

Fitotecnia: Tecnología de mutación inducida para el mejoramiento de los cultivos

Científicos de los Laboratorios de Seibersdorf del OIEA ayudan a los fitogenetistas a desarrollar cultivos con características más deseadas

por
F.J. Novak y
H. Brunner

Todas las formas de vida que hoy existen son el resultado de tres factores:

- la mutación, fuente fundamental de las variaciones hereditarias,
- los factores ambientales, que influyen en la selección de las mutaciones que sobreviven y se reproducen, y
- el tiempo, durante el cual el genotipo y el medio ambiente están en constante interacción y se produce el cambio evolutivo.

Las variaciones genéticas presentes en la naturaleza no han sido originadas por mutaciones espontáneas, sino más bien por la recombinación de genotipos en poblaciones y por su acción recíproca constante con las fuerzas del medio ambiente.

Las plantas verdes son la fuente principal de recursos que utiliza el hombre para satisfacer sus necesidades de alimento, ropa y energía. El hombre prehistórico, que dependía de sus habilidades como cazador, recurrió a la abundante vegetación natural para obtener frutas, semillas, tubérculos y otros alimentos nutritivos y no venenosos. En la medida en que aumentaron las poblaciones humanas fue necesario procurar fuentes de alimentos mayores y más seguras, y poco a poco se fueron desarrollando sistemas de producción basados en la domesticación de las plantas.

Históricamente, la domesticación de cultivos se ha visto influida por las condiciones ecológicas y agrícolas, así como por la preferencia por distintos alimentos. Por lo general, se han seleccionado para el cultivo los genotipos que se han adaptado a una amplia gama de condiciones climáticas y edáficas. La obtención de cultivos con mayor rendimiento facilitó el crecimiento demográfico, los asentamientos de poblaciones sedentarias y su ulterior desarrollo. Para determinar los cultivos que debían ser domesticados no sólo se tenía en cuenta el número de

semillas o el tamaño de los frutos, sino también su sabor, palatabilidad y otros factores.

De las casi 200 000 especies de plantas que existen en el mundo sólo una pequeña parte puede ser domesticada; el hombre ha empleado unas 3000 como alimentos, fibras, especias y otros, para finalmente domesticar 200 como cultivos. De ellas sólo 15 a 20 constituyen cultivos alimentarios de gran importancia.

El método empleado para desarrollar nuevas variedades de plantas para su cultivo y consumo humano se ha dado en llamar fitotecnia, método que al principio se basaba primordialmente en la selección, es decir, en la selección entre plantas buenas y malas. El hombre aprendió no sólo a comer los "mejores frutos" sino también a sembrar las semillas de algunos de ellos.

La genética se convirtió en una ciencia básica de la fitotecnia después que el monje moravo J.G. Mendel descubrió las leyes de la herencia a mediados del siglo XIX. Posteriormente, con el desarrollo del método de hibridación, la fitotecnia evolucionó aún más. Su objetivo era combinar en una planta las mejores propiedades de varias plantas en vez de sólo hacer una selección entre plantas buenas y malas. Este método, que a menudo se complementa con el uso del plasma germinal obtenido por mutación inducida, ha llegado a ser el más empleado para la multiplicación de las plantas por reproducción sexual.

No obstante, algunos cultivos, entre ellos el banana, la manzana, la yuca y la caña de azúcar, se reproducen de forma vegetativa, sobre todo los que son totalmente estériles sin semillas. Para este importante grupo ha sido preciso crear otros métodos, a saber, técnicas de manipulación con tejido somático, fitotecnia por mutaciones y biotecnología.

Fitotecnia por mutaciones

Si bien la fitotecnia exige la variación genética de las características útiles para mejorar los cultivos, a

El Dr. Novak es Jefe de la Dependencia de Fitotecnia de los Laboratorios de Seibersdorf del OIEA y el Dr. Brunner es un científico superior de esta Dependencia.

Un producto de la evolución natural provocada por la variación genética: mutante de cocotero enano.



menudo no se logra la variación deseada. En estos casos pueden emplearse agentes mutágenos, como la radiación y algunos productos químicos, para inducir mutaciones y generar variaciones genéticas de las cuales puedan seleccionarse los mutantes deseados.

