

Mutagénesis por radiación gamma para mejora genética de plantas de importancia alimentaria

Eréndira Rubio-Ochoa^{1,2}
Eulogio De la Cruz-Torres³
Víctor Olalde-Portugal⁴
Rosa Elena Pérez-Sánchez⁵
Juan Florencio Gómez-Leyva⁶
Pedro Antonio García-Saucedo^{2,5}

1 Ciencias Biológicas-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas 2290, Emiliano Zapata, Melchor Ocampo, Uruapan, Michoacán. CP. 60170

2 Laboratorio de bromatología-Facultad de Agrobiología 'Presidente Juárez'-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Paseo Lázaro Cárdenas 2290, Emiliano Zapata, Melchor Ocampo, Uruapan, Michoacán. CP. 60170.

3 Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. Carretera Toluca-México s/n, La Marquesa, Estado de México. CP. 52750.

4 Laboratorio de Bioquímica Ecológica-Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Instituto Politécnico Nacional. Libramiento Norte Carretera Irapuato-León km 9.6, Irapuato, Guanajuato. CP. 36824.

5 Facultad de Químico Farmacobiología-Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tzintzuzan 173, Matamoros, Morelia, Michoacán. CP. 58240.

6 TecNM-Instituto Tecnológico de Tlajomulco. Carretera a San Miguel Cuyutlán km 10, Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco. CP. 45640.

Autor para correspondencia: antonio.garcia@umich.mx.

Resumen

La mutagénesis inducida por agentes físicos como la radiación gamma de Co^{60} en células o tejidos vegetales, genera cambios estructurales del ácido desoxirribonucleico e incrementó la variabilidad genética en los cultivos de importancia agrícola. Con frecuencia el material de inicio son especies vegetales establecidas en cultivos *in vitro*, lo que facilita el manejo y control de las condiciones fisicoquímicas además de incrementar el número de repeticiones en un mínimo espacio. Como producto se espera obtener variedades mejoradas con tolerancia a factores bióticos o abióticos además de mejorar las cualidades morfológicas y nutricionales. Esta revisión del estudio del arte recopiló información de los últimos 10 años para brindar un panorama actual del efecto de la radiación gamma sobre tejidos vegetales *in vitro*, abordando desde las fuentes de radiación, tipos de daño y mecanismos de reparación del ácido desoxirribonucleico, además del uso de marcadores moleculares para evidenciar las variaciones a nivel genético. Se analizarán los casos de éxito para cultivos de importancia agroindustrial en México compartiendo las expectativas actuales en el uso de esta tecnología.

Palabras clave:

cultivo de tejidos vegetales, fitomejoramiento, radiación ionizante.

La mutagénesis es una técnica común para mejorar genéticamente cultivos de valor económico, induciendo cambios en la secuencia de DNA (Spencer *et al.*, 2021). La mutagénesis puede ser inducida mediante agentes mutágenos como la radiación gamma (Mba, 2013). La mutagénesis inducida por radiación gamma (MIRG) se ha utilizado en plantas medicinales, ornamentales y frutales para mejorar características como contenido nutricional, vida de anaquel, productividad, calidad y resistencia a enfermedades (Mba, 2013; Udage, 2021). Actualmente, más de 40% de las variedades obtenidas por mutagénesis se han desarrollado a través de MIRG (IAEA, 2022b). Tradicionalmente, el método MIRG fue aplicado en semillas; sin embargo, este proceso podía llevar hasta 9 años obtener resultados, pero en las últimas décadas, se asoció con el cultivo de tejidos vegetales, permitió obtener nuevas variedades en aproximadamente 2 a 3 años (Mba, 2013; Spencer *et al.*, 2021). Este estudio proporciona una visión general de los efectos de la radiación gamma en el mejoramiento de las características nutricionales y fitoquímicas en cultivos *in vitro* de importancia alimenticia.

