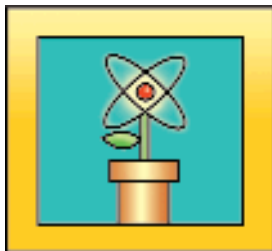


La tecnología nuclear en el mejoramiento de las plantas



Conjuntando el conocimiento biológico de los genes y el de la física de las radiaciones, hoy podemos acelerar el proceso de obtención de nuevas variedades de plantas y mejorar especies vegetales, más útiles y productivas.

Josefina González Jiménez

En numerosos foros económicos, científicos y políticos se manejan expresiones como la siguiente: “El país que tenga el control de sus recursos naturales, podrá considerarse rico, poderoso y libre”. Esto deja en claro la importancia de estudiar, conservar y mejorar los recursos naturales.

Desde la aparición de la agricultura, hasta la creación del más reciente organismo transgénico, el ser humano, al igual que los demás seres vivos, jamás ha podido sustraerse a la dependencia de su entorno. Sin embargo, en su búsqueda por mejorar sus condiciones de vida y obtener un mayor número de satisfactores, ha logrado no sólo reducir la tasa de mortandad, sino también, por desgracia, el número de especies que conforman la biodiversidad.

Las especies vegetales no sólo nos dan oxígeno y alimento para vivir; también hacen placentera nuestra existencia al brindarnos vestido, cobijo y belleza. Por ello, el 64 por ciento de las investigaciones a nivel mundial y el 48 por ciento a nivel nacional se dedican (sin perder de vista el sentido antropocéntrico) al estudio de las plantas.

Cada investigador selecciona diversas estrategias, en las que empleará una o varias técnicas que minimicen el tiempo y los costos de su estudio, con el fin de conservar, mejorar o propagar organismos. En el caso del *fitomejoramiento* (mejoramiento de especies vegetales), cuyo objetivo principal es obtener plantas con cualidades agronómicas relevantes, la estrategia consiste en aumentar la variabilidad de la especie de interés para luego seleccionar a los individuos que presenten las características que se buscan, como alto rendimiento, proteínas con mayor contenido de aminoácidos esenciales, resistencia a enfermedades o a condiciones adversas, mayor número de flores o frutos, o más vida de anaquel, entre otras.

En la naturaleza, la variabilidad ocurre por adquisición de nuevas características, ya sea a través de modificaciones en la información genética a nivel individual (mutaciones), o bien,

La radiación tiene diversos usos pacíficos para fines médicos, tecnológicos o industriales, como los aparatos de rayos X, la producción de radioisótopos, los aceleradores de partículas y los reactores nucleares

por intercambio entre individuos distintos (recombinación genética). Estas modificaciones pueden prevalecer o perderse, según la presión de selección que ejerza el ambiente. En conjunto, estos mecanismos ayudan a las especies a desarrollar habilidades o defensas para enfrentar condiciones nuevas.

En este sentido, el fitomejorador emplea técnicas que tratan de imitar este proceso (cuadro 1). Las mutaciones (cambios en los genes o los cromosomas) son, como ya se dijo, una fuente importante de la variabilidad genética. Por ello, el fitomejorador trata de incrementarlas, utilizando elementos que provocan mutaciones, denominados *mutágenos*, entre los que destaca la radiación ionizante.

La radiación es un tipo de energía que siempre ha estado presente en la naturaleza. A pesar de que incluso cada ser vivo presenta una pequeña cantidad de radiación, frecuentemente se la relaciona con la construcción de armas o, como en las películas, con la producción de “mutantes” tipo Godzilla, pasando por alto los beneficios que se producen al emplearla.

Sin embargo, la radiación tiene diversos usos pacíficos para fines médicos, tecnológicos o industriales, como los aparatos de rayos X, la producción de radioisótopos, los aceleradores de partículas y los reactores nucleares. En la cuadro 2 se presentan algunos de los usos de la energía nuclear en la agricultura y en la producción de alimentos.

En esta área, el efecto de las radiaciones impacta también en la economía, ya que no sólo permite controlar o erradicar plagas de cultivos importantes, sino también ayuda a la exportación e importación de alimentos al evitar pérdidas debidas a pudrición o descomposición. Además ha permitido la obtención de nuevas variedades de plantas que presentan mejores caracte-

rísticas, como mayor resistencia a plagas, mejor adaptación a ciertos climas, mayor producción de metabolitos secundarios o simplemente con nuevas formas o colores, ayudando en algunos casos a disminuir los costos de producción y en otros a elevar las ventas. Por ello, el uso de las radiaciones se considera una herramienta valiosa para la obtención de satisfactores necesarios para el bienestar y comodidad humanos.