La inducción de mutaciones ha resultado ser un método eficaz para lograr variaciones dentro de un tipo de cultivo, ya que ofrece la posibilidad de inducir características deseadas que no se pueden hallar en la naturaleza o se han perdido durante el proceso evolutivo. Cuando los fitogenetistas no encuentran en el banco de genes de que disponen, un gen, o genes, resistente a una enfermedad en particular o tolerante a los cambios del medio ambiente, no tienen otra opción evidente sino tratar de inducir la mutación.

El tratamiento con agentes mutágenos altera los genes o divide los cromosomas. La mutación de genes ocurre de forma natural como un error en la reproducción del ácido desoxirribonucleico (ADN). Algunos de estos tipos de error pueden subsanarse, pero otros pueden pasar a la próxima división de la célula y establecerse en el retoño de la planta como mutaciones espontáneas.

Aunque no es frecuente observar mutaciones en un gen en particular, una planta superior puede tener hasta 100 000 genes en una célula. Ello significa que cada planta puede transmitir a la próxima generación una o más mutaciones espontáneas. En general resulta difícil determinar las mutaciones de genes sin expresiones fenotípicas (visibles). En consecuencia, la variación genética parece ser bastante limitada y los científicos tienen que recurrir a la inducción de mutaciones. No se conoce otra forma económica de alterar los genes, salvo esperar con paciencia que se produzcan mutaciones espontáneas.

La inducción artificial de mutaciones por medio de la radiación ionizante data de principios del siglo XX, pero no fue hasta unos 30 años después que se demostró que estas transformaciones podían emplearse en la fitotecnia. En los intentos iniciales para

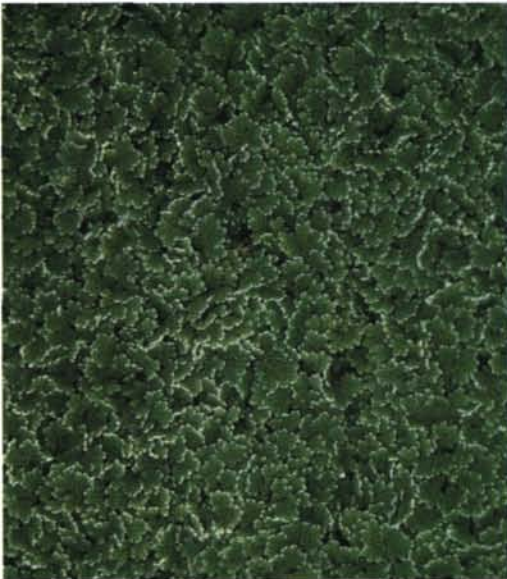
inducir mutaciones en las plantas se utilizó fundamentalmente la técnica de rayos X; más tarde, en los comienzos de la "era atómica", se emplearon las radiaciones gamma y de neutrones, ya que estos tipos de radiación ionizante podían obtenerse fácilmente en los centros de investigación nuclear recién creados.

En esta fase inicial de inducción de mutaciones se realizaron ingentes esfuerzos para determinar las condiciones óptimas en que podría lograrse la reproductibilidad. En las investigaciones se trató, sobre todo, de transformar la inducción de mutaciones "aleatoria" en una mutagénesis más específica para obtener mutaciones más convenientes y útiles desde el punto de vista económico. Aun así, no se lograron las alteraciones deseadas en el espectro de mutantes. La dificultad estaba en que a medida que aumentaba la dosis de radiación, se incrementaba el deterioro de la planta y disminuía la frecuencia de mutaciones económicamente útiles. Ello hizo que los científicos buscaran mutantes potencialmente superiores y que se hallaran nuevos métodos de tratamiento por radiaciones y agentes químicos con propiedades mutagénicas.