Efecto de la radiación gamma y reparación del DNA en los tejidos vegetales

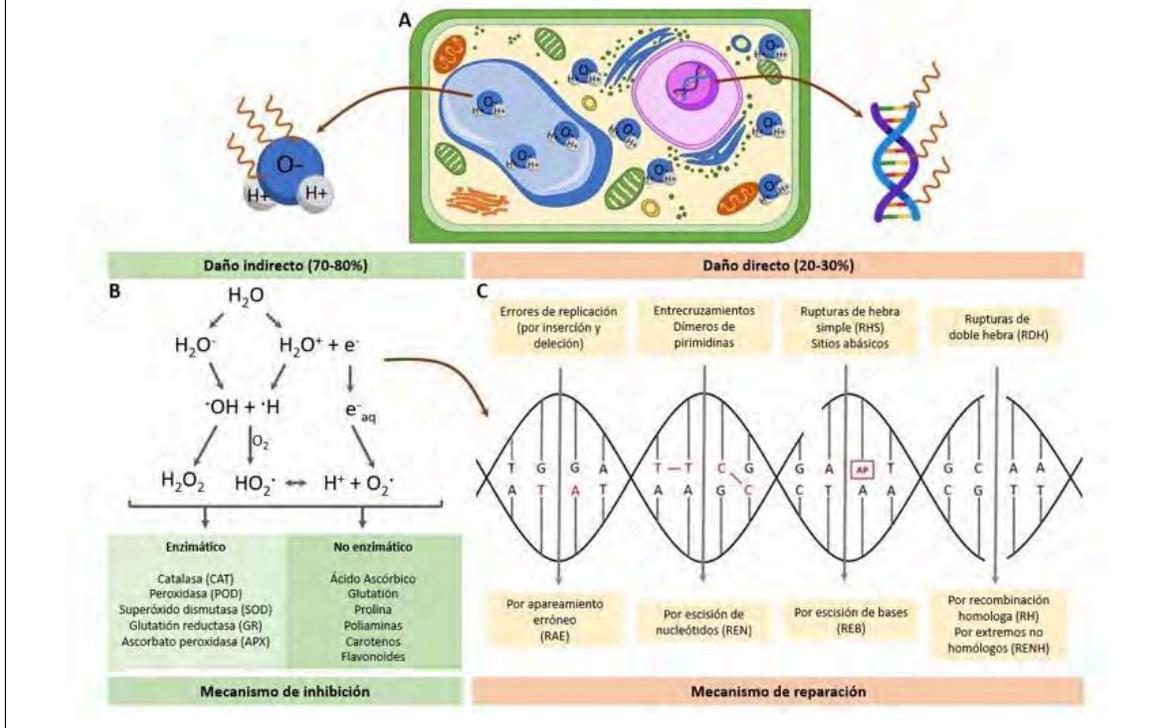
La radiación gamma es emitida por radioisótopos como cobalto-60 (Co^{60}), cesio-137 (Cs^{137}) y en menor medida por plutonio-239 (Pu^{239}) (Mba, 2013; Udage, 2021). Esta radiación consiste en ondas electromagnéticas con longitudes menores a 1×10^{-11} m y niveles energéticos alrededor de 1.36 MeV (Spencer *et al.*, 2021), capaces de ionizar átomos al desplazar los electrones de sus orbitales externos. La ionización de átomos puede provocar diversos efectos en las células (Oladosu *et al.*, 2016).

La radiación ejerce su efecto mediante dos mecanismos: la acción directa (física), que se refleja en el daño de la molécula y la acción indirecta (química) de radicales libre (Figura 1A) (Spencer *et al.*, 2021; Riviello-Flores *et al.*, 2022). La acción indirecta implica la absorción de energía por la molécula de agua, provocando su disociación (radiólisis). Esta absorción conduce a la generación de iones H^+ y radicales libres $\text{H}\cdot$ y $\text{OH}\cdot$, provocando reacciones en cadena que producen especies reactivas de oxígeno secundarias (ERO), como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), superóxido ($\text{O}_2^{\cdot-}$) y ion hidronio (H_3O^+) (Figura 1B) (Szwent, 2015; Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo, 2020).

El daño por radicales libres se concentra en las bases nitrogenadas y los azúcares presentes en DNA, lo que provocan la sustitución de bases, depurinación espontánea generando alteraciones estructurales (Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo, 2020). El daño directo resultante por exposición a la radiación implica cambios estructurales en las bases nitrogenadas del DNA, incluyendo la eliminación de bases (sitios AP), ruptura de puentes de hidrogeno y fracturas de cadena simple y doble (Figura 1C) (Szwent, 2015; Puerta-Ortiz y Morales-Aramburo, 2020). Para contrarrestar estos efectos, las células han desarrollado mecanismos preventivos para proteger y reparar el DNA afectado.



Figura 1. Daños ocasionados por la radiación gamma, principales mecanismos de reparación e inhibición de radicales libres. A) la radiación gamma tiene la capacidad de generar iones, haciéndola capaz de reaccionar directamente con el DNA o con moléculas de agua; B) el daño indirecto sobre el DNA y mecanismos de inhibición de radicales libres; y C) el daño directo sobre el DNA y mecanismos de reparación.



Los mecanismos de reparación incluyen la reparación por escisión de bases (REB), que aborda las roturas de una sola cadena y los sitios AP, así como la reparación por escisión de nucleótidos (REN), los entrecruzamientos o uniones interhebras (Manova y Gruszka, 2015). Además, la reparación de errores de coincidencia (RAE) sirve como el principal mecanismo responsable de corregir los cambios inducidos por inserciones, eliminaciones y bucles de DNA (Tafurt y Marin 2014; Manova y Gruszka, 2015).