¿QUÉ TIPO DE RADIACIÓN USAR?

La importancia de la radiación radica en su capacidad para depositar energía en los áto-

CUADRO 1.
Procesos desarrollados para incrementar la variabilidad genética.

Mecanismo natural	Imitación
a) Mutación espontánea	a) Mutagénesis artificial mediante radiación o agentes químicos.
b) Recombinación genética	b) Cruzas entre organismos de la misma o de diferente variedad o especie.
Selección natural al azar	Selección artificial de uno o varios organismos, de acuerdo a las características que se desea conservar.

mos o moléculas que atraviesa. Dicha energía ejercerá un efecto diferente de acuerdo al tipo y dosis de radiación. Un átomo puede imaginarse como un pequeño sistema solar: el núcleo sería el sol, y está formado por dos tipos de partículas: los neutrones y los protones. Los electrones serían los planetas, y los orbitales por donde “viajan” los electrones serían las órbitas. La mayoría de los átomos o elementos químicos suelen ser estables, pero hay algunos que no lo son, pues debido a su alta energía se ven forzados a emitir (o perder) partículas u ondas para poder llegar al equilibrio. El tipo de energía que reciben los átomos puede presentarse en forma de partículas (alfa, beta o neutrones) o de rayos gamma o rayos X.

Cuando un material es irradiado, se pueden producir dos efectos: que los electrones del material vibren, se exciten y pasen a niveles de energía superiores, que los electrones salgan de su órbita, con lo que los átomos se transforman en iones.

El primer caso se refiere a radiación *no ionizante* y el segundo a radiación *ionizante*. Nos referiremos aquí a la radiación ionizante, pues debido a sus características y alto poder de penetración puede provocar cambios en moléculas tan importantes como el ácido desoxirribonucleico (ADN).

Como se muestra en la figura 1, la radiación ionizante puede ser corpuscular o electromagnética. La primera tiene mayor capacidad de ionización, lo que deriva en un mayor efecto biológico, pero su penetración en la materia es muy limitada. La electromagnética, en cambio, tiene un alto poder de penetración y por ello es capaz de llegar al material genético de los organismos. Las partículas alfa pueden ser detenidas por una hoja de papel y apenas pueden penetrar las capas exteriores de células muertas de la piel; la beta penetra uno o dos centímetros en tejidos vivos, y una capa delgada de aluminio los absorbe fácilmente. Los rayos X y gamma sólo pueden ser detenidos por metales como el plomo o por materiales de gran espesor (figura 2). Este alto poder de penetración produce una gran

CUADRO 2.

Aplicaciones de la energía nuclear en el sector agrícola.

Usos	Logros
Control de plagas	Gracias a la irradiación gamma de cobalto-60 y mediante un programa conjunto México-Estados Unidos, se logró eliminar a la mosca del Mediterráneo, produciendo 500 millones de moscas estériles por semana. Esta aplicación representa una alternativa para combatir otras plagas como la mosca mexicana de la fruta.
Conservación de alimentos mediante la irradiación.	Esta técnica se aplica exitosamente en 36 países, en más de 50 productos alimenticios, contribuyendo así a reducir la pérdida poscosecha, que alcanza hasta 30 por ciento de la producción agrícola mundial. Además prolonga la vida de anaquel y reduce las enfermedades por consumo de alimentos contaminados.
Mejoramiento genético de plantas	La irradiación ha permitido obtener más de mil 300 nuevas variedades de cultivos como cereales (559), leguminosas (136), cultivos industriales (67), ornamentales (397) y frutas y hortalizas (80).
Fertilidad de suelos, irrigación y producción de cultivos.	El uso de isótopos radiactivos permite detectar, medir y rastrear los nutrientes suministrados a las plantas, determinar la disponibilidad de humedad y estudiar procesos fisiológicos.

