



## RESPUESTA DE *Physalis peruviana* L. A IRRADIACIÓN GAMMA EN VARIABLES FISIOLÓGICAS Y FÍSICAS DEL FRUTO

## RESPONSE OF *Physalis peruviana* L. TO GAMMA IRRADIATION ON PHYSIOLOGICAL AND PHYSICAL TRAITS OF THE FRUIT

Christian A. Moreno-Rodas<sup>1</sup>, Serafín Cruz-Izquierdo<sup>1\*</sup>, Aureliano Peña-Lomeli<sup>2</sup>, Oscar M. Antúnez-Ocampo<sup>3</sup>, Fernando Castillo-González<sup>4</sup>, Manuel Sandoval-Villa<sup>5</sup> y César A. Barrera-Irigoyen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Colegio de Postgraduados-Campus Montecillo (CP-CM), Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Fisiología Vegetal, Montecillo, Estado de México, México. <sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Estado de México, México. <sup>3</sup>Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Iguala, Iguala de la Independencia, Guerrero, México. <sup>4</sup>CP-CM, PREGEP-Genética, Montecillo, Estado de México, México. <sup>5</sup>CP-CM, Edafología, Montecillo, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (seracruz@colpos.mx)

### RESUMEN

La irradiación con <sup>60</sup>Co representa una herramienta útil para el mejoramiento de *Physalis peruviana* L., al inducir variabilidad en caracteres fisiológicos y físicos. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de radiación (0-200 Gy) sobre variables fenológicas (días a germinación, floración y cuajado) y físicas del fruto (peso, diámetros, color, materia seca) en cuatro ecotipos de uchuva: Chiclayo, Colombia, Sacha y Modificada. Se utilizó un diseño completamente al azar con arreglo factorial, siendo los factores de estudio los ecotipos y las dosis de irradiación. El análisis mostró efectos significativos ( $P \leq 0.05$ ) de los ecotipos, las dosis y su interacción en la mayoría de las variables. Dosis intermedias (50-150 Gy) promovieron la precocidad y aumentaron el peso, tamaño y coloración de los frutos, mientras que las dosis más altas (175-200 Gy) incrementaron el contenido de materia seca en ecotipos específicos. Los ecotipos Sacha y Modificada mostraron mejor respuesta en rendimiento y precocidad, mientras que Chiclayo destacó en acumulación de sólidos. La interacción genotipos  $\times$  dosis fue determinante en todos los casos, mostrando respuestas diferenciadas. Los resultados evidencian el potencial de la mutagénesis física como estrategia para mejorar la calidad y productividad del cultivo de uchuva, dependiendo de combinaciones apropiadas de dosis-variedad.

**Palabras clave:** Fruto, mejoramiento genético, mutagénesis física, radiación gamma, uchuva.

### SUMMARY

Irradiation with <sup>60</sup>Co is a useful tool for breeding *Physalis peruviana* L., as it induces variability in physiological and physical traits. The aim of this study was to evaluate the effect of different radiation doses (0-200 Gy) on phenological traits (days to germination, flowering and fruit set) and physical traits of the fruit (weight, diameters, color and dry matter) in four ecotypes of cape gooseberry: Chiclayo, Colombia, Sacha and Modificada. A completely randomized design with factorial arrangement was used with the studied factors being ecotypes and irradiation doses. The analysis showed significant effects ( $P \leq 0.05$ ) of ecotypes, doses and their interaction in most traits. Intermediate doses (50-150 Gy) promoted earliness and increased fruit weight, size and color intensity, while higher doses (175-200 Gy) increased dry matter content in specific ecotypes. Sacha and Modificada ecotypes showed better response for yield and earliness, whereas Chiclayo excelled in solids accumulation. The genotypes  $\times$  doses interaction was determinative in all cases, revealing differentiated responses. Results showed the potential

of physical mutagenesis as a strategy to improve fruit quality and crop productivity, depending on appropriate dose-variety combinations.

**Index words:** Cape gooseberry, fruit, gamma radiation, physical mutagenesis, plant breeding.

### INTRODUCCIÓN

El mercado de frutas exóticas va en aumento por consumidores que demandan alimentos diferenciados, que aporten beneficios para la salud por sus compuestos fitoquímicos. En este contexto, *Physalis peruviana* L., planta originaria de la región andina de Sudamérica, produce frutos con tales propiedades, también conocidos como uchuva o golden berry, son dulces y se consumen preferentemente en fresco, con buena aceptación por parte del consumidor debido a su agradable sabor y aroma; destacan por su contenido de ácido oxálico (20.5 mg/100 g), vitamina C (32.0 mg/100 g) y minerales (3, 45, 253, 20, 0.53, 0.22, 20 y 1.41 mg/100 g de Ca, P, K, Mg, Fe, Zn y Na, respectivamente), además de compuestos bioactivos como carotenoides (1.12-1.73 mg de  $\beta$ -caroteno/100 g), polifenoles (68.17-83.40 mg de ácido gálico/100 g) y fibra dietética (5.16 g/100 g), lo que los convierte en un alimento funcional (Añibarro-Ortega *et al.*, 2025; Obregón-La Rosa *et al.*, 2023). Estos atributos han impulsado el desarrollo de diversos estudios sobre manejo agronómico, mejoramiento genético, comercialización y procesamiento (mermeladas, jarabes, frutos secos), para ampliar su cultivo a otros países y ser consumido en diversas formas, como producto fresco o procesado, por ser un alimento más atractivo para los consumidores (Panizo e Higuera, 2025).

La uchuva presenta alta diversidad genética, principalmente como ecotipos, más que variedades

comerciales, seleccionados por su adaptación a condiciones locales y diferencias morfológicas. En Colombia, las introducciones 'Sudáfrica' y 'Kenia' ( $2n = 48$ ) producen frutos más grandes que el ecotipo 'Colombia' ( $2n = 32$ ) (Rodríguez y Bueno, 2006). Numerosas accesiones se conservan en bancos de germoplasma de Colombia, Ecuador, Perú, México, Chile, Costa Rica y Brasil (Ligarreto *et al.*, 2005), y en Australia y EUA se cultivan variedades como 'Golden Nugget', 'New Sugar Giant', 'Peace' y 'Goldenberry' (Fischer *et al.*, 2014). Además, mediante cultivo de anteras se han obtenido plantas doble haploides, facilitando la obtención rápida de líneas homocigóticas y mostrando el potencial para el mejoramiento genético de la especie (Núñez, 2020).

La irradiación con rayos gamma ( $^{60}\text{Co}$ ) en semillas de *P. peruviana* es una estrategia eficaz para inducir variaciones en caracteres fisiológicos y morfológicos que afectan el desarrollo de la planta y la calidad del fruto. Se ha documentado que la irradiación gamma puede acelerar la germinación, modificar el desarrollo vegetativo y alterar la dinámica reproductiva en plantas  $M_1$  de esta especie, con repercusiones en los atributos físicos del fruto (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2017; 2020); sin embargo, aún se conoce poco sobre la forma en que estos efectos impactan simultáneamente variables fenológicas de plantas y físicas del fruto. Por otro lado, la irradiación gamma también ha generado cambios en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.), donde dosis moderadas de radiación modificaron el peso, firmeza, color y contenido de agua mediante alteraciones celulares que afectan la división, expansión y el equilibrio hídrico (Desai *et al.*, 2018; Khalili *et al.*, 2017; Singh *et al.*, 2015).

A pesar del potencial de *P. peruviana* como cultivo alternativo y su interés en mercados internacionales, en México la investigación es limitada. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de irradiación gamma en variables fisiológicas y físicas de la semilla y fruto de tres ecotipos de uchuva, con el propósito de identificar respuestas dosis-dependientes útiles para el mejoramiento agronómico de la especie.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Germoplasma e irradiación

Se utilizaron semillas de *P. peruviana* de los ecotipos Chiclayo, Colombia, Sacha y Modificada, originarios de Perú, Colombia y Ecuador, con humedad de 13 a 14 % y germinación mínima de 80 %, almacenadas durante un año a temperatura de 6 a 8 °C y humedad relativa del 65 %. Los ecotipos presentan diferencias morfológicas y de

fruto, Chiclayo con cáliz alargado y frutos de 17 a 22 mm de diámetro, Sacha con cáliz de 6 a 7 nervaduras primarias y frutos de 17 a 25 mm, Modificada con tallos púrpura, hojas pubescentes y frutos pequeños (10 a 18 mm) y Colombia como variedad de referencia por su precocidad y estabilidad (Orozco-Balbuena *et al.*, 2021). La irradiación gamma con  $^{60}\text{Co}$  se realizó en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Ocoyoacac, México) en un irradiador Gammacell 220 (Atomic Energy, Canada Limited, Ottawa, Canada), aplicando dosis de 0, 5, 25, 50, 100, 150, 175 y 200 Gy. Cada dosis se aplicó a sobres con 3 g de semilla ( $\approx 1000$  semillas).