En el caso de la ruptura de doble hebra (RDH), puede ser reparada por dos mecanismos: recombinación homóloga (RH) y por extremos no homólogos (RENH) (Kariuki *et al.*, 2019). La RH implica la reparación de extremos rotos del DNA utilizando una secuencia homóloga como plantilla. Por otro lado, la unión de extremos de DNA no homólogo implica la unión directa de las cadenas de DNA rotas sin el requisito de una secuencia homóloga (Tafurt y Marin, 2014; Kariuki *et al.*, 2019). En este sentido, se ha encontrado que la dosis de radiación gamma en plantas se relaciona con la expresión de genes reparadores del DNA, como *pcna* y *fen1* (involucrados en la reparación por escisión de bases y por apareamiento erróneo), *rad51* (asociado a la recombinación homóloga) y *orc1* (envuelto en la replicación del DNA) (Kariuki *et al.*, 2019), lo que sugiere un proceso de reparación más eficaz en tejidos recién formados.

La respuesta al daño celular inducido por iones también implica un aumento de la actividad enzimática de catalasa (CAT), peroxidasa (POD), superóxido dismutasa (SOD), glutatió reductasa (GR) y ascorbato peroxidasa (APX) (Ali *et al.*, 2015; Ludovici *et al.*, 2020). Además, moléculas neutralizantes no enzimáticas, como ácido ascórbico, glutatió, prolina, poliaminas, betalainas, carotenos y flavonoides desempeñan un papel protector contra este tipo de estrés (Demidchik, 2015; Ludovici *et al.*, 2020), lo que ha sido ampliamente documentado en trigo (Hong *et al.*, 2014) y arroz (Kariuki, *et al.*, 2019). Por lo tanto, una mayor acumulación de enzimas neutralizantes y moléculas antioxidantes prevendrían los efectos perjudiciales del estrés oxidativo en los tejidos vegetales e inhibirían los cambios en el DNA provocados por los radicales libres.

Dosimetría y radiosensibilidad en el mejoramiento genético

La eficiencia de obtención de mutantes mediante radiación gamma depende de la determinación de una dosis óptima de radiación. Dado que la frecuencia de las mutaciones está influenciada por la dosis, la tasa de exposición y la tolerancia de los tejidos (Oladosu *et al.*, 2016), la evaluación de la radiosensibilidad y dosimetría en los programas de mejoramiento con agentes mutágenos se vuelve crucial. La dosimetría de radiación determina la cantidad o dosis absorbida por el material biológico, expresada en unidades Gray ($1\text{Gy} = 1\text{ J kg}^{-1} = 100\text{ R}$) (Spencer *et al.*, 2021). La relación que existe entre la dosis absorbida y los efectos deletéreos de los tejidos se evidencian en la reducción de la tasa de germinación, altura de las plántulas, tasa de supervivencia, acumulación de biomasa, entre otros (Mba, 2013).

La evaluación de la radiosensibilidad del material biológico implica determinar una métrica de letalidad al aumentar la dosis de radiación (Oladosu *et al.*, 2016). Esto permite el cálculo de dosis letales que afectan porcentajes específicos (DL_{30} , DL_{40} , DL_{50} y DL_{60}) de la muestra irradiada o que reducen el crecimiento del tejido (GL_{30} , GL_{40} , GL_{50} y GL_{60}) facilitando la identificación de mutaciones en la población sobreviviente (Mba, 2013; Riviello-Flores *et al.*, 2022). La DL_{50} y GL_{50} se emplean como referencia al irradiar poblaciones grandes (mayores a 400 individuos), incrementando la probabilidad de obtener materiales de interés (Penna y Bhagwat, 2023). Sin embargo, persisten cuestionamientos sobre la arbitrariedad de estos valores debido al riesgo de pasar por alto mutaciones deseables que pueden aparecer a dosis bajas de radiación (Mba, 2013).

Por lo que, es importante equilibrar entre las dosis efectivas para generar variaciones en las secuencias de DNA, sin acarrear mutaciones perjudiciales o reducciones considerables en el tamaño de la población. Estudios recientes de radiosensibilidad han demostrado que los tejidos indiferenciados como callos y embriones somáticos son más sensibles a la radiación gamma (12-60 Gy) debido a su alto contenido de agua, en contraste a las semillas (38-184 Gy) o tejidos lignificados como brotes, plántulas, raíces y yemas (23-250 Gy) (Abdelnour-Esquivel *et al.*, 2020; Pérez-Jiménez *et al.*, 2020; Royani *et al.*, 2021; Huerta-Olalde *et al.*, 2022).