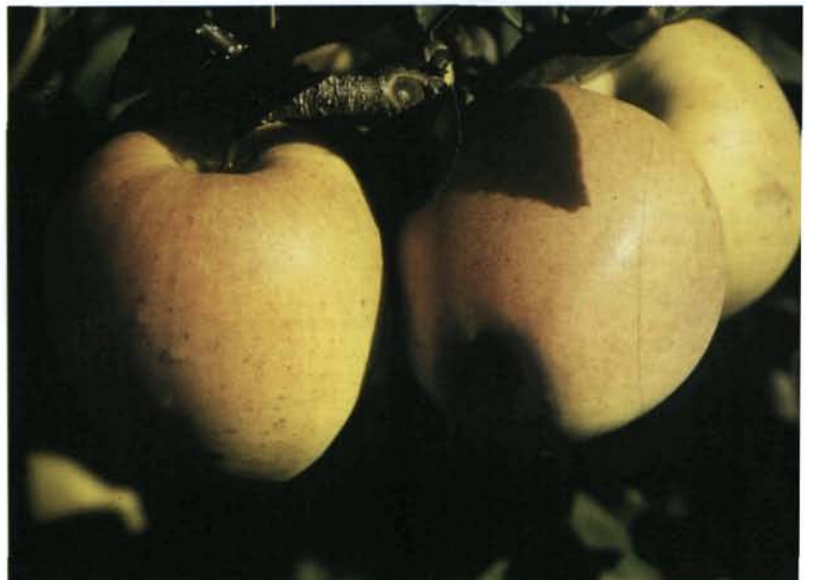
Biotecnología de las plantas

La reproducción de cultivares de plantas mejorados se basa en dos principios: la variación genética y la selección. Este proceso es en extremo laborioso y lento y requiere mucho trabajo intelectual y manual (*Véase el recuadro*). Sin embargo, el desarrollo del cultivo de células tejidos y vegetales que ha tenido lugar en los últimos 20 años ha permitido transferir al laboratorio parte del trabajo de reproducción que se llevaba a cabo sobre el terreno.

Como resultado de las amplias investigaciones realizadas han surgido nuevas ramas de la fitotecnia, a saber, la "biotecnología de las plantas" y la "inge-



Algunos instrumentos y productos de la fitotecnia (en la dirección de las manecillas del reloj comenzando por arriba): mutante de arroz inducido por radiación ionizante; el ñame y otros tipos de raíces y tubérculos pueden mejorarse genéticamente mediante la fitotecnia por mutaciones; el cultivo de tejidos y la mutagénesis in vitro son métodos básicos que aplica la biotecnología para el mejoramiento de cultivos; el "Golden Haldegg", un mutante de manzana con mayor valor de mercado, fue inducido en los Laboratorios de Seibersdorf mediante la irradiación de esquejes de manzanas "Golden Delicious"; la fitotecnia por mutaciones ha aumentado la tolerancia a los cambios del medio ambiente de la Azolla, alga que se emplea como biofertilizante en los arrozales.