### Establecimiento del experimento

Una vez irradiadas las semillas, se colocaron en charolas con turba, una por cavidad y se regaron cada tres días con agua potable. Tras la emergencia, se aplicó solución nutritiva SN (Steiner, 1984) al 5 % (CE: 0.1 ds/m). A los 50 días, las plántulas, con una altura de 7 a 10 cm, fueron trasplantadas en bolsas de polietileno de 9 L de capacidad con tezontle (1 a 12 mm) en invernadero tipo túnel en la Universidad Autónoma Chapingo, México. Las plantas  $M_1$  se tutoraron con rafia y se nutrieron con SN Steiner al 100 % (2.0 ds/m), con pH de 6. El cultivo se mantuvo del 14 de septiembre de 2023 al 28 de febrero de 2024 con temperaturas de -2 a 38 °C.

### Variables de estudio

En semilla, el efecto de la irradiación se determinó con las variables i) días a germinación, ii) tiempo desde la siembra hasta el 50 % de emergencia; en planta fueron iii) días a floración, iv) días después del trasplante (ddt) hasta la primera flor, v) días a amarre y vi) días hasta el cuajado del primer fruto; en fruto, se evaluaron las variables vii) diámetro polar y viii) ecuatorial en cinco frutos por tratamiento, sin cáliz y de apariencia homogénea, el diámetro ecuatorial se registró en la parte media y el diámetro polar desde el pedúnculo hasta el ápice, con un vernier digital calibrado (Sure Built Mod. 49275.0, China), ix) color, se midió en el centro del diámetro polar del fruto con un colorímetro portátil (MiniScan EZ, HunterLab, Reston, Virginia, EUA), con geometría de 45°/0°, iluminante D65 y observador de 2°, usando el sistema CIELAB (L, a\*, b\*) (HunterLab, 2012; Pathare *et al.*, 2013), se utilizaron cinco frutos por tratamiento, x) peso fresco de 100 frutos, se recolectaron los frutos por tratamiento a los 160 días post-trasplante en cinco cosechas, se les eliminó el cáliz y se pesaron en una balanza digital  $\pm 0.1$  g (Scout SPX2201, Ohaus, Pine Brook, New Jersey, EUA); xi) porcentaje de peso seco (dos cosechas), se utilizó el método gravimétrico de secado en estufa (AOAC 925.45, 2005), para ello, se secaron 100 g de fruto por tratamiento en estufa a 75 °C hasta peso

constante, con una balanza digital de precisión ( $\pm 0.01$  g) (Scout SPX2201, Ohaus, Pine Brook, New Jersey, EUA); el porcentaje de materia seca (% MS) se calculó con la fórmula:

$$\% MS = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso fresco inicial}} \times 100$$

### Análisis de la información

Se aplicó análisis de varianza con un modelo factorial ( $P \leq 0.05$ ) para determinar el efecto del ecotipo (E), dosis (D) de irradiación e interacción  $E \times D$  en las variables analizadas. En las variables con diferencias significativas se utilizó la prueba de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) o la prueba de Kruskal-Wallis para variables no paramétricas. Los análisis fueron realizados en el paquete estadístico SAS versión 9.2 (SAS Institute, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables fisiológicas

#### Germinación de la semilla y aspectos reproductivos de plantas $M_1$

En el factor ecotipos, Sacha presentó emergencia de plántula más rápida (15.38 días) (Figura 1), diferenciándose significativamente del resto. Este proceso fue favorecido por dosis intermedias de radiación (150 Gy) que lo aceleraron 16.67 días (Figura 2), en comparación con dosis más altas (175 y 200 Gy) que lo retrasaron. En general, Sacha respondió favorablemente a 100 y 150 Gy (12.67 y 13 días), mientras que Colombia y Chiclayo mostraron retrasos con 200 Gy (Figura 3A).

En floración y formación del fruto, Sacha y Modificada

fueron más precoces (26.6 y 32 días), mientras que Chiclayo fue el ecotipo tardío (30 y 42 días) (Figura 3A, B) y Colombia tuvo comportamiento intermedio. En cuanto a la irradiación, 100 y 150 Gy promovieron la inducción floral; en cambio, 200 Gy retrasó el proceso de transición fenológico (Figura 3B); en este sentido, Modificada fue más precoz con 150 Gy, mientras que Colombia mostró una respuesta más tardía con 200 Gy, pero mejoró significativamente con 150 Gy (Figura 3B). En cuajado de fruto, Sacha registró un periodo más corto con 150 Gy y Modificada con 100 y 150 Gy; en cambio, Chiclayo tuvo un periodo más largo, alcanzando su punto máximo con 200 Gy (Figura 3C).

La estimulación de la germinación podría deberse a mayor eficiencia fisiológica frente al estrés inducido por la irradiación, como lo sugieren Antúnez-Ocampo *et al.* (2017), quienes reportaron emergencia más rápida en plantas irradiadas, donde dosis moderadas estimularon el vigor vegetativo, a diferencia de las altas, que lo limitaron. La variabilidad observada entre genotipos frente a la radiación (Majeed *et al.*, 2018) subraya la necesidad de identificar combinaciones óptimas; por ejemplo; Llaven-Valencia *et al.* (2025) señalaron que la velocidad de emergencia en ajonjolí (*Sesamun indicum* L.) es favorecida por dosis de 100, 150, 200 y 250 Gy, no así por 600 Gy.

Los resultados obtenidos en floración y formación del fruto indicaron que las diferencias fenológicas están estrechamente ligadas a la genética del material vegetal (Ahloowalia y Maluszynski, 2001; Wani, 2008). En este sentido, Orozco-Balbuena *et al.* (2021) registraron el inicio de la floración entre 26 y 31 días, siendo influido por el genotipo y el manejo nutricional. Por otro lado, Sherpa *et al.* (2022), Marcu *et al.* (2013) y Majeed *et al.* (2018) señalaron que este proceso está asociado con la activación y regulación de fitohormonas (ácido giberélico y auxinas) y con la reparación del ADN (Sherpa *et al.*, 2022). En material

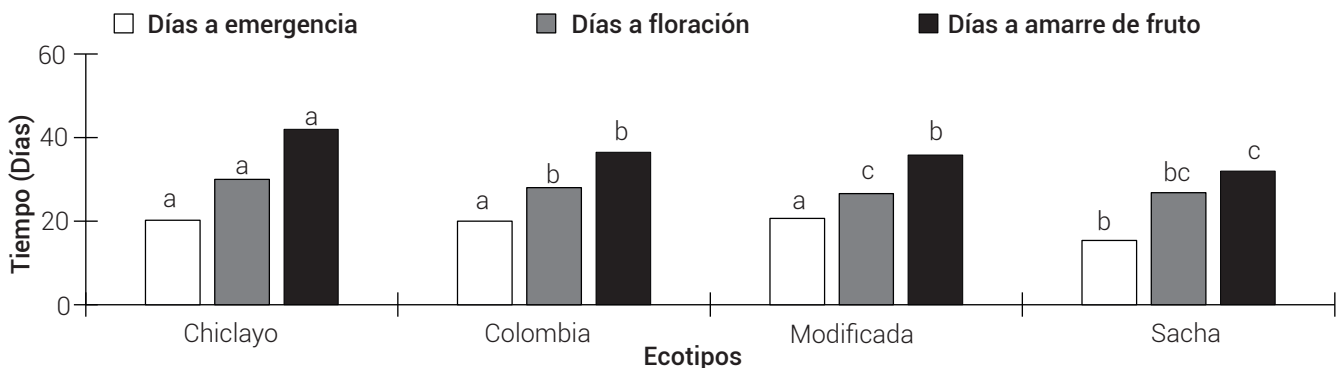


Figura 1. Efecto de ecotipos de *Physalis peruviana* L. sobre días a la emergencia, a la primera flor y al amarre del fruto. Medias con letras iguales son estadísticamente iguales dentro de cada variable (Kruskal-Wallis,  $P \leq 0.05$ ).