Por ejemplo, Royani *et al.* (2021) investigaron en cultivos de añil (*Indigofera zollingeriana*) y encontraron mayor sensibilidad en semillas con una DL_{50} de 184 Gy, mientras que los tejidos más lignificados (plántulas) exhibieron mayor tolerancia (254 Gy). En contraste, Pérez *et al.* (2020) estudiaron plantas de *Citrus* spp. y observaron que las semillas fueron más resistentes a la radiación gamma, con valores de DL_{50} de 127 Gy en Alemow y 156 Gy en naranja agria, comparado con las yemas de los cultivos de limón (DL_{50} de 25-26 Gy). De modo que, la pérdida de explantes y capacidad de regeneración de plántulas depende de la especie, fisiología, genética y etapa de desarrollo durante los procesos MIRG.

Características mejoradas en cultivos *in vitro* expuestos a radiación gamma

Las mutaciones naturales son reconocidas por su capacidad para inducir variabilidad genética con baja frecuencia (10^{-5} y 10^{-8}) en plantas cultivadas (Spencer *et al.*, 2021). Para superar esta limitante, la MIRG emerge como una herramienta valiosa al aumentar la frecuencia de las mutaciones y facilitar la selección de rasgos agronómicos deseables.

El Cuadro 1 ilustra los beneficios de MIRG en la mejora de cultivos. Una de las principales ventajas es la capacidad para inducir mutaciones que incrementen la tolerancia de los cultivos al estrés biótico como enfermedades y abiótico incluyendo estrés hídrico, salino y al frío. Al igual que, aumentar significativamente la productividad y mejorar el contenido nutricional de los cultivos sin comprometer su rendimiento. Esto ofrece el potencial para desarrollar variedades mejoradas con un mayor valor nutricional, abordando las deficiencias nutricionales y mejorando la calidad general de los productos agrícolas.

Cuadro 1. Determinación de DL₅₀ para la obtención de presuntas líneas mutantes *in vitro* en cultivos de valor alimentación en los últimos tres años (2019-2022).

Especie	Tejido	Fuente	Resultados		Autores(as)
			Dosis letal media (DL ₅₀)	Líneas sobre salientes	
* <i>R. fruticosus</i> 'Tupy' (zarzamora)	Brotes	Co ⁶⁰	30.8 Gy	Resistentes a <i>B. cinerea</i>	Huerta-Olalde <i>et al.</i> (2022)
* <i>O. sativa</i> L. (arroz)	Semillas Callo embriogénico	Co ⁶⁰	SD (semilla) 60 Gy (callo)	Tolerancia estrés salino y sorbitol	Abdelnour-Esquivel <i>et al.</i> (2020)
*** <i>A. tequilana</i> cv Azul (agave)	Plántulas	Co ⁶⁰	SD	Incremento en fructosa y sacarosa	Ángeles-Espino <i>et al.</i> (2020)
**** <i>Z. officinale</i> Rosca. (jengibre)	Brotes	Co ⁶⁰	56 Gy	Incremento en gingerol resistentes a <i>F. oxysporum f.sp. zingiberi</i>	Sharma <i>et al.</i> (2020)
*** <i>P. ginseng</i> Mayer (ginseng)	Callo y raíces	Co ⁶⁰	20-75 Gy (Callo) 23.7-52.3 Gy (Raíz)	Incremento en ginsenósidos	Le <i>et al.</i> (2019)
*** <i>V. mungo</i> L. Hepper (frijol negro)	Semillas	Co ⁶⁰	SD	Incremento de azucares reductores, almidón, aminoácidos y proteínas	Yasmin <i>et al.</i> (2019)

SD= sin dato disponible; Gy= grays; * = materiales con tolerancia a estrés biótico y abiótico; ** = materiales con mejoras morfológicas; *** = materiales con mejoras nutrimentales y fitoquímicas.

Tolerancia al estrés abiótico y biótico

El uso de radiación gamma ha demostrado ser efectiva en el desarrollo de plantas *in vitro* con características deseables, como tolerancia al estrés abiótico. En ese sentido, se han generado variedades prometedoras con resistencia al alto contenido de sales (Cuadro 1). Tal es el caso de lo reportado por Abdelnour-Esquivel *et al.* (2020), quienes obtuvieron líneas de arroz (*O. sativa* L.) con mayor resistencia al cloruro de sodio (NaCl) a una concentración de 200 mM.

