

EFECTO HORMÉTICO, DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

**PABLO OCTAVIO-AGUILAR, LOURDES G. IGLESIAS-ANDREU,
JERICÓ J. BELLO-BELLO, MAURICIO LUNA-RODRÍGUEZ**

La variabilidad genética es el verdadero potencial evolutivo de las especies: a mayor variación, más escenarios adaptativos para su desarrollo.¹ De esta manera, la diversidad genética —entendida como las diferentes formas de un gen dentro de una población (alelos)—, constituye el material sobre el que actúa la evolución.

1. Lande, R. 1999. "Extinction Risks from Anthropogenic, Ecological, and Genetic Factors". In: Landweber L. A., Dobson, A. P., eds. *Genetic and Extinction of Species*. Princeton, Princeton University Press.

EFFECTO HORMÉTICO DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

La variabilidad genética, sin embargo, no surge de manera espontánea. A lo largo del tiempo las frecuencias alélicas cambian: se homogeneizan, debido a las cruces entre organismos emparentados (endogamia), o se pierden a través de la selección natural; ingresan nuevos genes provenientes de otras poblaciones (flujo génico) o simplemente, ocurre una pérdida aleatoria de información genética (deriva génica);² pero, sólo si existe una fuerza evolutiva capaz de generar nueva variación dentro de las especies: la mutación.

MUTACIÓN

La mayoría de los jóvenes están familiarizados con los efectos de las mutaciones basadas en lo que nos muestra el cine sobre algunos personajes de ficción, como los *X-men* o el *Hombre araña*. Pero, ¿qué es exactamente una mutación? Pues es la alteración en la secuencia de ADN de una célula, lo que implica, desde el cambio, pérdida o inserción de un solo par de bases nitrogenadas (adenina, guanina, timina, citocina), hasta la ganancia o pérdida de cromosomas enteros o parte de ellos. Dichas alteraciones pueden ser causadas por agentes químicos, radiación o por errores ocurridos durante los procesos naturales que ocurren dentro de las

>> **Hombre Araña**
<http://k39.kn3.net/taringa/3/0/4/3/8/2/5/dexterdark/E43.jpg?9299>



Dentro del genoma, las principales mutaciones inducidas por la radiación ionizante son: la pérdida o el cambio de bases nitrogenadas y la interrupción de las cadenas de ADN



células cada vez que se dividen.³ La exposición a estos agentes promotores de la mutación (mutagénicos) ocurre de manera natural, cuando recibimos directamente los rayos solares y también, al fumar, comer ciertos alimentos o laborar con agentes químicos como fertilizantes y pesticidas. El grado en que estos mutagénicos nos afectan puede ser evaluado con base en la proporción de mutaciones que ocurren en un grupo de células aisladas; es decir, aberraciones en su estructura o detección directa por marcadores moleculares.

Para que una mutación se fije en una población, ésta deberá mejorar las expectativas de supervivencia o de reproducción del portador, así como hacer factible la transferencia a sus descendientes. Lo anterior raramente sucede, pues la mayoría de las mutaciones ocurren con una frecuencia muy baja, dependiendo de la magnitud y el mecanismo implicado en ellas; por ejemplo, el síndrome de Down podría ser considerado como una mutación de gran magnitud, al afectar un cromosoma completo, cuyo mecanismo de aparición es una falla durante la meiosis; en el otro extremo, se podría mencionar la anemia falciforme, situación en la que la mutación afecta solamente a un aminoácido dentro de la hemoglobina y el mecanismo implicado es el cambio en una base nitrogenada.