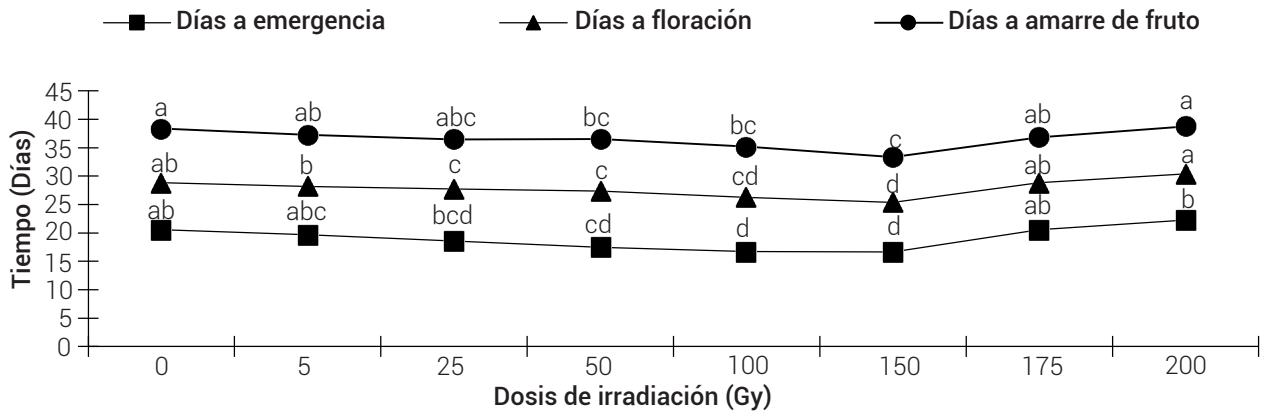


Figura 2. Efecto de dosis de radiación aplicadas a semillas de *Physalis peruviana* L. en días a 50 % de emergencia, a la primera flor y al amarre del fruto. Medias con letras iguales dentro de cada variable son estadísticamente iguales (Kruskal-Wallis,  $P \leq 0.05$ ).

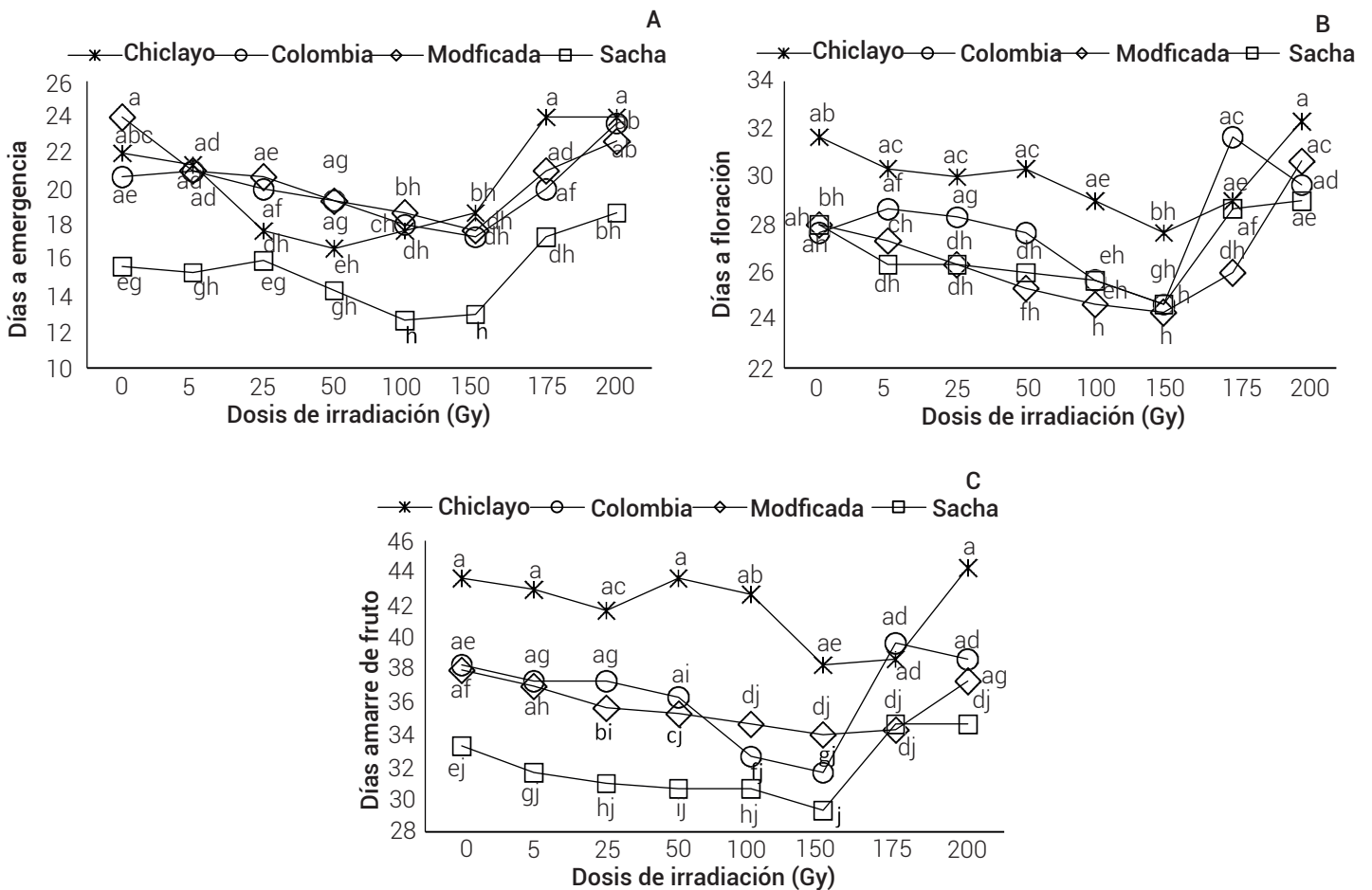


Figura 3. Variables fenológicas en *Physalis peruviana* L. evaluadas en etapa vegetativa y reproductiva: A) días a emergencia de plántula, B) días a floración, C) días al amarre de fruto. Medias con letras iguales son estadísticamente iguales dentro de cada dosis (Kruskal-Wallis,  $P \leq 0.05$ ).

vegetal irradiado con dosis moderadas se ha observado la activación de rutas metabólicas benéficas, en comparación con dosis extremas que desorganizan los procesos celulares. Es importante señalar que, en condiciones normales, el cuajado del fruto ocurre entre 60 y 80 días ddt (Fischer *et al.*, 2024), mientras que, en este estudio, se redujo a menos de la mitad. Este hallazgo destaca el potencial de la mutagénesis para modular la precocidad del cultivo.

**Tamaño del fruto**

El ecotipo Modificada presentó los frutos de mayor tamaño (diámetro polar: 19.3 mm; ecuatorial: 19.19 mm), mientras que los frutos más pequeños se tuvieron con el ecotipo Chiclayo (diámetro polar: 17.74 mm; ecuatorial: 16.81 mm; Figura 4A).

Las dosis de 5 y 175 Gy favorecieron el diámetro ecuatorial del fruto (18.90 y 18.73 mm), mientras que 175 Gy promovió un mayor diámetro polar (19.52 mm) (Figura 4B). En este sentido, el ecotipo Chiclayo presentó su máxima respuesta morfológica a 200 Gy, alcanzando los valores más altos observados para este ecotipo (diámetro polar: 20.24 mm; ecuatorial: 19.6 mm), aunque mostró sensibilidad a 100 Gy. El ecotipo Colombia respondió positivamente a dosis bajas, registrando incrementos con 25 Gy en el diámetro polar (19.69 mm) y con 5 Gy en el ecuatorial (18.86 mm). El ecotipo Modificada evidenció tolerancia a dosis altas (100, 175 y 200 Gy), mientras que Sacha se vio favorecida con dosis intermedias (50 a 100 Gy) (Figura 5).