Estas plantas mutantes mostraron una resistencia 75% mayor al NaCl y dos veces más al contenido de sorbitol (10% p/v) respecto al material de referencia. Del mismo modo, Nikam *et al.* (2015) reportaron resultados positivos en plantas de caña (*Saccharum officinarum* L.) regeneradas a partir de callos irradiados mantenidos en estrés salino (100 mM de NaCl). Ellos identificaron 18 materiales mutantes que exhibieron mayor producción total de caña (25%), caña comercial (12%), grados Brix (6%) y sacarosa (10%), en contraste a su control.

El efecto de MIRC *in vitro* en la generación de plantas resistente a metales pesados no ha sido estudiada de manera exhaustiva. Sin embargo, Qi *et al.* (2015) expusieron semillas de *Arabidopsis thaliana* a diferentes dosis de radiación (0 a 150 Gy), las cuales fueron germinadas *in vitro* en presencia de CdCl₂ y Pb(NO₃)₂. Los resultados mostraron incrementos significativos en el índice de germinación (25 y 32%) y la longitud de raíces (20 y 42%), en plantas expuestas a Cd y Pb.

Además, de aumentos en la actividad enzimática de SOD (50% y 70%), POD (22% y 52%) y CAT (139% y 112%). La exposición de plantas a metales pesados desencadena un desequilibrio en la formación de ERO's, lo que conduce a estrés oxidativo poniendo en riesgo la sobrevivencia del cultivo. Esto conlleva a un aumento de enzimas neutralizantes de radicales libres para mitigar los efectos perjudiciales y preservar la homeostasis celular.

Por otro lado, la MIRG ofrece un enfoque valioso para obtener plantas resistentes a enfermedades, siendo el cultivo *in vitro* una herramienta frecuente durante la selección, ya que permite incluir el propio patógeno, metabolitos, toxinas o filtrados de microorganismos en el medio de cultivo (Penna y Bhagwat, 2023), lo que facilita la identificación y selección de líneas élite (Cuadro 1). Sharma *et al.* (2020) llevaron a cabo un estudio sobre brotes de jengibre (*Zingiber officinale* Rosc.) expuestos a filtrados de cultivo fúngico (FCF) de *Fusarium Oxysporum* f. sp. *zingiberi*. en el cual se logró obtener materiales tolerantes en un 15 y 17.5% de FCF, evaluaciones *in vivo* confirmaron una mejora significativa en la resistencia de estos materiales (46.4 y 52% respectivamente).

Resultados similares fueron publicados por Huerta-Olalde *et al.* (2022), que evaluaron el efecto de los filtrados de micelio de *Botrytis cinérea* en brotes de zarzamora (*Rubus fruticosus* 'Tupy') *in vitro* irradiados con rayos gamma. Ellos identificaron diez líneas que superaron el 50% de supervivencia en términos de tejidos cloróticos y necrosados, solo dos materiales (rfgum5 y rfgum6) con signos de infección como desprendimiento de hojas o crecimiento de micelio, además que no se reportaron cambios fenotípicos durante su multiplicación y desarrollo.

Mejora de la calidad nutricional y fitoquímica

Las variedades elite obtenidas mediante MIRG frecuentemente presentan alteraciones metabólicas, fitoquímicas y nutrimentales. Un ejemplo importante es el estudio realizado por Yasmin *et al.* (2019) en frijol negro (*Vigna mungo* L.) expuesto a 800 Gy de radiación gamma, mostraron aumentos en el contenido de azúcares reductores, almidón, proteínas y aminoácidos en un 26, 32, 28 y 21%, respectivamente. Estos hallazgos sugieren que la MIRG tiene el potencial de ser una herramienta para mejorar el contenido nutricional.

MIRG no solo ha mejorado el contenido nutrimental de cultivos, sino también ha optimizado el contenido fitoquímico, realzando las propiedades bioactivas y proporcionando alimentos de alto valor. Le *et al.* (2019) generaron cuatro líneas mutantes (1G-20-12, 1G-20-16, 1G-20-19 y 1G-20-20) de raíces de ginseng (*P. ginseng* Mayer), con aumentos en el número (hasta cuatro veces), longitud (hasta nueve veces) y peso seco (hasta seis veces). Además del contenido de ginsenósidos como protopanaxatriol y protopanaxadiol que aumentaron de seis a diez veces. Resultados similares fueron reportados por Sharman y Tjarkur (2021), donde los brotes de jengibre (*Z. officinale* rosc.) irradiados mostraron cambios en la acumulación de aceites esenciales, oleorresinas y 6-gingerol en un 56% más en comparación con los no irradiados.