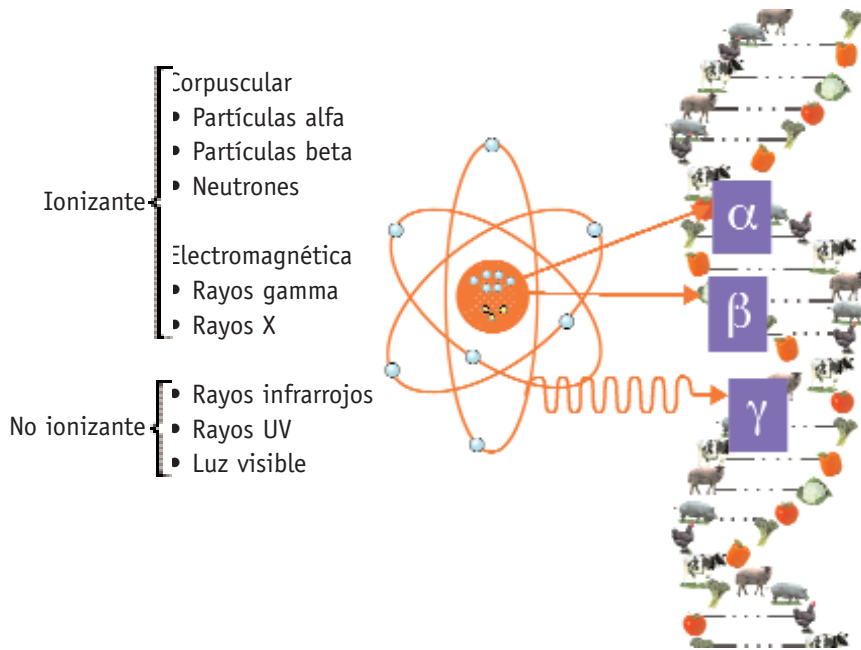


Figura 1. Tipos de radiación ionizante y no ionizante.

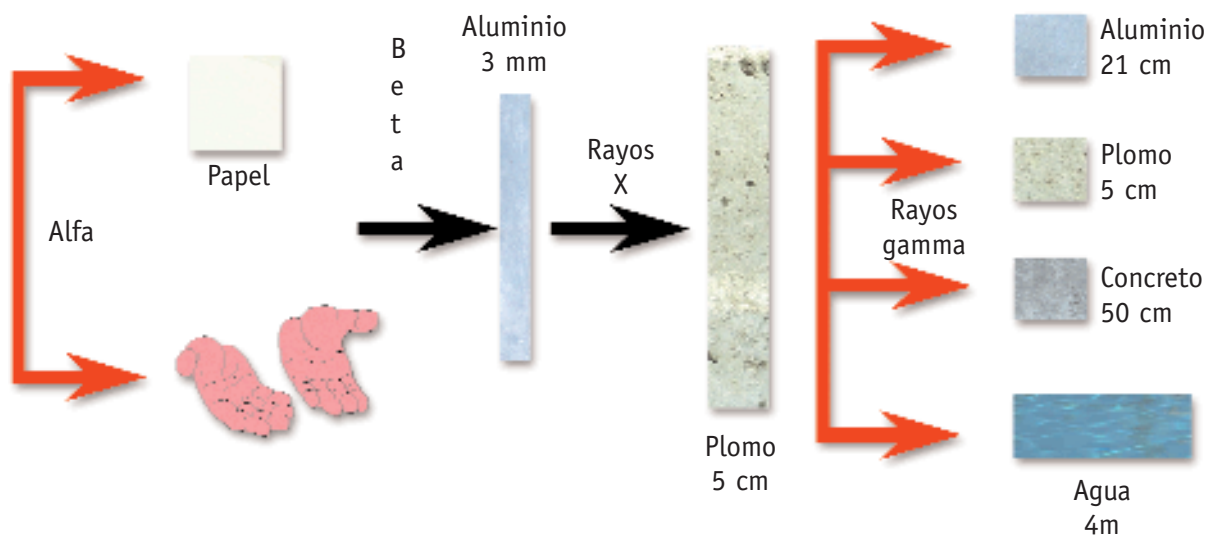
cantidad de alteraciones, aunque de manera azarosa, por lo que incrementa la probabilidad de que se induzca la mutación deseada. Por ello, los rayos gamma y los rayos X son los más empleados en mejoramiento. Sin embargo, no basta seleccionar el tipo de radiación a usar; deben tomarse en cuenta otros factores como radiosensibilidad, intervalo de dosis y forma de aplicación, para lograr los objetivos planteados.