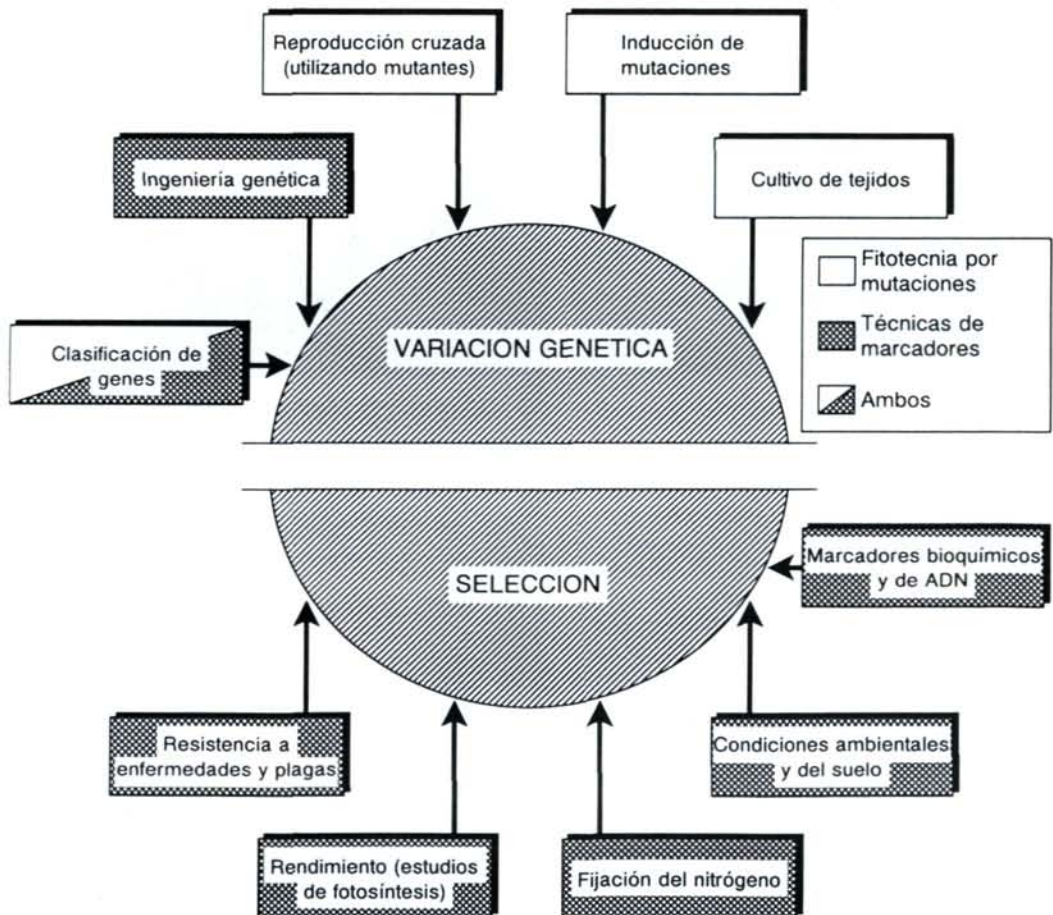


Esquema general de la fitotecnia por mutaciones

La reproducción de una nueva variedad de cultivo puede requerir 12 a 15 años de esfuerzos intensivos. Entre las etapas que se deben cumplir se incluyen:

Generación	Caracterización
$M_1(M_1V_1)$	Semillas, polen, partes vegetativas, o cultivos de tejido tratados con mutágenos físicos (radiación) o químicos
$M_2(M_1V_2)$	Plantas desarrolladas a partir de semillas tratadas (M_1) o mediante propagación vegetativa (M_1V_1)
$M_3 - M_8$ ($M_1V_3 - M_1V_8$)	Poblaciones de plantas obtenidas de semillas (M_2) o partes vegetativas (M_1V_2) cosechadas a partir de M_1 o M_1V_1 , respectivamente. La selección de mutantes deseados puede comenzar en esta generación o más tarde.
2 a 3 generaciones siguientes	Selección continua, confirmación genética, multiplicación y estabilización del rendimiento de las líneas de mutantes sobre el terreno.
2 a 3 generaciones	Análisis comparativo de líneas de mutantes en años y lugares diferentes. Ensayo oficial antes de difundir una nueva variedad.

Aplicación de técnicas nucleares en la fitotecnia



El mejoramiento de cultivos se basa en dos principios fundamentales: la variación genética y la selección. La irradiación mutagénica y las técnicas de trazadores isotópicos que se emplean en diferentes métodos de reproducción son instrumentos muy valiosos.

nería genética", ciencias que se basan en la totipotencia celular, o sea, la capacidad para regenerar plantas totalmente desarrolladas a partir de órganos aislados (meristemas), cortes de tejidos, células individuales y protoplastos. Las partes aisladas de las plantas se cultivan asépticamente en tubos de ensayo con medios artificiales de conocida composición química (cultivo *in vitro*) y más tarde, bajo un estricto control, se transforman en plántulas que posteriormente son transferidas al suelo hasta que alcanzan su madurez.

El cultivo de tejidos se ha explotado comercialmente para la micropropagación de cepas de plantas hortícolas libres de enfermedades (por ejemplo, fresas, patatas, y plantas ornamentales). Las técnicas *in vitro* resultan también de gran utilidad en diversas etapas del proceso de reproducción, como la conservación del plasma germinal, la propagación clonal y la hibridación a distancia.

Las técnicas isotópicas y de fitotecnia por mutaciones radioinducidas combinadas con el cultivo de tejidos han hecho importantes aportes a la fitotecnia e introducido nuevas técnicas para inducir la variación genética al mejorar la tecnología de selección y acelerar el proceso de reproducción. (Véase el recuadro).

Otro método conocido como antera, o cultivo de polen, permite regenerar plantas a partir de gametos masculinos con la mitad de cromosomas (haploides). A diferencia de las plantas que tienen todo su contenido cromosómico (diploides), el empleo de haploides en la fitotecnia por mutaciones es ventajoso, ya que permite detectar las mutaciones justo después de ser inducidas. Se ha demostrado que los métodos basados en el uso de haploides aceleran considerablemente la reproducción de nuevas variedades de arroz, cebada y verduras, por ejemplo.