Del mismo modo Ángeles-Espino *et al.* (2020), generaron líneas mutantes de *Agave tequilana* después de dos ciclos de irradiación (0 y 25 Gy). Estas plantas mutantes duplicaron el contenido de glucosa fructosa y sacarosa, así como una mayor acumulación de neokestosa, kestotetrosa y kestopentosa, que son fructooligosacáridos de alto valor en la familia de las Agaváceas.

Evidencias moleculares en evaluación de mutagénesis

El análisis molecular del DNA abarca una variedad de técnicas esenciales para los programas de MIRG, ya que validan la presencia de materiales mutantes y epimutantes entre grupos de materiales irradiados (Riviello-Flores *et al.*, 2022; Bhat *et al.*, 2023). Los marcadores moleculares basados reacción en cadena de la polimerasa (PCR) como SSR e ISSR, son frecuentemente utilizados (Due *et al.*, 2019; Bhat *et al.*, 2023) en los programas de mejoramiento por mutagénesis.

Por ejemplo, los marcadores ISSR han mostrados resultados eficientes para identificar DNA polimórfico en mutantes derivadas de banana (*M. paradisiaca* cv. *sapientum*), trabajo en el cual los autores lograron obtener nueve bandas, ocho de ellas polimórficas. Lo que mostró, un alto nivel de variación genética (90%) y coeficiente de similaridad (47%) entre los materiales con cambios morfológicas destacados y el material de referencia (Due *et al.*, 2019).

En la actualidad han sido desarrollado métodos con marcadores avanzados (SRAP, SCoT, DAiT, QTL) y aplicados con éxito en trabajos de investigación, tal es el caso de El-Fiki *et al.* (2021) al usar diez marcadores SCoT e ISSR en tomate (*L. esculentum* Mill.) identificaron 114 y 101 bandas

respectivamente, donde el porcentaje promedio de bandas polimórficas de los marcadores ISSR fue menor que en contraste a SCoT (40 y 65% respectivamente). Lo que reflejó el promedio del índice marcador más alto para SCoT (0.34) en comparación con los marcadores ISSR (0.15). A pesar de que los valores del contenido de información polimórfica (PIC) en ambas técnicas fueron altamente informativos (0.429 y 0.347), los marcadores SCoT brindaron más información sobre la variación polimórfica detectada.

Si bien cualquier grupo de marcadores moleculares provee información sobre variaciones génicas, su selección es fundamental para alcanzar los objetivos planteados, considerando factores como la secuenciación previa, reproducibilidad, polimorfismo, mecanismo de acción génica, calidad y cantidad de DNA requerida, índice marcador y costo (Nadeem *et al.*, 2018; Bhat *et al.*, 2023). Por lo que, el uso de nuevos marcadores como SCoT, SNP, QTL, SRAP, DArT y RBIP han mostrado mayor control sobre algunos de estos factores (Nadeem *et al.*, 2018; El-Fiki *et al.*, 2021; Bali, 2023; Bhat *et al.*, 2023).

Conclusiones

En conclusión, la mutagénesis inducida por radiación gamma (MIRG) se ha destacado como una herramienta valiosa para el mejoramiento genético de cultivos *in vitro* de plantas con valor alimentario. Si bien ha generado variedades resistentes a enfermedades, tolerantes a sales e incrementos en los metabolitos de interés, hay limitada información sobre la tolerancia al estrés hídrico, temperatura, pH, metales pesados y mejoras nutricionales.

Sumado a que la mayoría de los programas se han centrado en cultivos de rápido crecimiento, dejando al descubierto los cultivos con ciclos más largos (uva, aguacate, guayaba y nopal). Tomando en cuenta los hallazgos de esta revisión, existe una oportunidad prometedora para utilizar MIRG en cultivos establecidos *in vitro* con lento crecimiento, ampliando así los beneficios para la agricultura sostenible y la producción de alimentarios con alto valor.

Bibliografía

- 1 Abdelnour-Esquivel, A.; Pérez, J.; Rojas, M.; Vargas, W. y Gatica-Arias, A. 2020. Use of gamma radiation to induce mutations in rice (*Oryza sativa* L.) and the selection of lines with tolerance to salinity and drought. *In vitro* cellular and developmental biology plant. 56:88-97. <https://doi.org/10.1007/s11627-019-10015-5>.
- 2 Ali, H.; Ghori Z.; Sheikh, S. and Gul, A. 2015. Effects of gamma radiation on crop production. *In: crop production and global environmental issues*. Hakeem, K. Ed. Springer Cham. Switzerland. 27-78 pp.
- 3 Ángeles-Espino, A.; Dimas-Estrada, H. E.; Ramírez-Alvarado, D.; Cruz-Rubio, J. M.; Palmeros-Suárez, P. A. y Gómez-Leyva, J. F. 2020. Caracterización molecular de mutantes de *Agave tequilana* inducidas con radiación gamma Co60 y su efecto en la acumulación de fructooligosacáridos. *Acta Universitaria*. 30:1-11. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2696>.
- 4 Bali, B. K. 2023. Different Types of DNA molecular markers and genotyping applications for mutation breeding. *in biotechnologies and genetics in plant mutation breeding*. Ahmad, Ed. Revolutionizing Plant Biology. 2086-2091 pp. <https://doi.org/10.1201/9781003305088>.
- 5 Bhat, R. S.; Brijesh, M. P.; Tilak, I. S. and Shirasawa, K. P. 2023. Molecular markers for mutant characterization. Ed. *In: mutation breeding for sustainable food production and climate resilience*. Springer Nature. Singapore. 205-232 pp.
- 6 Demidchik, V. 2015. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. *Environmental and Experimental Botany*. 109:212-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.06.021>.