Para explicar estos factores, debemos entender qué es una *dosis de radiación*. Se entiende por dosis la cantidad de energía absorbida por el material irradiado, la cual se mide en unidades llamadas *grays*.

Cabe aclarar que no todas las dosis de radiación provocan alteraciones (ni buenas, ni malas). Recordemos que la radiación ha estado presente en el planeta desde su formación, que tenemos fuentes de radiación naturales y hasta muy recientemente artificiales, y si bien algunas personas se han sacado más radiografías que otras, ninguna ha cambiado de forma o ha “mutado”, al menos por radiación.

Figura 2. Poder de penetración de algunos tipos de radiación.

Para determinar el intervalo de dosis que permita inducir los cambios deseados, debe de tomarse en cuenta que cada organismo presenta una particular sensibilidad a la radiación (radio-



sensibilidad). Es algo parecido a lo que sucede cuando vamos a la playa: mientras que algunos, tras dos horas de estar tendidos en la playa, están “tostaditos”, otros en cambio presentan quemaduras graves. En plantas, la dosis que se aplica para incrementar su vigor no es la misma para rosas que para azucenas, y de hecho varía también entre rosa roja y rosa amarilla. Algunos investigadores sugieren que la radiosensibilidad está relacionada con el tamaño y número de cromosomas, así como con el estado de madurez que presente la parte de la planta que se irradie. Así, se dice que a mayor volumen nuclear o número de juegos de cromosomas, habrá mayor radiosensibilidad, y que entre más maduro sea el material irradiado, menor radiosensibilidad tendrá. Un ejemplo muy conocido del factor madurez se observa cuando se irradian brotes o semillas de petunia (*Petunia hybrida*). En ambos casos el resultado es el mismo: cambio de color en los pétalos; sin embargo la diferencia de dosis es notoria, siendo mayor en las semillas (2.5 grays) que en los brotes (0.2 grays).

Para plantas, se recomienda usar una o varias dosis que estén dentro del intervalo entre 0.1 y mil grays. Este intervalo es muy amplio por lo que se sugiere que se establezca primero la llamada *dosis letal 50* del material de estudio (es decir, la cantidad de radiación que permite que sobreviva el 50 por ciento de los individuos irradiados), y se busquen las dosis óptimas (las que induzcan los cambios deseados) alrededor de ésta. La dosis puede administrarse en forma rápida (aguda) o poco a poco (crónica). En general, la tendencia es a suministrar el tratamiento crónicamente, pues de esa forma se logra mayor número de cambios y menor daño.

Por lo anterior, debe llevarse a cabo una gran cantidad de investigaciones para poder producir una mutación favorable, cuya persistencia debe comprobarse al menos en las ocho generaciones subsecuentes. Es aquí donde la combinación con otras técnicas, como la micropropagación (figura 3) resulta importante, pues con ello se pueden producir varias generaciones de individuos en menos tiempo del que se requiere en condiciones de cultivo normales.

EFFECTO DE LA RADIACIÓN SOBRE EL MATERIAL BIOLÓGICO

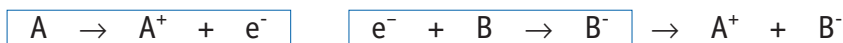
Dentro de la célula o tejido irradiado, lo que puede hacer la radiación ionizante es producir cambios químicos directamente en el ADN o en otras moléculas circun-

En plantas, la dosis que se aplica para incrementar su vigor no es la misma para rosas que para azucenas, y de hecho varía también entre rosa roja y rosa amarilla

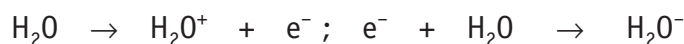
Figura 3. Micropropagación o cultivo *in vitro*.



Formación de iones



Formación de radicales libres



con otra molécula de agua



Figura 4. Formación de iones y radicales libres.

Se conocen los sitios de ADN en que inciden o pueden incidir muchos de los iones. Por ejemplo, el radical hidroxilo ataca enlaces dobles y reacciona con los carbonos de la desoxirribosa

dantes, generando radicales libres (especies químicas muy reactivas). Los radicales más comunes son los iones hidroxilo, superóxido, hidronio y, por reacciones subsecuentes, peróxido de hidrógeno (figura 4). Los radicales libres son un paso intermedio entre los pares iónicos y los productos químicos finales, y pueden por lo mismo, interactuar con moléculas mayores, ocasionando diversas modificaciones en ellas.