Los procedimientos de ingeniería genética permiten transferir el material genético (ADN) de la célula de una especie a la de otro organismo no afín genéticamente. Por ejemplo, una porción de ADN de una célula bacteriana no puede integrarse al genoma de una célula vegetal para formar una planta transgénica. El nuevo ADN (gen) se expresa en el fenotipo de la planta regenerada a partir de la célula transgénica. En la ingeniería genética se aplican técnicas nucleares, en que se utilizan bases de ácido nucleico marcadas con isótopos para identificar y aislar genes apropiados para la transferencia; también se emplean como sistemas de vectores para introducir genes en la célula receptora y detectar nuevos materiales genéticos en el organismo receptor.

Gracias a la ingeniería genética ya se han obtenido plantas con otras características satisfactorias como, por ejemplo, resistencia a los insectos y a las enfermedades víricas, y con mejores propiedades de maduración. Empero, el entusiasmo inicial se está viendo afectado por las discusiones cada vez más acaloradas en torno a los posibles peligros que entraña la propagación de plantas transgénicas para el medio ambiente.

Otro aspecto que ha suscitado preocupación es la comercialización de esta tecnología y el acceso a ella de los países en desarrollo. Los últimos descubrimientos en la biotecnología de las plantas han originado grandes inversiones de capital y la concentración de recursos humanos altamente califica-

dos en el sector comercial de muchos países industrializados. Mientras tanto, el conocimiento científico y sus aplicaciones tecnológicas están siendo objeto cada vez más de legislaciones comerciales relacionadas con el registro de patentes, el secreto industrial y la concesión de licencias. Como resultado de ello, a los países en desarrollo les ha sido difícil tener acceso a los resultados biotecnológicos que necesitan aplicar en sus programas nacionales.

En este contexto desempeñan una importante función los organismos especializados de las Naciones Unidas, incluidos la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) y el OIEA. Se han emprendido programas en los países en desarrollo con el principal objetivo de identificar y transferir las biotecnologías adecuadas y capacitar al personal, fortaleciéndose así la capacidad nacional de investigación y desarrollo en esta esfera.

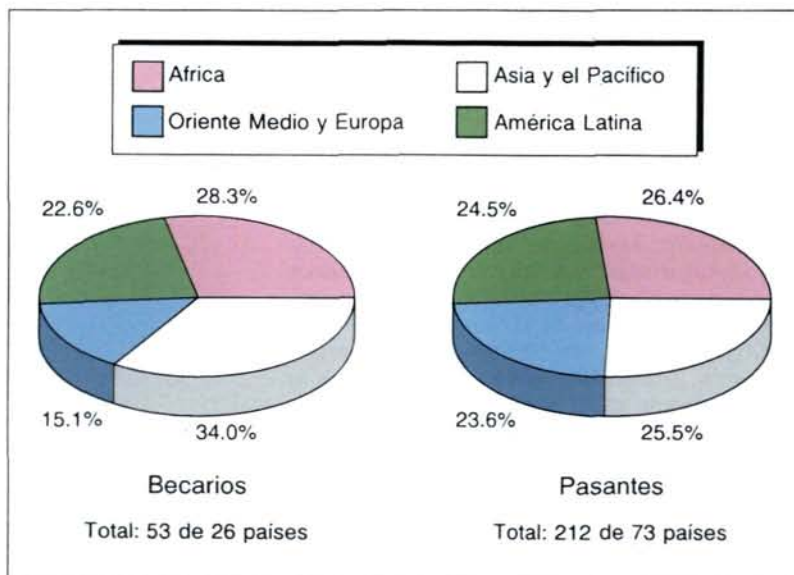
La fitotecnia para una agricultura sostenible

La fitotecnia y la biotecnología contribuyen en gran medida a lograr una agricultura inocua para el medio ambiente. La clave de ello está en la creación de un amplio banco de genes para el mejoramiento de los cultivos.