- 7 Due, M. S.; Susilowati, A. and Yunus, A. 2019. The effect of gamma rays irradiation on diversity of *Musa paradisiaca* var. sapientum as revealed by ISSR molecular marker. *Biodiversitas journal of biological diversity*. 20(5):1416-1422. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200534>.
- 8 El-Fiki, A.; Fahmy, E.; Doma, A. A.; Helmy, O.; Adly, M. y El-Metabteb, G. 2021. The genetic variation assessment of *in vitro* irradiated tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) by SCoT and ISSR markers. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. 10(4):557-565. <https://doi.org/10.15414/jmbfs.2021.10.4.557-565>.
- 9 Hong, M. J.; Kim, J. B.; Yoon, Y. H.; Ki, S. H.; Ahn, J. W.; Jeong, I. Y. and Kim, D. S. 2014. The effects of chronic gamma irradiation on oxidative stress response and the expression of anthocyanin biosynthesis-related genes in wheat (*Triticum aestivum*). *International journal of radiation biology*. 90(12):1218-1228. <https://doi.org/10.3109/09553002.2014.934930>.
- 10 Huerta-Olalde, A. M; Hernández-García A.; López-Gómez, R.; Fernández-Pavía, S. P.; Zavala-Páramo, M. G. and Salgado-Garciglia R. 2022. *In vitro* selection of blackberry (*Rubus fruticosus* 'Tupy') plants resistant to *Botrytis cinerea* using gamma ray-irradiated shoot tips. *Plant Biotechnology*. 39(2):165-171. <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.22.0312b>.
- 11 IAEA. 2022b. Organización internacional de energía atómica. Base de datos de variedades mutantes. <https://nucleus.iaea.org/sites/mvd/SitePages/Search.aspx>.
- 12 Kariuki, J.; Horemans, N.; Saenen, E.; Hees, M.; Verhoeven, M.; Nauts, R.; Gompel A. V.; and Cuyper, A. 2019. The responses and recovery after gamma irradiation are highly dependent on leaf age at the time of exposure in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany*. 162:157-167. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.02.020>.
- 13 Le, K. C.; Ho, T. T.; Paek, K. Y. and Park, S. Y. 2019. Low dose gamma radiation increases the biomass and ginsenoside content of callus and adventitious root cultures of wild ginseng (*Panax ginseng* Mayer). *Industrial crops and products*. 130(408):6-24. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.056>.
- 14 Ludovici, G. M.; de Souza, S. O.; Chierici, A.; Cascone, M. G.; Errico, F. and Malizia, A. 2020. Adaptation to ionizing radiation of higher plants: From environmental radioactivity to chernobyl disaster. *Journal of environmental radioactivity*. 222:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106375>.
- 15 Manova, V. and Gruszka, D. 2015. DNA damage and repair in plants from models to crops. *Frontiers in plant science*. 6:1-26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00885>.
- 16 Mba, C. 2013. Induced mutations unleash the potentials of plant genetic resources for food and agriculture. *Agronomy*. 3(1):200-231. <https://doi.org/10.3390/agronomy3010200>.
- 17 Nadeem, M. A.; Nawaz, M. A.; Shahid, M. Q.; Do#anm Y.; Comertpay, G.; Y#ld#z, M.; Hatipo#lu, R.; Ahmad, F.; Alsaleh, A.; Labhane, N.; Özkan, H. and Baloch, F. S. 2018. DNA molecular markers in plant breeding: current status and recent advancements in genomic selection and genome editing. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 32(2):261-285. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1400401>.
- 18 Nikam, A. A.; Devarumath, R. M.; Ahuja, A.; Babu, H.; Shitole, M. G. and Suprasanna, P. 2015. Radiation-induced *in vitro* mutagenesis system for salt tolerance and other agronomic characters in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *The crop journal*. 3(1):46-56. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2014.09.002>.
- 19 Oladosu, Y.; Rafii, M. Y.; Abdullah, N.; Hussin, G.; Ramli, A.; Rahim, H. A.; Miah, G. and Usman, M. 2016. Principle and application of plant mutagenesis in crop improvement: a review. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*. 30(1):1-16. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1087333>.
- 20 Penna, S. and Bhagwat, S. G. 2023. Mutagenesis and selection: reflections on the *in vivo* and *in vitro* approaches for mutant development. Ed. *In: mutation breeding for sustainable*

