), 345–353.
- Shu, Q. Y., Forster, B. P., & Nakagawa, H. (2012). Principles and applications of plant mutation breeding. In Q. Y. Shu, B. P. Forster, & H. Nakagawa. (Eds.), *Plant mutation breeding and biotechnology* (pp. 301–325). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781780640853.0301>
- Sikder, S., Biswas, P., Hazra, P., Akhtar, S., Chattopadhyay, A., Badigannavar, A. M., & D'Souza, S. F. (2013). Induction of mutation in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) by gamma irradiation and EMS. *The Indian Journal of Genetics & Plant Breeding*, 73(4), 392–399. <https://doi.org/10.5958/j.0975-6906.73.4.059>
- Spencer-Lopes, M. M., Forster, B. P., & Jankuloski, L. (Eds.) (2021). *Manual de mejoramiento por mutaciones* (3ª ed.). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, & Organismo Internacional de Energía Atómica. <https://www.fao.org/3/i9285es/I9285ES.pdf>
- Trivedi, M., Singh, R., Shukla, M., & Tiwari, R. K. (2016). GMO and food security. In Omkar (Ed.), *Ecofriendly pest management for food security* (Chapter 23, pp. 703–726). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803265-7.00023-3>
- Villaseñor Mir, H. E. (2018). Sistema de mejoramiento genético de trigo en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (11), 2183–2189. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i11.796>