Se han desarrollado nuevas tecnologías para evitar que las especies de plantas sigan perdiendo su biodiversidad. El cultivo de tejidos en especies como la yuca, el banano y el plátano, la patata, el ñame, el boniato y el coco, por ejemplo, se está convirtiendo en el método preferido para la conservación del plasma germinal y el intercambio internacional de material clonal. Se aplican técnicas de marcado molecular para la clasificación y el análisis genético de los cultivares y de especies silvestres afines. Los métodos de fitotecnia como la hibridación y la fitotecnia por mutaciones *in vitro* e *in vivo* con mucha frecuencia incluyen componentes nucleares destinados a mejorar los recursos genéticos mediante la inducción de mutaciones, la recombinación y la selección.

La mayoría de los proyectos fitotécnicos están orientados a desarrollar nuevos cultivares de plantas con mayor resistencia a las enfermedades y más tolerancia a las plagas que la planta original. Estas variedades tienen menor dependencia de los compuestos agroquímicos, uno de los principales factores que afecta el desarrollo sostenible de la agricultura tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo. La obtención de variedades más resistentes puede ayudar a evitar el brote de epidemias en los cultivos de plantación como la que ocurrió en Ghana con la enfermedad del virus que causa el hinchamiento de los retoños del cacao, y en numerosas regiones tropicales y subtropicales con la enfermedad de Panamá que afecta al banano.

Hoy el desarrollo sostenible de la fitotecnia se enfrenta a algunos retos importantes que se relacionan concretamente con la reproducción de plantas con mayor nivel de fijación del nitrógeno y con



Actividades de capacitación en la Dependencia de Fitotecnia de los Laboratorios de Seibersdorf, 1982-1992

mayor capacidad de absorción de los nutrientes. Investigaciones conjuntas en que participan edafólogos y fitogenetistas han identificado ya genotipos deseados en leguminosas de grano (frijol de soya, habichuela) y otras especies de plantas, incluidos los árboles.

Para muchos países en desarrollo un objetivo prioritario es la reproducción de cultivos más tolerantes a la salinidad y acidez de los suelos. Las estrategias actuales de reproducción (incluida la inducción de mutaciones y la selección *in vitro*) han arrojado a todas luces resultados muy positivos al lograr determinados grados de tolerancia en diferentes especies. El empleo de la ingeniería genética en la obtención de plantas resistentes a los cambios ambientales dependerá de la identificación de genes concretos que contribuyan a la adaptación a cambios determinados del medio ambiente.

En los países tropicales se ha logrado mantener el nivel de rendimiento de diferentes cultivos mediante

la aplicación de la "siembra entre surcos" en vez del monocultivo. La reproducción de cultivos para múltiples funciones, tales como la producción de biomasa, un mejor uso del suelo y las aguas y el abono, es una forma de apoyo apropiada para lograr una agricultura sostenible en los países en desarrollo. La combinación de cultivos principales con cultivos de cobertura (leguminosas de forraje o hierbas) reduce al mínimo el empleo de herbicidas.

Papel de los Laboratorios de Seibersdorf

A mediados del decenio de 1960 se creó la Dependencia de Fitotecnia de los Laboratorios de Seibersdorf con objeto de apoyar el programa de mejoramiento genético de los cultivos emprendido por la División Mixta FAO/OIEA. En virtud de este programa se desarrollan técnicas nucleares en fitotecnia que se transfieren a los países mediante actividades de investigación y desarrollo en fitotecnia por mutaciones y técnicas biotecnológicas afines, la capacitación de científicos de los países en desarrollo, y la prestación de servicios de irradiación y de asesoría técnica.

Las primeras investigaciones que se llevaron a cabo en la Dependencia de Fitotecnia se centraron en la elaboración de métodos de inducción de mutaciones con radiación ionizante y agentes mutágenos químicos. Estas investigaciones tenían la finalidad de alcanzar una alta eficiencia mutagénica, es decir, una alta frecuencia de mutaciones adecuadas con un mínimo de daño para la planta y la mayor reproductibilidad posible. Para ello era necesario definir las características de las fuentes radiactivas en función de la homogeneidad de la dosis y la evaluación exacta de la dosis absorbida por objetivos biológicos mediante una dosimetría apropiada. Se recurrió frecuentemente a la irradiación de semillas con rayos gamma y neutrones dada la facilidad de manipulación, la simple normalización de factores que modifican la sensibilidad a las radiaciones y la buena reproductibilidad que se logran con este método. Un logro importante fue la creación de métodos para controlar los efectos de dependencia del oxígeno en la respuesta radiobiológica a la radiación electromagnética. El Laboratorio contribuyó ampliamente a la normalización de la irradiación neutrónica de semillas en reactores nucleares, estableciendo instalaciones especiales para este fin. Dichas instalaciones se conocen como SNIF (Instalaciones tipo para la irradiación neutrónica) en el caso de los reactores tipo piscina y USIF (Instalación blindada para la irradiación de uranio) en el caso de los reactores de tipo Triga.