Además, las mutaciones, en general, disminuyen la supervivencia y reproducción (adecuación) de los portadores y la mayoría de ellas son recesivas; es decir, para que se manifiesten, es requisito que, físicamente, los alelos de ambos progenitores estén mutados.⁴ Por otro lado, la mayoría de las células de un organismo son somáticas, es decir, que conforman la estructura de los organismos y no están implicadas en la reproducción (como las células gaméticas), por

>> **Explosión de Rayos Gamma**
<http://www.eluniversohoy.com/wp-content/uploads/2013/04/grb3.jpg>

lo que los efectos de las mutaciones comunes y espontáneas desaparecen en la siguiente generación, aunque sus efectos pueden ser devastadores para el individuo, por ejemplo: el cáncer. Esto es una verdadera lástima para quienes imaginan que es factible la existencia de los superhombres de los cuentos, ya que los mutantes, normalmente, no son capaces de transferir sus mutaciones a su progenie.

Queda planteado, entonces, que las mutaciones pueden matar al portador y, si no lo matan, en la mayoría de los casos, al menos lo vuelven más susceptible a sufrir padecimientos como el cáncer y, por si fuera poco, la mayoría de las mutaciones espontáneas que aparecen en la naturaleza tampoco son heredables.

No obstante las obvias desventajas de la mutación, ocasionalmente, surge una nueva variación genética heredable surgida a partir de una o múltiples mutaciones, que posibilitan la capacidad de responder positivamente a las exigencias del ambiente, por lo que es rápidamente seleccionada a favor, pasando así a formar parte del bagaje genético de la especie.⁵

Partiendo de esta idea —y hablando de agricultura o ganadería, por ejemplo—, es posible usar la mutación como un medio para obtener nuevas variedades capaces de responder a las necesidades del criador en cuestión, sobre todo en aquellas especies en las cuales los procesos evolutivos, como la endogamia (cruzas entre individuos emparentados) o el aislamiento genético —casi siempre debido a la fragmentación del hábitat— han mermado la diversidad, o en aquellas especies de interés comercial que no se adaptan fácilmente a condiciones de producción específicas.

Hoy, el mejorador de plantas es capaz de generar nuevos atributos a partir de la variación ya existente, para ello cuenta con diferentes herramientas como la mutagénesis, el cultivo *in vitro*, indicadores de variabilidad genética basados en secuencias de ADN (marcadores moleculares) y la selección artificial (cruzas dirigidas).⁶

Es importante hacer notar que las mutaciones adaptativas —que, necesariamente deben pasar a la siguiente generación e incidir directamente sobre las células sexuales— no son las únicas con valor para el mejorador. Gracias al cultivo *in vitro*, las variaciones somáticas pueden seleccionarse a partir de los tejidos que han recibido el tratamiento necesario para la mutagénesis, la cual puede ocurrir a partir de la exposición a radiación, o a químicos que favorezcan mutaciones del tejido vegetal e, incluso, la adaptación a condiciones ambientales adversas; la variación surgida de mutagénesis es llamada somaclonal.

LA RADIACIÓN

Recuerdo que en los años setentas, antes de que Peter Parker fuera mordido por una araña genéticamente modificada, se decía que la araña había sido irradiada con rayos gamma. Lo mismo sucedió con Bruce Banner, quien había sido expuesto accidentalmente al mismo tipo de radiación ionizante, convirtiéndose en el increíble Hulk.

Uno de los procesos mutagénicos más importantes, en la actualidad, para crear variabilidad genética que no existe en la naturaleza, es la radiación ionizante (rayos gamma, rayos X, etc.),^{6,7} la cual puede ser medida en Roentgens (R) —una unidad de exposición a la radiación, cuya magnitud es denominada dosis de radiación—. También se utiliza el Gray (Gy) —unidad que mide la absorción de la radiación, por parte de un material, medida en Joules por kilogramo (J/kg)—. En este sentido, el Roentgens mide la cantidad de radiación enviada y, el Gray, la cantidad de dicha radiación que es absorbida.