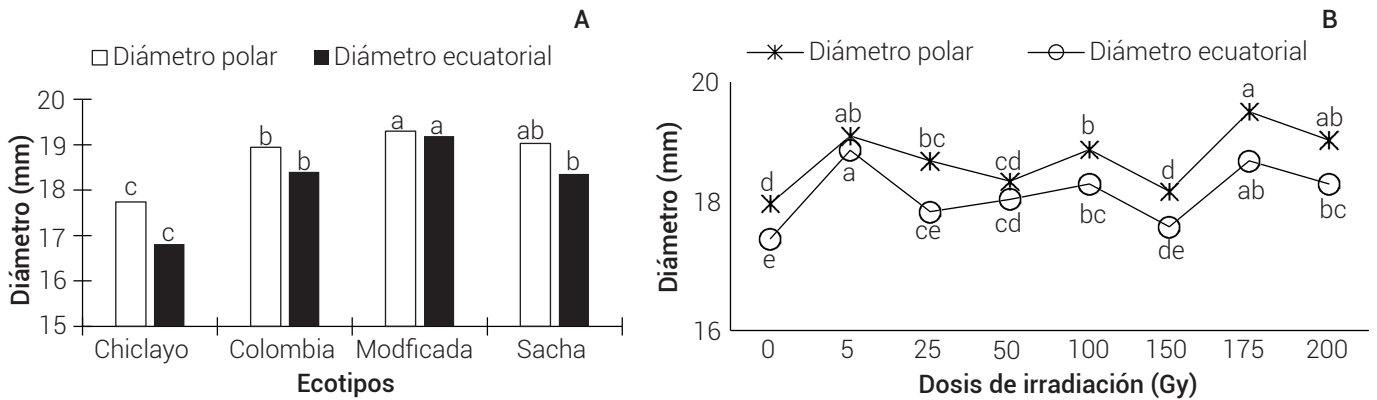


Figura 4. Efecto de la irradiación gamma (<sup>60</sup>Co) en semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el diámetro polar y ecuatorial del fruto: A) efecto de ecotipos y B) efecto de dosis. Medias con letras iguales en cada variable y dosis de irradiación no difieren estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05).

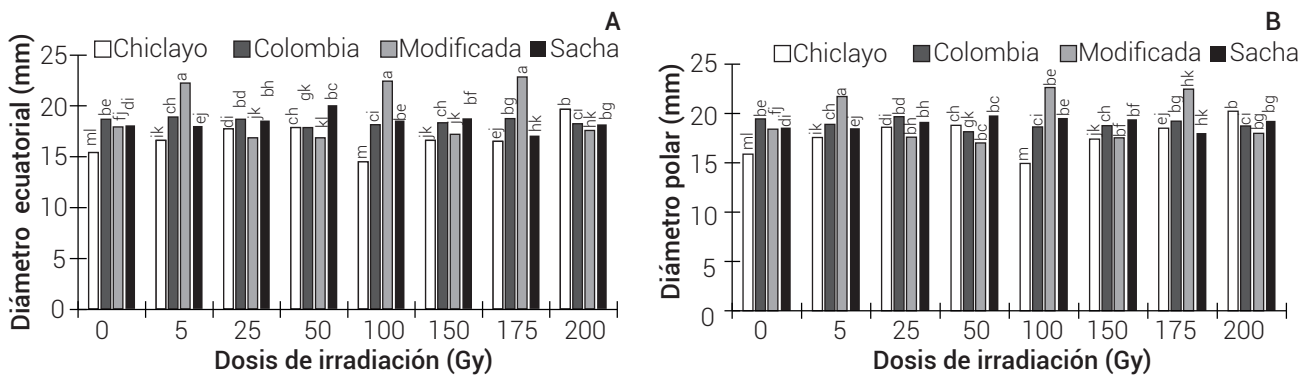


Figura 5. Tamaño de fruto de *Physalis peruviana* para cada condición ecotipo-dosis. A) diámetro ecuatorial, B) diámetro polar. Medias con letras iguales sobre las barras no difieren estadísticamente (Tukey, P ≤ 0.05).

La respuesta observada entre ecotipos puede relacionarse con su capacidad de tolerancia a la radiación, activando mecanismos de mayor eficiencia en la reparación del ADN o activación de rutas fisiológicas asociadas con la expansión celular (Manova y Gruszka, 2015), mientras que el ecotipo con mayor radiosensibilidad presenta menor capacidad para activar mecanismos compensatorios frente al estrés oxidativo (Mendoza-Girón *et al.*, 2026), lo que sugiere una adaptación favorable al estrés inducido (Georgieva y Vassileva, 2023; Roldán-Arjona y Ariza, 2009); sin embargo, este comportamiento no puede mantenerse, ya que la fructificación está marcada por un pico transitorio de especies reactivas de oxígeno (ROS) y cambios en la actividad de enzimas antioxidantes, lo que puede afectar la formación y desarrollo inicial del fruto (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2020; Zandi y Schnug, 2022), ya que algunas variedades solo responden óptimamente en intervalos medios de irradiación (Yadav *et al.*, 2015); por ejemplo, dosis de 1 a 20 Gy activan rutas antioxidantes y hormonales (Katiyar *et al.*, 2022; Smillie *et al.*, 2012).

La relevancia de los resultados es que el éxito de la mutagénesis va depender de la respuesta varietal, ya que una misma dosis puede ser benéfica o perjudicial según el genotipo (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2017). Varias combinaciones superaron el intervalo óptimo de 17 a 19 mm (Figura 5) reportado en uchuva (Antúnez-Ocampo *et al.*, 2020), destacando el potencial del mejoramiento inducido en el incremento de características físicas del fruto.

### Colorimetría

El análisis estadístico de los parámetros L (luminosidad), a\* (rojo-verde) y b\* (amarillo-azul) mostró diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) por efecto de E (ecotipo), D (dosis) y la interacción E  $\times$  D (Figura 6A). En ecotipos, Chiclayo registró los mayores valores de L\* ( $39.9 \pm 0.01$ ) y b\* ( $46.88 \pm 0.26$ ), mientras que Sacha tuvo los más bajos (L\* = 38.6; b\* = 39.6); en cambio, el ecotipo Modificada presentó un valor negativo en a\* ( $-7.99 \pm 5.19$ ), indicando una mayor tonalidad verde (Figura 6B). Estas diferencias confirman una determinación genética sobre el color externo del fruto.

La radiación no alteró el comportamiento del parámetro a\*, aunque se observaron fluctuaciones puntuales con algunas dosis específicas. Respuesta diferente se observó con b\* que aumentó conforme se incrementó la dosis de irradiación, alcanzando el máximo con 200 Gy ( $45.43 \pm 0.37$ ) (Figura 7B). También L\* aumentó ligeramente, con un valor máximo en 100 Gy ( $52.78 \pm 0.01$ ), posiblemente por mayor reflectancia superficial.

La interacción E  $\times$  D mostró patrones específicos; en el caso de L\* el ecotipo Chiclayo aumentó su luminosidad con 100 Gy, mientras que el resto de los ecotipos no mostró tonalidades claras (Figura 7A). En b\*, el incremento fue más notorio en Chiclayo con dosis altas (Figura 7B); Modificada y Sacha presentaron aumentos leves. Aunque a\* no fue afectada significativamente por la dosis, existió cambio hacia el rojo en el ecotipo Sacha con 175 Gy (Figura 7C), lo que sugiere activación pigmentaria diferencial.

Las alteraciones registradas en los parámetros del color de fruto de los ecotipos ante la radiación pueden relacionarse con la intensificación en la síntesis de carotenoides como respuesta al estrés. Tal efecto también ha sido reportado en papaya (*Carica papaya* L.) y guayaba (*Psidium guajava* L.) (Siva-Sena *et al.*, 2016; Zúñiga *et al.*, 2025); no obstante, durante la maduración, el color evoluciona por acumulación de carotenoides y clorofilas (Balaguera-López *et al.*, 2014), lo que explica parte de las variaciones observadas. En el particular del parámetro a\*, su falta de respuesta puede deberse a que no se modifica con dosis bajas, sino con dosis altas, mayores de 500 Gy (Panou *et al.*, 2020).

### Rendimiento en fresco y seco

El peso fresco del fruto fue afectado significativamente por el E, D y la E  $\times$  D en las cinco cosechas realizadas. Los ecotipos más sobresalientes fueron Sacha y Modificada, el primero registró el mayor peso de fruto (745.63 g) en la cosecha 1, mientras que Modificada mantuvo rendimientos estables en las cosechas 2, 3 y 5; en cambio, Chiclayo obtuvo los pesos más bajos, en especial en la cuarta cosecha (434.37 g; Figura 8).