Para entender lo anterior, veamos la figura 5, que esquematiza de manera sencilla los daños que puede producir la radiación sobre el ADN. Las cadenas del ADN están representadas por dos líneas verticales unidas por líneas horizontales (enlaces entre sus bases). Estas uniones pueden ser rotas por las partículas ionizantes o por fotones, y en caso de que no haya reparación, puede que algún oxígeno que esté a su alrededor “entre” de emergente para cubrir el espacio libre (figura 5a), produciendo cambios o alteraciones. En la figura 5b se muestra la producción de fragmentos cuando la ruptura es doble y no existe reparación. En ambos casos, el resultado es diferente al producto que le dio origen, y por lo tanto podría ser “leído” o expresado de manera diferente.

Se conocen los sitios de ADN en que inciden o pueden incidir muchos de los iones. Por ejemplo, el radical hidroxilo ataca enlaces dobles y reacciona con los carbonos de la desoxirribosa (azúcar presente en el ADN). Podemos decir que, en general, se pueden producir varios tipos de lesiones como rupturas de cadena sencilla o doble, rompimientos en los puentes de hidrógeno del ADN, cambios en su esqueleto azúcar-fosfato, formación de enlaces cruzados, y oxidación a las bases nitrogenadas, entre otros (figura 6).

Todos esos daños deben ser totalmente eliminados, y es aquí donde intervienen los procesos celulares que genéricamente se conocen como sistemas de reparación, cuyo objetivo final consiste en restaurar la integridad del ADN. Como esta molécula es la portadora y transmisora de la información genética necesaria para todas las funciones celulares (crecimiento, diferenciación, etcétera), es de esperarse que cada organismo, tejido o célula tenga sistemas encargados de conservarla. Sin embargo, hay ocasiones en que durante el proceso cambian o se pierden bases, y ocurre lo que se conoce como *mutación puntual*. Finalmente cuando el daño es tan extenso que los sistemas de reparación resultan insuficientes se producen las llamadas *aberraciones cromosómicas*, y en casos extremos la muerte celular (figura 7).

En fitomejoramiento, las mutaciones que se busca inducir son de tipo puntual, ya que por lo general no dañan la viabilidad del individuo, y en cambio permiten adquirir o resaltar caracteres ocultos de interés.

Los cambios originados por mutaciones puntuales son muy diversos, y afectan diversos caracteres fisiológicos y morfológicos como la altura de la planta, el número de plantas o brotes

Cuando el daño es tan extenso que los sistemas de reparación resultan insuficientes se producen las llamadas aberraciones cromosómicas, y en casos extremos la muerte celular