>> Hulk

<http://3.bp.blogspot.com/9pd707MMWkl/T6a4nVrFWyl/AAAAAAAAG7s/bYtmm6mVLM/s1600/Hulk%2B2.jpg>



Dosis bajas de radiación ionizante podrían mejorar los cultivos, al incrementar la producción, disminuir el tiempo de germinación, acelerar el crecimiento y generar nuevas variedades de interés en algunas especies vegetales



>> Campos de Trigo
http://campo.cienradios.com.ar/files/2013/01/12_trigo.jpg

Dentro del genoma, las principales mutaciones inducidas por la radiación ionizante son la pérdida o el cambio de bases nitrogenadas y la disrupción de las cadenas de ADN.

La pérdida o sustitución de bases se produce, principalmente, por la hidroxilación de la timina, a partir de lo cual se forman dímeros (unión de dos bases) de esta base nitrogenada. Al alterarse la secuencia de las bases, se modifica la información genética, dando lugar a una mutación puntual que, a diferencia de las mutaciones cromosómicas (pérdida o ganancia de cromosomas enteros), afecta a una sola base dentro del genoma completo. La ruptura simple consiste en el rompimiento de una de las cadenas de la doble hélice, mientras que la ruptura doble implica la disrupción de ambas cadenas de ADN, lo cual provoca la activación de los mecanismos de reparación intrínsecos de la célula capaces de introducir nuevas secuencias —dependiendo de la magnitud de la ruptura o de la pérdida de secciones de ADN—. La proporción y magnitud de estos cambios obedecen, básicamente, a la cantidad y calidad de la radiación. Con la emisión que, supuestamente, recibió Hulk, hubiera muerto antes de ser mutado adaptativamente.

Por lo anterior, en la literatura abundan los trabajos relacionados con la determinación de las dosis de radiación que se debe aplicar en los procesos de mejoramiento genético, para evitar la presencia de efectos adversos sobre los tejidos o en las variables agronómicas de interés.

Como resultado, se ha logrado definir los intervalos de radiaciones gamma útiles para muchas especies cultivadas, al determinar la radiosensibilidad de los tejidos por la exposición a diferentes intensidades de radiación, encontrando así los límites entre la hormesis y el daño tisular.^{8, 9, 10}

LA HORMESIS

La palabra hormesis proviene del griego *hormaein*: 'estimular'; el prefijo *horm* también se usa en la palabra hormona y se refiere a la excitación o estimulación aplicada, en pequeñas dosis de cualquier agente, a cualquier sistema. Hablando de radiación ionizante, una dosis baja es definida como cualquier dosis entre los niveles de radiación ambientales y el umbral que marca el límite entre los efectos biológicos positivos y negativos.¹¹

Resultados estadísticamente significativos, obtenidos en microorganismos, plantas, invertebrados y animales de experimentación, han demostrado la existencia de un metabolismo radiogénico; es decir, uno promovido por la radiación ionizante. Dosis bajas de irradiación promueven el aumento en la respiración celular, activación enzimática, elevación en los umbrales de dosis letales a la radiación, incremento en la producción de estructuras reproductivas, mayor crecimiento, maduración temprana, desarrollo acelerado, resistencia a enfermedades y aumento en el promedio de la vida útil de los organismos irradiados.^{12, 13} Con estas evidencias, la existencia de superplantas no suena tan descabellada.

Las mutaciones inducidas por radiaciones ionizantes se han utilizado en el mejoramiento de trigo, arroz, cebada, algodón, cacahuete, manzanas y frijol; todos ellos, cultivos propagados por semillas, aunque a últimas fechas hay muchas variedades inducidas a partir de cultivos de tejidos, como caña de azúcar, plátano y cítricos.