Esta investigación sirvió de fundamento al servicio de irradiación que brindaron los Laboratorios del OIEA en todo el mundo basándose en el uso de neutrones rápidos y térmicos con una alta dosis de precisión y reproductibilidad de los efectos inducidos. Por otra parte, con la ayuda de compuestos marcados por isótopos se aplicaron tratamientos eficaces y precisos a las semillas con agentes mutágenos químicos, en su mayoría agentes de alquilación y azidas, y se compararon con la inducción de mutaciones mediante la radiación ionizante. La Dependencia ha

Estadísticas relativas a los servicios de radiación, 1967-1992

Muestras tratadas	20 329
Especies tratadas	217
Cultivares tratados	1 134
Estados Miembros beneficiarios	108
Muestras de semillas	17 872
Plantas de propagación vegetativa	1 046
Tratamiento con rayos gamma de cobalto 60	14 382
Tratamientos con neutrones rápidos	5 416
Otros tratamientos con mutágenos	531

Nota: Como ejemplos de las principales especies tratadas cabe mencionar los cereales (arroz, trigo, cebada, triticale, mijo, tef), las leguminosas (frijol de soya, mani, frijol común, caupí, judía de Mungo), las raíces y tubérculos (yuca, ñame, cocoyam, patata); las frutas (cítricos, manzana, albaricoque, melocotón, uva); y las plantas ornamentales (crisantemo, antirrhinum, achimenes, tulipanes) y otros (nabo, ajonjolí, amaranto, quinua, niger)

realizado estudios complementarios sobre la fitotecnia por mutaciones en cereales, leguminosas, productos agrícolas de uso industrial y cultivos de propagación vegetativa. Como las especies de cultivo tienen una capacidad reproductiva variable (número de progenies por planta) y un sistema de reproducción específico (reproducción sexual por autopolinización o polinización cruzada o propagación asexual) no es posible aplicar un método universal de reproducción y es preciso recurrir a procedimientos concretos según las especies. La mayoría de las especies de propagación vegetativa o asexual son difíciles de mejorar con métodos de cruzamiento convencional o de fitotecnia por mutaciones. Estos problemas pueden resolverse fácilmente empleando la biotecnología en combinación con la inducción de mutaciones. Por ello la Dependencia emprendió a mediados del decenio de 1980 un programa de actividades relacionadas con la fitotecnia por mutaciones *in vitro*. En los Laboratorios del OIEA las actividades de investigación y desarrollo y de capacitación en fitotecnia biotecnológica se dedicaron fundamentalmente a varios tipos de plantas alimenticias de gran importancia para la seguridad alimentaria de los países en desarrollo.

Actividades de investigación y desarrollo

La Dependencia centra su apoyo en los programas de investigación y cooperación técnica coordinados entre el OIEA y la FAO. Se brinda asistencia a numerosos proyectos mediante la prestación de servicios de expertos para la construcción de instalaciones destinadas al cultivo y tratamiento mutagénico de tejido vegetal, el control de calidad de la dosimetría de la irradiación mutagénica y el desarrollo y la transferencia de tecnologías nucleares para el mejoramiento de las plantas.

Entre las actividades de investigación y desarrollo en curso se incluye la aplicación de métodos nucleares y tecnologías avanzadas afines, como el cultivo *in vitro* y la genética molecular, destinados a la producción de una amplia diversidad de cultivos mediante la fitotecnia por mutaciones. Se ha otorgado máxima prioridad a la elaboración de métodos biotecnológicos para la obtención de plantas de reproducción vegetativa de gran importancia para los países en desarrollo.