- food production and climate resilience . Springer nature. Singapore. 99-127 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-9720-3-1>.
- 21 Pérez-Jiménez, M.; Ignacio, T. C. and Pérez-Tornero, O. 2020. Inducing mutations in *Citrus* spp.: Sensitivity of different sources of plant material to gamma radiation. *Applied Radiation and Isotopes*. 157(13):1-10. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.109030>.
 - 22 Puerta-Ortiz, J. A. y Morales-Aramburo, J. 2020. Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes. *Revista Colombiana de Cardiología*. 27(S1):61-71. <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2020.01.005>.
 - 23 Qi, W.; Zhang, L.; Wang, L.; Xu, H.; Jin, Q. and Jiao, Z. 2015. Pretreatment with low-dose gamma irradiation enhances tolerance to the stress of cadmium and lead in *Arabidopsis thaliana* seedlings. *Ecotoxicology and environmental safety*. 115:243-249. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.02.026>
 - 24 Riviello-Flores M. L.; Cadena-Iñiguez, J.; Ruiz-Posadas L. M.; Arévalo-Galarza, M. L.; Castillo-Juárez, I.; Soto-Hernández, M. and Castillo-Martinez, C. R. 2022. Use of gamma radiation for the genetic improvement of underutilized plant varieties. *Plants*. 11(9):1-19. <https://doi.org/10.3390/plants11091161>.
 - 25 Royani, J. I.; Abdullah, L. and Aisyah, S. I. 2021. Radio sensitivity of irradiated seed, plantlets, callus, and in vitro leaves from *Indigofera zollingeriana* Miq by gamma rays. In IOP conference series. *Earth and Environmental Science*. 913(1):1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/913/1/012061>.
 - 26 Sharma, V.; Thakur, M. and Tomar, M. 2020. In vitro selection of gamma irradiated shoots of ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) against *Fusarium oxysporum* f. sp. *zingiberi* and molecular analysis of the resistant plants. *Plant cell, tissue and organ culture (PCTOC)*. 143(2):319-330. <https://doi.org/10.1007/s11240-020-01919-x>.
 - 27 Sharma, V. and Thakur, M. 2021. Gamma irradiations induced morphological and biochemical variations in *in vitro* regenerated ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) an invaluable medicinal spice. *International journal of radiation biology* . 97(12):1696-1704. <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1988179>.
 - 28 Spencer, M. M.; Forster, B. P. y Jankuloski, L. 2021. Manual de mejoramiento por mutación. FAO/OIEA. 3^{ra} Ed. Viena. <https://doi.org/10.4060/i9285es>
 - 29 Szwent, G. A. 2015. Redox chemistry: the essential. Ed. Free radicals in biology and medicine. Oxford university press, USA. 30-77 pp.
 - 30 Tafurt, Y. C. y Marin, M. A. 2014. Principales mecanismos de reparación de daños en la molécula de DNA. *Biosalud*. 13(2):95-110.
 - 31 Udage, A. C. 2021. Introduction to plant mutation breeding: different approaches and mutagenic agents. *The journals of agricultural Sciences sri lanka*. 16(3):466-483. <http://doi.org/10.4038/jas.v16i03.9472>.
 - 32 Yasmin, K.; Arulbalachandran, D.; Soundarya, V. and Vanmathi, S. 2019. Effects of gamma radiation (#) on biochemical and antioxidant properties in black gram (*Vigna mungo* L. Hepper). *International journal of radiation biology* . 95(8):1135-1143. <https://doi.org/10.1080/09553002.2019.1589022>.



Mutagénesis por radiación gamma para mejora genética de plantas de importancia alimentaria

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 April 2024
Date accepted: 01 June 2024
Publication date: 27 August 2024
Publication date: Jul-Aug 2024
Volume: 15
Issue: 5
Electronic Location Identifier: e3747
DOI: 10.29312/remexca.v15i5.3747

Categories

Subject: Ensayo

Palabras claves:

Palabras claves:

cultivo de tejidos vegetales

fitomejoramiento

radiación ionizante

Counts

Figures: 1

Tables: 1

Equations: 0

References: 32

Pages: 0