Desde la creación del comité mixto FAO/OIEA de técnicas nucleares en la agricultura, en la década de los sesentas, más de 2,500 cultivares obtenidos —ya sea como mutantes, de manera directa o derivada, de sus cruces— han sido lanzados a nivel mundial, en más de 50 países.¹⁴

EJEMPLOS DE APLICACIÓN

El uso de radiaciones ionizantes para estimular rasgos agronómicos de interés no es nuevo. Sangwan y Singh,¹⁵ utilizando rayos gamma provenientes de una fuente de Co^{60} (Cobalto radiactivo), sobre nueve variedades de frijol verde (*Vigna radiata* L. Wilcrek), lograron inducir mutaciones útiles relacionadas con caracteres cuantitativos de importancia agronómica, como la producción de vainas y la concentración de metionina y triptófano, en las semillas (aminoácidos con importancia nutritiva). En este caso, cualquier dosis menor a 40 kR (kiloRoetgens) fue insuficiente para producir cambios significativos en los rasgos evaluados. Las dosis más efectivas fueron 50 y 70 kR, es decir: las radiaciones ionizantes, a partir de rayos gamma sobre semillas de *V. radiata*, incrementan la productividad de las plantas y la calidad de las semillas de manera significativa. Podemos observar aquí el establecimiento de un rango de hormesis para esta especie, destacando la importancia del periodo de desarrollo en el que se inicia el proceso mutagénico.

No tendremos el mismo efecto al irradiar una planta adulta que al irradiar una semilla o un callo en cultivo *in vitro*. La principal diferencia radica en la mitosis que dará lugar a la formación de nuevos tejidos (organogénesis), a partir del tejido irradiado; es decir, la irradiación temprana garantiza que el organismo presente los rasgos mutagénicos de interés, mientras que la irradiación tardía puede tener efectos adversos sobre el tejido y establecer células con diferente información genética en el mismo individuo, fenómeno conocido como *mosaicismo*.



EFECTO HORMÉTICO DE LA RADIACIÓN IONIZANTE

Otro ejemplo en el que se establece el límite entre los efectos positivos y negativos de la radiación ionizante —pero, en este caso, usando callos de caña de azúcar (*Saccharum* sp.)— fue el realizado por *Fuchs et al.*¹⁶ La radiación, en dosis menores a 2 kR, no cambia la capacidad de diferenciación del callo, en cambio, dosis mayores son capaces de eliminar toda posibilidad de organogénesis en los cultivos *in vitro*. En este caso, el umbral hormético es mucho menor (2 a 4 kR) que el aplicado en semillas de otras especies (4 a 20 kR).^{7, 17, 18}

Con estos dos ejemplos podemos observar que la naturaleza del tejido a irradiar también cambia el umbral de hormesis. Estudios anteriores sobre la dosis efectiva de rayos gamma indican que ésta depende tanto del material utilizado como de los rasgos a investigar.^{15, 19} En el caso de cultivos *in vitro*, el rango de radiación utilizado varía entre 0.1 y 2 kR (2 a 5 Gy), mientras que para semillas, varía de 0.4 a 70 kR (60 a 700 Gy), dependiendo de la cantidad de agua en el tejido, el tipo de tejido y el tiempo de almacenaje posterior a la radiación, si se aplica menor radiación a mayor tiempo de almacenamiento del tejido.⁶

Una vez establecidos los parámetros del umbral hormético, es importante comprobar que la variación obtenida por radiación deriva en la adecuación de las especies y en el mejoramiento agronómico. Por ejemplo, en el pino del Paraná, también conocido como pino de Brasil (*Araucaria angustifolia*), al irradiar semillas con dosis bajas de rayos gamma (0.1 a 0.4 kR), se logró incrementar el crecimiento de las plántulas, sin afectar la tasa de germinación; parámetro muy importante en las estrategias de conservación de esta especie.²⁰



>> Pino de Brasil

http://1.bp.blogspot.com/-0f3HZmDuLCY/T0rjnM81Ahl/AAAAAAAAACvM/jlDy4t_e05A/s1600/100_0225.jpg