El efecto de la radiación fue más visible con 5 Gy en las cosechas 1 (745 g) y 5 (680 g), seguido de 25 y 50 Gy (608.75 y 596.75 g); en contraste, dosis mayores (175 y 200 Gy) generaron frutos con menor peso (538.37 y 535.12 g) (Figura 9). Se identificaron combinaciones destacadas como el ecotipo Modificada con 5 Gy en la cosecha 1 (910 g) y más de 795 g en las siguientes, y Sacha con dosis intermedias (50-100 Gy), lo que sugiere mayor tolerancia a la irradiación. Por el contrario, Chiclayo presentó bajos rendimientos (< 400 g) con 100 y 200 Gy (Figura 10A), indicando mayor sensibilidad al estrés mutagénico.

Las diferencias obtenidas evidencian el papel determinante del componente genético y de la eficiencia fotosintética en el uso de recursos en la producción de biomasa (Abreu *et al.*, 2006; Singh *et al.*, 2015). Se observó una respuesta hormética (estimulación) a dosis bajas, y efectos negativos a dosis elevadas (Calabrese y Baldwin, 2003; Moussa, 2011; Wi *et al.*, 2007), comportamiento que

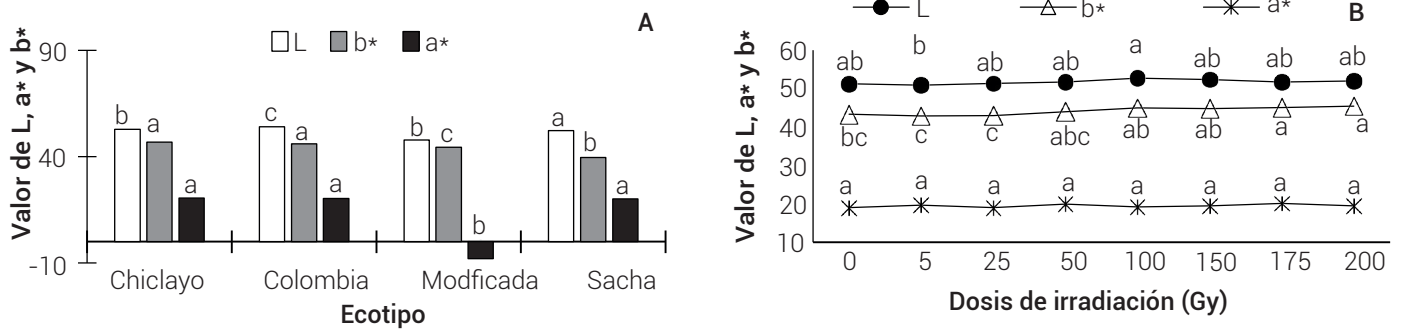


Figura 6. Efecto de A) los ecotipos y B) las dosis de rayos gamma (<sup>60</sup>Co) aplicadas a semillas de *Physalis peruviana* L. sobre las variables de color del fruto (L, a\*, b\*). Valores con letras iguales dentro de cada variable no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

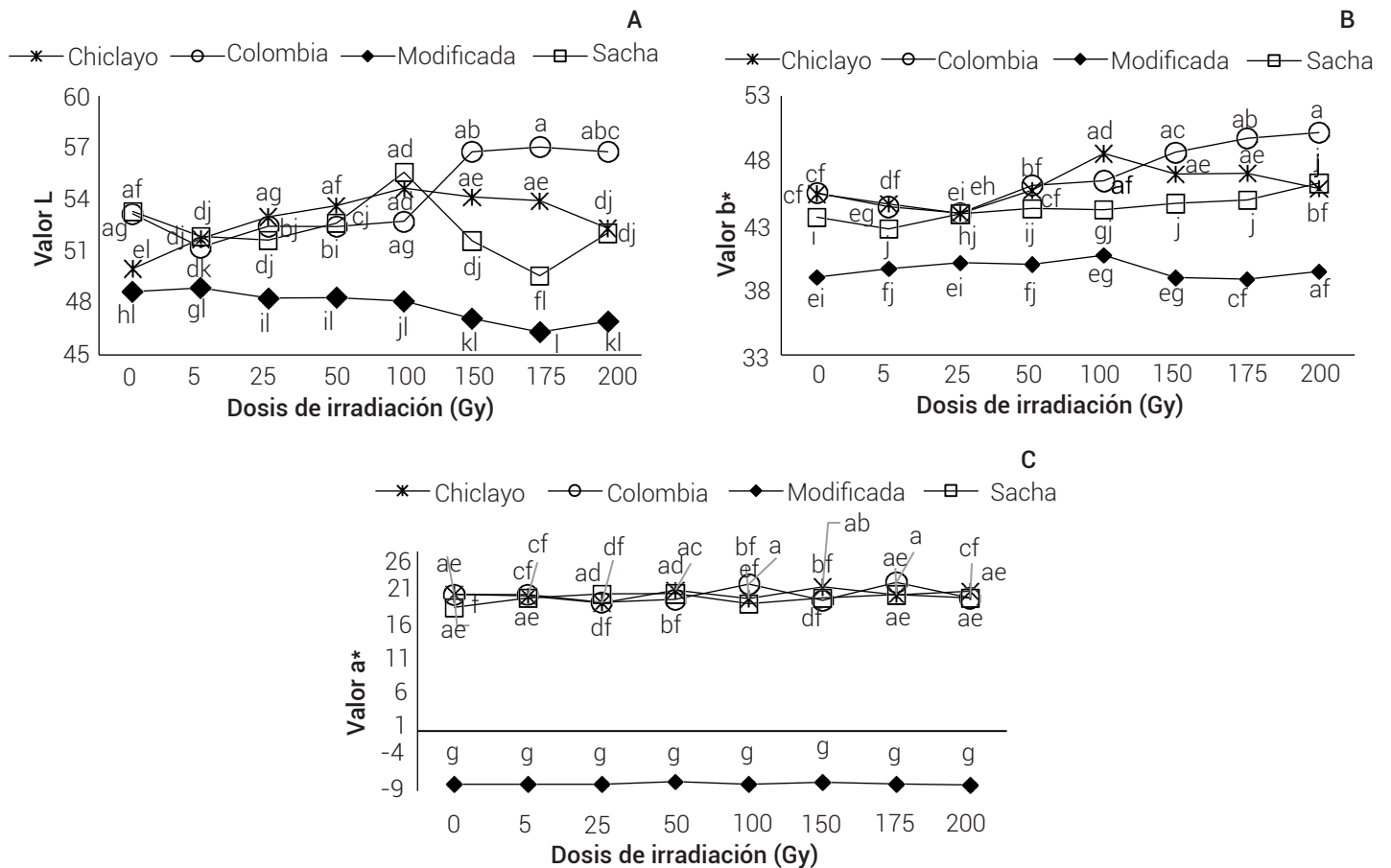


Figura 7. Interacción dosis × ecotipo: A) valor de L, B) valor de b\*, C) valor de a\*. Valores con letras iguales en cada parámetro no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

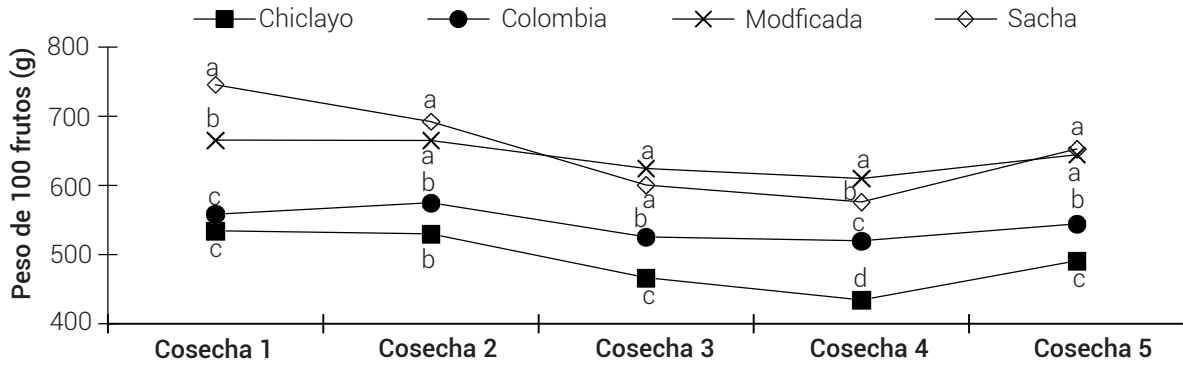


Figura 8. Efecto de ecotipos de *Physalis peruviana* L. sobre el peso de fruto en cosecha diferentes. Medias con letras iguales en cada cosecha no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