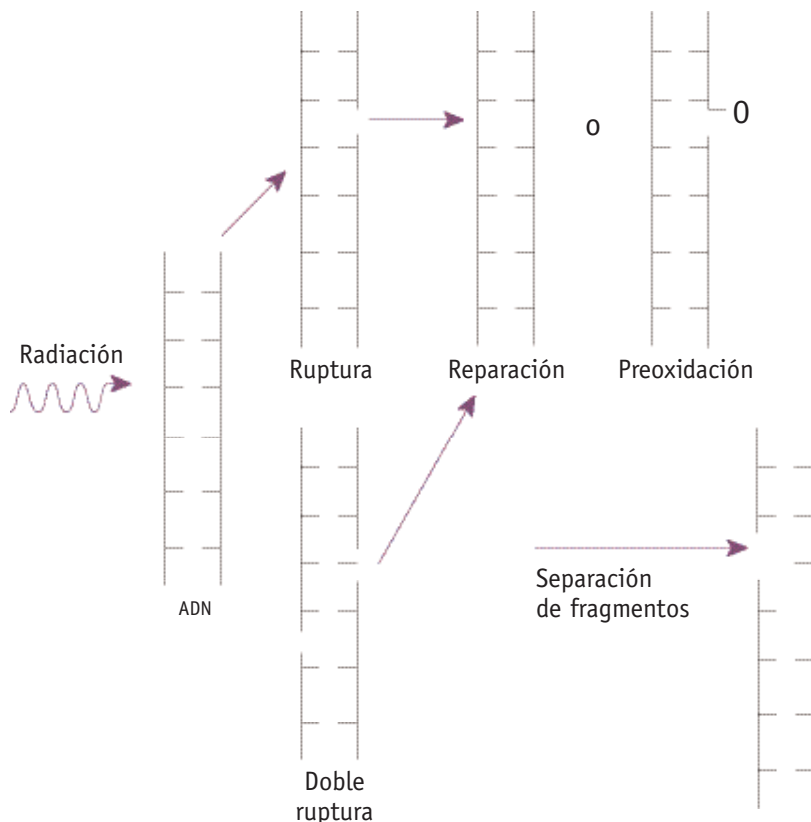


Figura 5. Daño en ADN por radiación: **a)** Rupturas simples en una cadena de ADN se reparan en presencia de oxígeno, se produce una peroxidación; **b)** Doble ruptura sin reparación y formación de fragmentos.

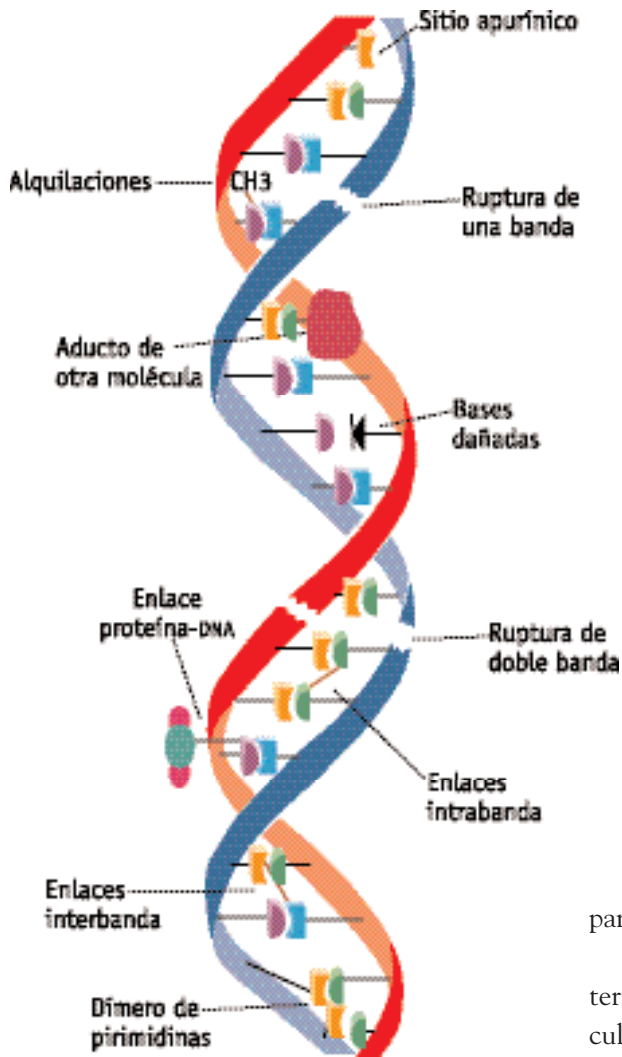


Figura 6. Sitios del ADN donde incide la radiación.

obtenidos, la germinación, el rendimiento, la maduración, el contenido de aceites, proteínas y carbohidratos, y la resistencia a enfermedades o a ambientes extremos. Cabe mencionar que también el cambio en forma y color de las flores, así como el incremento en la vida de anaquel, han sido respuestas obtenidas mediante la producción de mutaciones puntuales (figura 8). Sin embargo, no debemos esperar que una mutación inducida de manera artificial (ni de manera natural) se exprese inmediatamente.

FITOMEJORAMIENTO

A pesar de que ya desde 1930 Stadler utilizó los rayos X para inducir mutaciones en cebada, las radiaciones sólo se establecieron como una herramienta valiosa para el mejoramiento de plantas hasta 1970.

Mediante técnicas nucleares se han desarrollado (hasta el año 2002), mil 800 nuevas variedades que presentan ventajas agronómicas, como: mayor rendimiento, resistencia a plagas y mayor calidad nutritiva. Esto ha permitido a países como China, India y Japón (con 281, 116 y 65 nuevas variedades, respectivamente) resolver parte de su problema alimentario.

Actualmente todos los países miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica aplican estas técnicas en sus cultivos y flores de interés. A su vez, este organismo apoya y fomenta investigaciones en este campo, otorgando ayuda económica y capacitación al personal para que los estudios de mejoramiento se realicen con éxito.