>> Crisantemo

[http://3.bp.blogspot.com/-Hhupqmd1qAk/UGFm96HfZfI/AAAAAAAAAKs/a2BB7nZTRe8/s1600/simbolo+del+sol,+crisantermo+\(5\).jpg](http://3.bp.blogspot.com/-Hhupqmd1qAk/UGFm96HfZfI/AAAAAAAAAKs/a2BB7nZTRe8/s1600/simbolo+del+sol,+crisantermo+(5).jpg)

El uso controlado de la radiación ionizante constituye una herramienta útil para el mejoramiento genético de especies vegetales, dejando de lado un poco las ideas satanizadas que se tiene acerca de la energía nuclear y sus efectos sobre los seres vivos

De igual manera, Ramírez-Calderón, *et al.*¹⁷ obtuvieron por irradiación de semillas de triticale —híbrido de trigo y centeno—, variantes con mayor tamaño y más cantidad de granos por planta, al reducir el periodo de cultivo; además de obtener plantas más robustas, altas y productivas. Estos rasgos fueron seleccionados a lo largo de ocho generaciones, logrando conservar la producción, por lo que la variación inducida por dosis de radiación entre 12 y 20 kR resultó ser adaptativa para este cultivo.

Por otro lado, no sólo podemos mejorar rasgos de interés agronómico como la producción y el tamaño, sino —como ya mencionamos anteriormente—, generar nueva variación que no existía en las formas naturales, con lo cual se acelera el proceso evolutivo. Por ejemplo, Delgado²¹ indujo variantes de color bayo y blanco a partir de frijol negro, irradiando con rayos gamma, en dosis de 1 a 4 kR.²² También, al irradiar brotes de crisantemo (*Dendranthema grandiflora* (Ram.) Tzvelev), cultivados *in vitro*, se logró obtener mutantes de color cobrizo que, además, tenían una supervivencia mayor con respecto a los controles no irradiados, después de transferir los explantes (plantas cultivadas) al suelo. En este caso, el umbral hormético de irradiación fue de 0.5 a 1.5 kR.

Con todos estos ejemplos, podemos decir que: dosis bajas de radiación ionizante podrían mejorar los cultivos al incrementar la producción, disminuir el tiempo de germinación, acelerar el crecimiento y generar nuevas variedades de interés en algunas especies vegetales. Sin embargo, para lograr estos resultados, es importante establecer el umbral hormético específico de la especie, lo cual dependerá, sobre todo, del tipo de tejido que se irradie. De esta forma, el uso controlado de la radiación ionizante constituye una herramienta útil para el mejoramiento genético de especies vegetales, dejando de lado un poco las ideas satanizantes que se tiene acerca de la energía nuclear y sus efectos sobre los seres vivos.🌐

REFERENCIAS

1. Lande, R. 1999. "Extinction Risks from Anthropogenic, Ecological, and Genetic Factors". In: Landweber L. A., Dobson, A. P., eds. *Genetic and Extinction of Species*. Princeton, Princeton University Press.
2. Hartl, D. L., A. G. Clark 1997. *Principles of Population Genetics*, 3rd edn. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
3. Friedberg, E. C, Walker G. C., Siede, W. 1995. *DNA Repair and Mutagenesis*. Washington, DC: ASM Press.
4. Nei, M. 2007. "The New Mutation Theory of Phenotypic Evolution". *Proceedings of the National Academic of Science*, 104(30): 12235–12242.
5. Hedrick, P. W. 2000. *Genetics of Populations*, 2nd edn. Sudbury, MA: Jones and Bartlett Publishers.
6. Ahloowalia, B. S., M. Maluszynski. 2001. "Induced mutations – A new Paradigm in Plant Breeding". *Euphytica* 118: 167–173.
7. Lemus, Y., J. Méndez-Natera, J. Cedeño, V. Otahola-Gómez. 2002. "Radiosensibilidad de dos genotipos de frijol (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) a radiaciones gamma". *Revista UDO Agrícola* 2: 22–28.
8. Castillo, J., A. Estévez, M. E. González, E. Castillo, M. Romero. 1997. "Radiosensibilidad de dos variedades de papa a los rayos gamma de 60Co". *Cultivos Tropicales* 18(1): 62–65.
9. Fuentes, J. L., L. Santiago, Y. Valdés, M. Guerra, I. M. Ramírez, E. F. Prieto, N. N. Rodríguez, B. Velázquez. 2004. "Mutation induction in zygotic embryos of avocado (*Persea americana* Mill)". *Biotechnología Aplicada* 21:82–84.