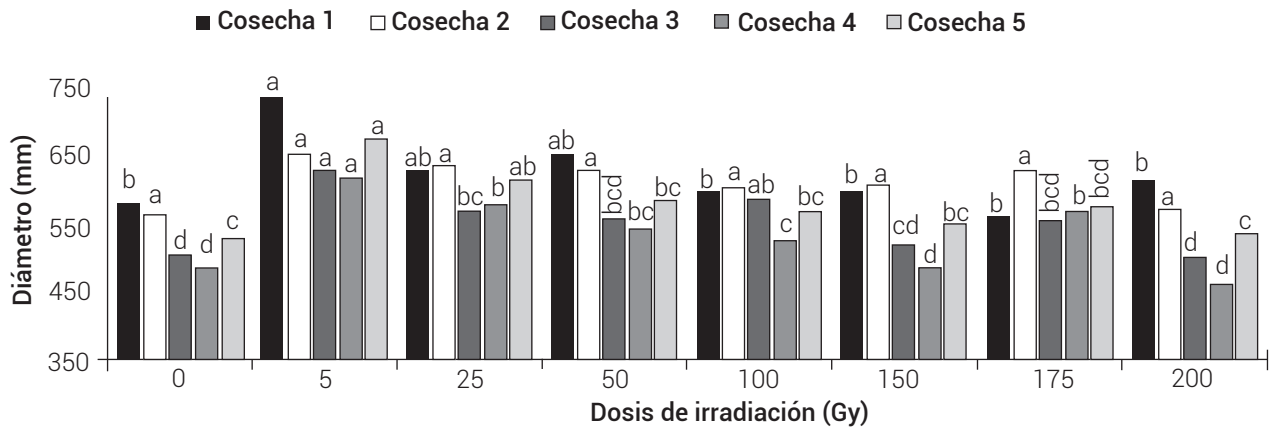


Figura 9. Efecto de dosis de rayos gamma  $^{60}\text{Co}$  en semillas de uchuva sobre el peso del fruto en cosechas diferentes. Medias con letras iguales no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

puede estar asociado con mecanismos antioxidantes y regulación del metabolismo celular (Kim *et al.*, 2021). Al respecto, Antúnez-Ocampo *et al.* (2020) reportaron una respuesta no lineal del peso según la interacción genotipo  $\times$  dosis, registrando frutos con peso de 6.0 a 6.4 g, valores inferiores en más de 30 % a los obtenidos en el presente estudio (9.10 g). Lo anterior concuerda con Jan *et al.* (2012), quienes señalaron que dosis adecuadas de irradiación incrementan significativamente la productividad.

El peso seco (% P.S.) del fruto fue afectado significativamente ( $P \leq 0.05$ ) por el E, D y la  $E \times D$  en las dos cosechas evaluadas, lo que indica que la acumulación de materia seca depende tanto del genotipo como del tratamiento mutagénico. El ecotipo Chiclayo presentó los mayores porcentajes de P.S. en ambas cosechas (17.71 y 17.29 %), superando a los demás ecotipos. Colombia y Modificada mostraron valores intermedios, mientras que Sacha registró los más bajos (13.17 y 12.67 %) (Figura

11A), lo que sugiere que Chiclayo posee mayor eficiencia metabólica o capacidad de deshidratación fisiológica.

El efecto de la dosis mostró un patrón no lineal en esta variable en las dos cosechas, ya que dosis intermedias (25 y 50 Gy) generaron los porcentajes más bajos de P.S., siendo más notorio en la segunda (13.00 y 14.17 %), mientras que dosis altas (175 y 200 Gy) aumentaron significativamente este parámetro, con máximos de 16.67 y 17.42 % (Figura 11B).

La interacción  $E \times D$  evidenció respuestas específicas, mientras que Chiclayo acumuló mayor P.S. con 24.3 % (100 Gy) y 25.0 % (200 Gy) en primera y segunda cosecha (Cuadro 1), Sacha mostró la menor (11.6 % con 50 y 150 Gy), posiblemente por una limitada capacidad antioxidante o reparación del ADN (Kim *et al.*, 2004). Colombia y Modificada tuvieron valores intermedios, destacando Colombia con 19.3 % a 175 Gy en la segunda cosecha

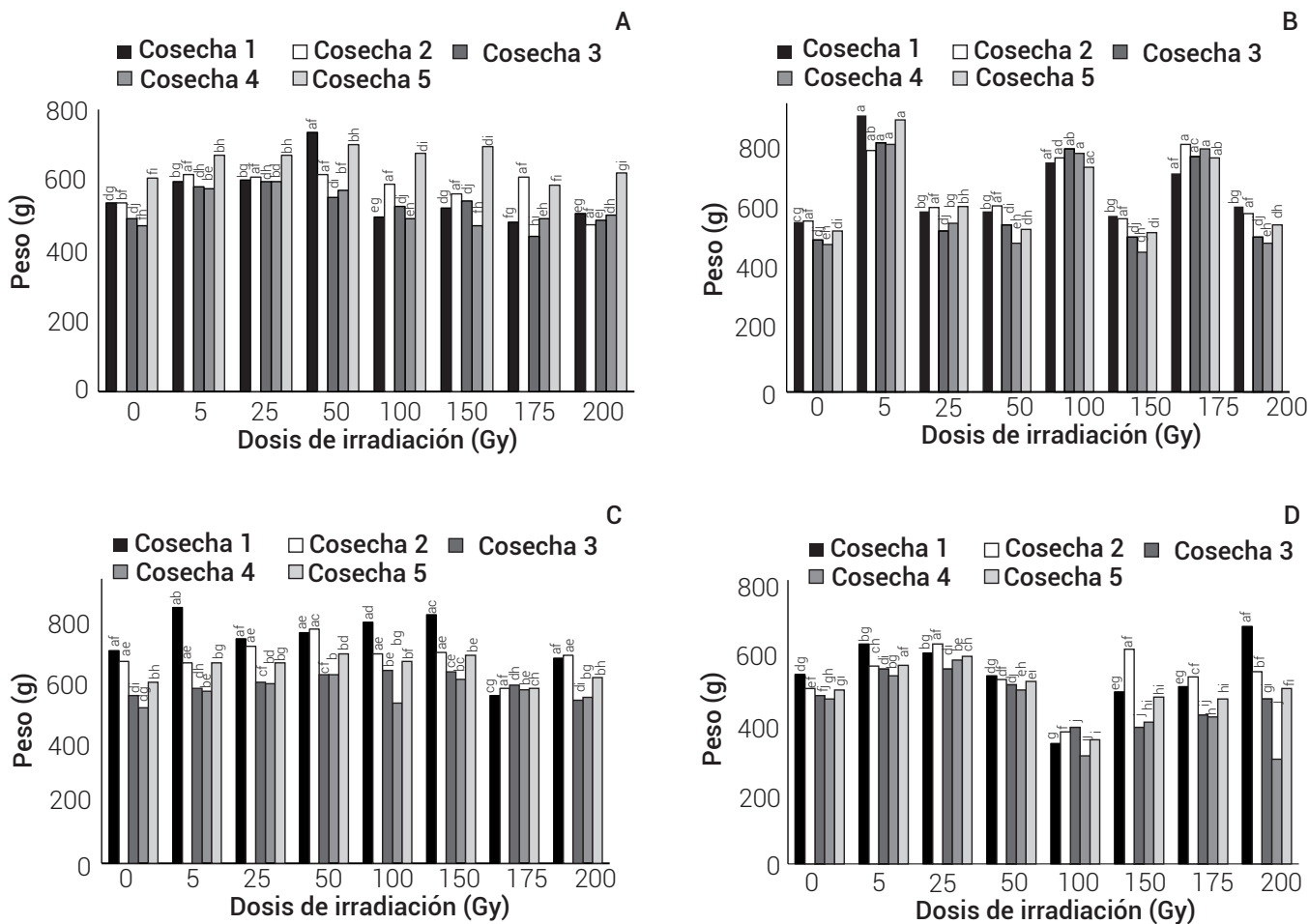


Figura 10. Peso de frutos en 5 cosechas diferentes. A) Chiclayo, B) Colombia, C) Modificada, D) Sacha. Medias con letras iguales en cada dosis no difieren estadísticamente (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