En México, el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) ha aplicado y promovido esta técnica desde los años setenta en cultivos como papa, maíz, frijol, soya, ajonjolí, trigo, chile y aguacate, entre otros. La vinculación con universidades como la Nacional Autónoma de México (UNAM), la de Chapingo, la del Estado de México o con instituciones como el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas del Aguacate o el Instituto de Investigación y Capacitación Agropecuaria Acuícola y Forestal del Estado de México ha coadyuvado en la realización de estudios para la obtención de mejores resultados, entre los que destacan una variedad de papa resistente a virus y una de aguacate enano. En el último caso, es importante resaltar que el hecho de contar con árboles frutales pequeños, pero que tengan la misma o mayor producción que

los árboles de talla normal, permite al agricultor reducir sus gastos de cultivo y también disminuir las pérdidas por frutos estropeados durante la cosecha.

También en el área florícola se han hecho trabajos sobre orquídea, rosa y margarita, logrando aumentar el número de flores, el tiempo de vida de anaquel, y la producción de pétalos jaspeados, respectivamente. Estos caracteres, que podrían parecer insignificantes, se hacen relevantes cuando reflexionamos en las percepciones obtenidas por la venta de flores: Holanda ha llegado a recibir mayor cantidad de divisas por la exportación de flores, que México por la venta de petróleo.

El empleo de esta técnica en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares ha permitido incrementar la variabilidad genética de dos plantas mexicanas: *Mammillaria sanangelensis*, planta considerada en peligro de extinción, y *Sprekelia formosissima*, donde se logró incrementar el vigor de su sistema radicular. Recientemente se participó, junto con la UNAM y la Universidad Autónoma de Guadalajara, en los esfuerzos que se realizan para que el agave azul (que como sabemos nos proporciona el tequila) incremente sus defensas en contra del llamado “sida tequilero”, que no sólo ha provocado la disminución de la producción nacional de tequila, sino que puede llevar al agave a la extinción.

Actualmente, en el Departamento de Biología del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, se emplean varias técnicas modernas para realizar los estudios de mejoramiento, que permiten obtener un gran número de individuos semejantes sin depender de las condiciones climáticas, obtener organismos seleccionados y verificar la mutación en al menos ocho generaciones.

Para ello se emplea un método que implica la realización de las siguientes metas:

- Determinación del método de micropropagación adecuado;
- establecimiento de la dosis letal 50;