10. Ramírez, R. L., M. González, Y. Camejo, N. Zaldivar, Y. Fernández. 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.
11. Luckey, T. D. 2003. "Radiation Hormesis Overview". *RSO Magazine* 8(4): 22-41.
12. Luckey, T. D. 1980. *Hormesis with Ionizing Radiation*. CRC Press, Boca Raton.
13. Luckey, T. D. 1998. "Hormesis Revisited". *RSO Magazine* 3:20-21.
14. Shu, Q. Y, P. J. L. Lagoda. 2007. "Mutation techniques for gene discovery and crop improvement". *Molecular Plant Breeding* 5:193-195.
15. Sangwan, H. P. S., R. K. Singh. 1977. "Pattern of gamma ray-induced polygenic variability in Mung (*Vigna radiata* (L) Wilcrek)". *Journal of Genetics* 63(2): 83-88.
16. Fuchs, M., V. González, S. Castroni, E. Díaz, L. Castro. 2002. "Efecto de la radiación gamma sobre la diferenciación de plantas de caña de azúcar a partir de callos". *Agronomía Tropical* 52:311-323.
17. Ramírez-Calderón, J. J., T. Cervantes-Santana, H. E. Villaseñor-Mir, C. López-Castañeda. 2003. "Selección para componentes del rendimiento de grano en *Triticale* irradiado". *Agrociencia* 37(006): 595-603.
18. González, L. M., R. Ramírez, L. Licea, E. Porra, B. García. 2004. "Acción estimulante de las dosis bajas de rayos X en plantas de *Lactuca sativa*". *Universidad y Ciencia*. 20(039): 1-6.
19. Rai, M., K. Das. 1976. "Potentiality and genetic variability in irradiated population of linseed". *Indian Journal of Genetics* 36: 223-229.
20. Ferreira, C. A., V. F. do Nascimento, M. Ferreira, R. Vencovsky. 1980. *Efeito de baixas doses de radiação gamma na conservação do poder germinativo de sementes de Araucaria angustifolia* (Bert) O. Kuntze. IPEF 21: 67-82.
21. Delgado de la Flor Badaraco, L. F. 1970. Frecuencia de mutaciones inducidas por radiación gamma y metanosulfonato de etilo en la semilla de frijol *Phaseolus vulgaris* L. Tesis de Maestría Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica.
22. Othaloa-Gómez, V., M. Aray, Y. Antoima. 2001. "Inducción de mutantes para el color de la flor en crisantemos (*Dendranthema grandiflora* (Ram.) Tzvelev) mediante radiaciones gamma". *Revista UDO Agrícola* 1 (1): 56-63.

El doctor **Pablo Octavio-Aguilar** es investigador Posdoctoral del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, de la Universidad Veracruzana. Especialista en Genética, Demografía y Biología Molecular de Plantas. C. e.: aguipo@yahoo.com.mx.

La doctora **Lourdes Georgina Iglesias-Andreu** es Investigadora Titular C del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, de la Universidad Veracruzana. Especialista en Mejoramiento Genético.

El doctor **Jerico Jabín Bello-Bello** es Investigador Posdoctoral del Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada, de la Universidad Veracruzana. Especialista en Cultivo de Tejidos Vegetales.

El doctor **Mauricio Luna-Rodríguez** es Investigador Titular del Laboratorio de Alta Tecnología de Xalapa. Especialista en Biología Molecular y Manejo de Bacterias.