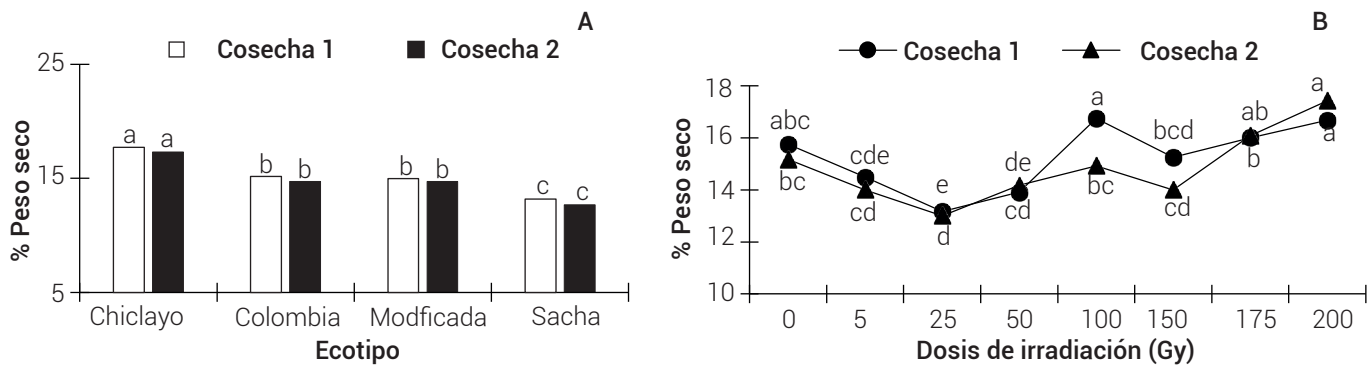


Figura 11. Efecto de A) los ecotipos y B) las dosis de rayos gamma ( $^{60}\text{Co}$ ) aplicadas a semillas de *Physalis peruviana* L. sobre el porcentaje de peso seco de los frutos en dos cosechas. Valores con letras iguales en cada cosecha no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ).

(Cuadro 1), lo que evidencia que ciertos genotipos responden positivamente a condiciones específicas de irradiación (Belykh *et al.*, 2022). Estos resultados refuerzan el valor de la mutagénesis física para mejorar el contenido de materia seca en *P. peruviana*, optimizando la combinación ecotipo-dosis.

**CONCLUSIONES**

La irradiación con <sup>60</sup>Co demostró ser una herramienta eficaz para inducir variabilidad en características fisiológicas de la semilla y planta, y físicas del fruto de *P. peruviana* L. Se observaron efectos diferenciados en las variables evaluadas, lo que confirma la influencia determinante del componente genético y del nivel de estrés mutagénico aplicado. El ecotipo Sacha destacó en precocidad, Modificada por tolerar altas dosis y por su rendimiento y Chiclayo por su acumulación de materia seca. Las dosis intermedias (50-150 Gy) favorecieron la precocidad fenológica y el rendimiento, mientras que dosis más altas (175-200 Gy) promovieron mayor acumulación de sólidos y menor pérdida de agua en algunos genotipos. Los resultados evidencian que la respuesta de *P. peruviana*

a la irradiación gamma depende de la interacción entre el ecotipo y la dosis aplicada, mostrando que cada material genético posee un umbral específico de tolerancia y plasticidad fisiológica. En este contexto, las combinaciones de ecotipos con rangos de dosis óptimos como Sacha con dosis intermedias (100 y 150 Gy), Modificada con dosis altas (175 y 200 Gy) y Chiclayo con niveles superiores (150 a 200 Gy) constituyen un referente útil para el desarrollo de líneas mejoradas, orientadas a optimizar la precocidad, estabilidad productiva y calidad del fruto bajo distintos escenarios agronómicos.

**BIBLIOGRAFÍA**

Abreu F. B., D. J. H. da Silva, B. G. Marim, P. C. S. Carneiro, A. C. P. Juhasz, C. A. C. De Luca, ... and M. A. Guimarães (2006) Minimum number and best combinations of harvests to evaluate accessions of tomato plants from germplasm banks. *Genetics and Molecular Biology* 29:112-116, <https://doi.org/10.1590/S1415-47572006000100021>

Ahloowalia B. S. and M. Maluszynski (2001) Induced mutations: a new paradigm in plant breeding. *Euphytica* 118:167-173, <https://doi.org/10.1023/A:1004162323428>

Antúñez-Ocampo O. M., S. Cruz-Izquierdo, M. Sandoval-Villa, A. Santacruz-Varela, L. E. Mendoza-Onofre, E. de la Cruz-Torres y A. Peña-Lomelí (2017) Variabilidad inducida en caracteres fisiológicos de

**Cuadro 1. Porcentaje de peso seco en dos cosechas distintas de cuatro ecotipos de *P. peruviana*.**

Cosecha	Dosis	Ecotipos			
		Chiclayo	Colombia	Modificada	Sacha
Cosecha 1	0	16.33 cf	17.00 ce	15.33 defg	14.33 efgh
	5	15.67 cf	13.00 fh	16.33 cdef	13 fgh
	25	13.00 fh	13.00 fh	13.67 efgh	13 fgh
	50	15.67 cf	13.00 fh	15.33 defg	11.67 h
	100	24.33 a	15.33 dg	13 fgh	14.33 efgh
	150	16.67 ce	16.00 cf	16.33 cdef	12 gh
	175	18.00 cd	19.00 bc	14 efgh	13 fgh
	200	22.00 ab	15.00 dh	15.67 cdef	14 efgh
Cosecha 2	0	15.33 dh	16.00 df	15.33 defgh	14 efghi
	5	15.67 dg	13.00 fi	14.67 efghi	12.67 ghi
	25	14.00 ei	11.67 i	13.67 efghi	12.67ghi
	50	15.00 dh	13.67 ei	16.33 cde	11.67 i
	100	19.67 b	14.67 ei	13 fghi	12.33 hi
	150	15.67 dg	14.00 ei	14.67 efghi	11.67 i
	175	18.00 bd	19.33 bc	14.33 efghi	12.67 ghi
	200	25.00 a	15.33 dh	15.67 defg	13.67 efghi

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05).