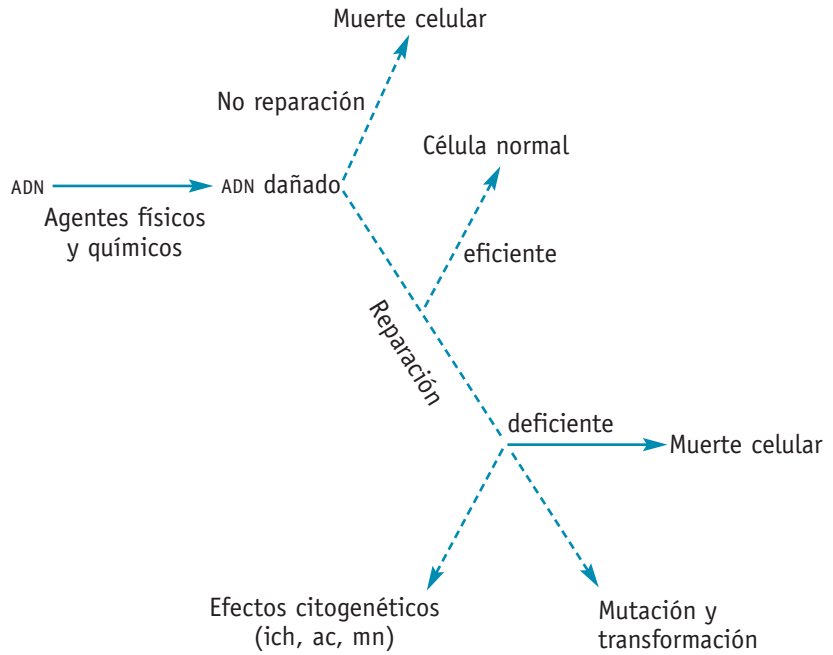
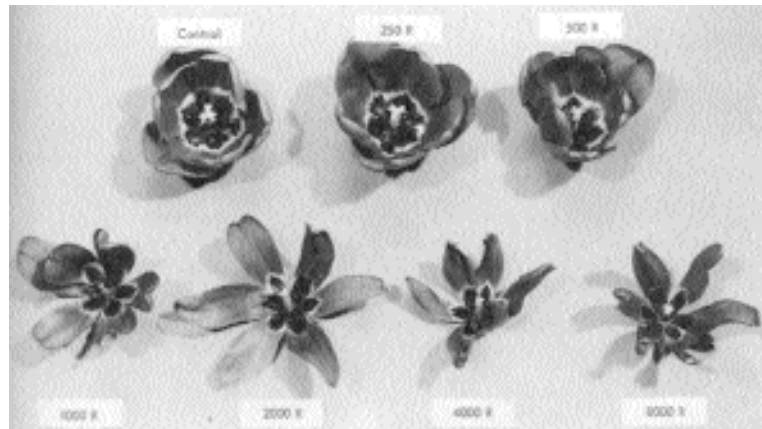
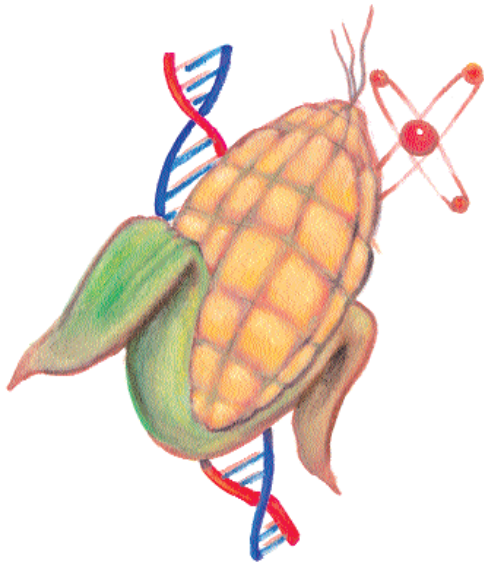


Figura 7. Secuencia de eventos celulares causados por la producción de lesiones en el ADN.

Figura 8. Foto de flores. Se muestra el cambio de forma y tonalidad en tulipanes irradiados.





- determinación de las dosis óptima de radiación, y
- comprobación de la mutación.

De acuerdo con los objetivos del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, éste debe de realizar, apoyar y fomentar los usos pacíficos de la energía nuclear. El uso en el fitomejoramiento es uno de los más importantes, pues se trata nada menos de proveer alimentos, mejorar y hasta conservar los organismos que nos dan el oxígeno.

El Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares pretende difundir el uso de esta técnica hacia áreas hortícolas, florícolas y frutícolas mexicanas, para llevar a cabo estudios que permitan obtener plantas mexicanas mejoradas. Ello contribuirá, junto con otras instituciones, a lograr la independencia de los agricultores (y hasta de nosotros los consumidores) respecto a alimentos y productos extranjeros, que si bien aseguran ser “mejores” que los mexicanos, tienen un tiempo de vida corto, lo que induce la compra reiterada del mismo y va disminuyendo la variabilidad genética de los cultivos endémicos.

Bibliografía

Arena, V. (1971), *Ionizing radiation and life*, St. Louis. Mosby, 453 págs.

Broertjes y A. M. Van Harten (1978), *Aplicación de mutation breeding methods in the improvement of vegetatively propagated crops*, Amsterdam, Elsevier, págs 5-17.

Torres, K. C. (1988), *Tissue culture techniques for horticultural crops*, Nueva York, AVibooks, págs. 1-26.

Casarett, A. (1978), *Radiation Biology*, New Jersey, Prentice-Hall, 367 págs.

Novak, F. J. (1991), *Plant Tissue cultura tecnicques for mutation breeding. A training manual*, Austria, IAEA Laboratories-Seibersdorf, 194 págs.

Josefina González Jiménez estudió la carrera de Biología en la Facultad de Ciencias de la UNAM, y se ha desempeñado como fitomejoradora en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, donde es responsable del laboratorio de biología vegetal. Ha participado en diversos congresos nacionales e internacionales del área agrícola y ha sido asesora de tesis de licenciatura, así como jurado en eventos nacionales. [jjgj@nuclear.inin.mx](mailto:jgj@nuclear.inin.mx)