- Physalis peruviana* L. mediante rayos gamma  $^{60}\text{Co}$  aplicados a la semilla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 40:211-218, <https://doi.org/10.35196/rfm.2017.2.211-218>
- Antúnez-Ocampo O. M., S. Cruz-Izquierdo, L. E. Mendoza-Onofre, M. Sandoval-Villa, A. Santacruz-Varela, A. Peña-Lomelí y E. De la Cruz Torres (2020) Peso y caracteres cuantitativos de la calidad en frutos de plantas M, de *Physalis peruviana* L. provenientes de semillas irradiadas con  $^{60}\text{Co}$ . *Agrociencia* 54:691-703, <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i5.2126>
- Añibarro-Ortega M., M. I. Días, J. Petrović, F. Mandim, S. Núñez, M. Soković, ... y J. Pinela (2025) Nutrients, phytochemicals, and *in vitro* biological activities of goldenberry (*Physalis peruviana* L.) fruit and calyx. *Plants* 14:327, <https://doi.org/10.3390/plants14030327>
- Balaguera-López H. E., L. V. Ramírez S. y A. Herrera A. (2014) Fisiología y bioquímica del fruto de uchuva (*Physalis peruviana* L.) durante la maduración y poscosecha. In: *Physalis peruviana: Fruta Andina para el Mundo*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. Madrid, España. pp:113-131.
- Belykh E. S., I. O. Velegzhaninov and E. V. Garmash (2022) Responses of genes of DNA repair, alternative oxidase, and pro-/antioxidant state in *Arabidopsis thaliana* with altered expression of AOX1a to gamma irradiation. *International Journal of Radiation Biology* 98:60-68, <https://doi.org/10.1080/09553002.2022.1998712>
- Calabrese E. J. and L. A. Baldwin (2003) Hormesis: the dose-response revolution. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology* 43:175-197, <https://doi.org/10.1146/annurev.pharmtox.43.100901.140223>
- Desai D. B. and D. C. Joshi (2018) Effect of gamma irradiation on physico-chemical properties and shelf life of tomato (*Solanum lycopersicum* cv Anand tomato-3). *International Journal of Chemical Studies* 6:63-71.
- Fischer G., P. J. Almanza-Merchán y D. Miranda (2014) Importancia y cultivo de la uchuva (*Physalis peruviana* L.). *Revista Brasileira de Fruticultura* 36:1-15, <https://doi.org/10.1590/0100-2945-441/13>
- Fischer G., H. E. Balaguera-López and L. M. Melgarejo (2024) Crop physiology of *Physalis peruviana*. In: *Handbook of Goldenberry (Physalis Peruviana)*. M. F. Ramadan (ed.). Academic Press. San Diego, California, USA. pp:101-119, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15433-1.00010-8>
- Georgieva M. and V. Vassileva (2023) Stress management in plants: examining provisional and unique dose-dependent responses. *International Journal of Molecular Sciences* 24:5105, <https://doi.org/10.3390/ijms24065105>
- HunterLab (2012) HunterLab MiniScan® EZ User Manual. Hunter Associates Laboratory Inc. Reston, Virginia, USA. 70 p. [https://www.hunterlab.com/media/documents/users\\_manual\\_for\\_miniscan\\_ez.pdf](https://www.hunterlab.com/media/documents/users_manual_for_miniscan_ez.pdf) (July 2025).
- Jan S., T. Parween, T. O. Siddiqi and Mahmooduzzafar (2012) Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews* 20:17-39, <https://doi.org/10.1139/a11-021>
- Katiyar P., N. Pandey and S. Keshavkant (2022) Gamma radiation: a potential tool for abiotic stress mitigation and management of agroecosystem. *Plant Stress* 5:100089, <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100089>
- Khalili R., N. Ayoobian, M. Jafarpour and B. Shirani (2017) The effect of gamma irradiation on the properties of cucumber. *Journal of Food Science and Technology* 54:4277-4283, <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2899-7>
- Kim J. H., M. H. Baek, B. Y. Chung, S. G. Wi and J. S. Kim (2004) Alterations in the photosynthetic pigments and antioxidant machineries of red pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings from gamma-irradiated seeds. *Journal of Plant Biology* 47:314-321, <https://doi.org/10.1007/BF03030546>
- Ligarreto G. A., M. Lobo y A. Correa (2005) Recursos genéticos del género *Physalis* en Colombia. In: *Avances en Cultivo, Poscosecha y Exportación de la Uchuva Physalis peruviana en Colombia*. G. Fischer, W. Piedrahita, D. Miranda y J. Romero (eds.). Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. pp:9-27.
- Llaven-Valencia G., F. Castillo-González, A. Santacruz-Varela, E. García-León, S. Cruz-Izquierdo, O. M. Antúnez-Ocampo y A. Hernández-Hernández (2025) Efecto de la radiación gamma en la germinación y supervivencia de plántulas en la variedad de ajonjolí Pachequeño. *Revista Fitotecnia Mexicana* 48:151-161, <https://doi.org/10.35196/rfm.2025.2.151>
- Majeed A., Z. Muhammad, R. Ullah and H. Ali (2018) Gamma irradiation I: effect on germination and general growth characteristics of plants—a review. *Pakistan Journal of Botany* 50:2449-2453.
- Manova V. and D. Gruszka (2015) DNA damage and repair in plants—from models to crops. *Frontiers in Plant Science* 6:885, <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00885>
- Marcu D., G. Damian, C. Cosma and V. Cristea (2013) 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* 39:625-634, <https://doi.org/10.1007/s10867-013-9322-z>
- Mendoza-Girón M. G., F. Castro-Gómez y J. Castro G. (2026) Cape gooseberry (*Physalis peruviana* L.) as a functional food for metabolic health: a narrative review of glucose and lipid regulatory effects. *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 16:041-057, <https://doi.org/10.7324/JAPS.2026.260089>
- Moussa H. R. (2011) Low dose of gamma irradiation enhanced drought tolerance in soybean plants. *Bulgarian Journal of Agricultural Science* 17:63-72.
- Núñez Z. V. M. (2020) La tecnología doble haploide en el mejoramiento genético de frutas exóticas: uchuva, *Physalis peruviana* L., como estudio de caso. *Revista Colombiana de Biotecnología* 22:3-5, <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v22n1.88590>
- Obregón-La Rosa A. J., E. Contreras-López, E. Flores J., U. Gonzales B., A. M. Muñoz y F. Ramos-Escudero (2023) Nutritional and antioxidant profile of the *Physalis* fruit grown in three Andean regions of Peru. *Annals of the National Institute of Hygiene* 74:49-57, <https://doi.org/10.32394/rpzh.2023.0247>
- Orozco-Balbuena D. I., M. Sandoval-Villa, M. N. Rodríguez-Mendoza and O. M. Antúnez-Ocampo (2021) Phenology of four varieties of gooseberry (*Physalis peruviana* L.) in greenhouses and hydroponics for its commercial production in Mexico. *Agro Productividad* 14:3-9, <https://doi.org/10.32854/agrop.v14i3.1747>
- Panizo C. C. A. and Y. T. Higuera (2025) Analysis of the cape gooseberry value chain towards the European market. *Edu-Tech Enterprise* 3:39, <https://doi.org/10.71459/edutech202539>
- Panou A. A., I. K. Karabagias and K. A. Riganakos (2020) Effect of gamma-irradiation on sensory characteristics, physicochemical parameters, and shelf life of strawberries stored under refrigeration. *International Journal of Fruit Science* 20:191-206, <https://doi.org/10.1080/15538362.2019.1608890>
- Pathare P. B., U. L. Opara and F. A. J. Al-Said (2013) Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. *Food and Bioprocess Technology* 6:36-60, <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Rodríguez C. N. C. y M. L. Bueno A. (2006) Estudio de la diversidad citogenética de *Physalis peruviana* L. (Solanaceae). *Acta Biológica Colombiana* 11:75-85.
- Roldán-Arjona T. and R. R. Ariza (2009) Repair and tolerance of oxidative DNA damage in plants. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research* 681:169-179, <https://doi.org/10.1016/j.mrev.2008.07.003>
- SAS Institute (2002) User's Guide of SAS (Statistical Analysis System). SAS Institute Inc. Cary, North Carolina, USA. 550 p.
- Sherpa R., R. Devadas, S. N. Bolbhat, T. D. Nikam and S. Penna (2022) Gamma radiation induced *in-vitro* mutagenesis and isolation of mutants for early flowering and phytomorphological variations in *Dendrobium* 'Emma White'. *Plants* 11:3168, <https://doi.org/10.3390/plants11223168>
- Singh N., C. N. Ram, C. Deo, G. C. Yadav and D. P. Singh (2015) Genetic variability, heritability and genetic advance in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Archives* 15:705-709.
- Smillie I. R. A., K. A. Pyke and E. H. Murchie (2012) Variation in vein density and mesophyll cell architecture in a rice deletion mutant population. *Journal of Experimental Botany* 63:4563-4570, <https://doi.org/10.1093/jxb/ers142>
- Steiner A. A. (1984) The universal nutrient solution. In: *Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture*. International Society for Soilless Culture. Wageningen, The Netherlands. pp:633-650.
- Wani A. A. and M. Anis (2008) Gamma ray-and EMS-induced bold-seeded high-yielding mutants in chickpea (*Cicer arietinum* L.).

- Turkish Journal of Biology* 32:161-166.
- Wi S. G., B. Y. Chung, J. S. Kim, J. H. Kim, M. H. Baek, J. W. Lee and Y. S. Kim (2007) Effects of gamma irradiation on morphological changes and biological responses in plants. *Micron* 38:553-564, <https://doi.org/10.1016/j.micron.2006.11.002>
- Yadav A., B. Singh, D. K. Sharma and S. Ahuja (2015) Effects of gamma irradiation on germination and physiological parameters of maize (*Zea mays*) genotypes. *Indian Journal of Agricultural Sciences* 85:1148-52, <https://doi.org/10.56093/ijas.v85i9.51564>
- Zandi P. and E. Schnug (2022) Reactive oxygen species, antioxidant responses and implications from a microbial modulation perspective. *Biology* 11:155, <https://doi.org/10.3390/biology11020155>
- Zúñiga M. L., K. I. Guacho G., D. Chilán C., D. Guilcamaigua A. y A. Álvarez M. (2025) Efecto de la radiación gamma sobre parámetros fisicoquímicos postcosecha de guayaba (*Psidium guajava* L.). *Perfiles* 1:6-14, <https://doi.org/10.47187/perf.v1i33.310>