En la actualidad se realizan actividades de investigación y desarrollo en las esferas siguientes:

● **Variaciones inducidas mediante agentes somaclonales y mutágenos.** Se realizan estudios sistemáticos para comparar la variación genética causada por la variación (somaclonal) de los cultivos de tejido con la variación inducida por irradiación y agentes químicos. Se estudia la variación genética en plantas de maíz obtenidas a partir de material de cultivo *in vitro* mediante la embriogénesis somática, con objeto de evaluar la índole de la variación somaclonal e inducida, así como su posible aplicación práctica en la fitotecnia.

● **Inducción de mutaciones y tecnologías de reproducción aplicadas al banano y el plátano.** Las técnicas tradicionales de reproducción hacen que la poca variación genética y la esterilidad limiten el

mejoramiento genético del banano y el plátano (*Musa spp.*). Se investiga el cultivo de brote terminal y la regeneración *in vitro* de plantas para su uso en la inducción de mutaciones y la selección de mutantes. Se utiliza la embriogénesis somática y la regeneración de plantas a partir de suspensiones de células de *Musa* con miras a elaborar procedimientos de manipulación de células somáticas en la reproducción del banano y el plátano. En los cultivos de tejido se estudian métodos para la selección de estas plantas en razón de su resistencia a la enfermedad de Panamá y se aplican marcadores bioquímicos (peroxidasa) para la identificación de genotipos tolerantes. Los marcadores de ADN se emplean para identificar mutantes y caracterizar cultivares y especies de *Musa*. Los clones mutantes identificados en los Laboratorios de Seibersdorf se prueban sobre el terrero en países tropicales.

● **Fitotecnia por mutaciones para elevar la tolerancia de la *Azolla* a los cambios ambientales.** El *Azolla* es un alga pequeña que vive en relación simbiótica con la cianobacteria *Anabaena* fijadora del nitrógeno. En condiciones de campo adecuadas la *Azolla* puede duplicar su peso cada 3 a 5 días. El sistema simbiótico *Azolla-Anabaena* sirve de abono vegetal para los cultivos en tierras anegadas, en particular el arroz. La mutagénesis inducida ha permitido obtener variedades de *Azolla* tolerantes a altos niveles de salinidad y aluminio tóxico, y a los herbicidas. Actualmente se investigan sobre el terrero algunas plantas tolerantes para confirmar si los cambios hereditarios aumentan la tolerancia a las tensiones impuestas por el medio ambiente.

● **Métodos de inducción de mutaciones y reproducción de cultivos de raíces y tubérculos tropicales (yuca y ñame).** La yuca y el ñame son uno de los cultivos de alimentos básicos más importantes de las tierras bajas del trópico. Se aplica la tecnología de fitotecnia por mutaciones para aumentar la variación en el tamaño de las plantas, el contenido de cianuro y la resistencia a enfermedades y plagas. Además, se emplean técnicas *in vitro* para la propagación de plantas sanas y clones mejorados. Se desarrolla la embriogénesis somática para el mejoramiento de la yuca y el ñame mediante la mutagénesis *in vitro* y posteriormente, mediante la manipulación de células somáticas. Se preparan clones mutantes y poliploides para su ensayo sobre el terreno en los Estados Miembros.

● **Cultivo de tejidos de cacao como sistema para lograr una fitotecnia por mutaciones más eficiente.** Los esfuerzos por obtener nuevas variedades de cacao más resistentes a las enfermedades han arrojado escasos resultados. Una limitante importante es la poca variación que existe en los cultivares de que se dispone en la actualidad. Se aplica la embriogénesis somática para la propagación de genotipos apropiados, la que mediante la mutagénesis *in vitro* y la mutagénesis del polen, se está aplicando para inducir variedades de cacao resistentes a los virus en Ghana.

Las investigaciones sobre fitotecnia que llevan a cabo los Laboratorios de Seibersdorf están orientadas directamente a la solución de problemas y a las necesidades de los clientes. Científicos auxiliares de los países en desarrollo han alcanzado numerosos resultados positivos en su labor científica durante el período en que han estado asignados al programa de

becas de capacitación del OIEA. Los Laboratorios de Seibersdorf reciben cultivares y material genético procedentes de países tropicales que se llevan a condiciones de cultivo de tejidos y se emplean en trabajos experimentales. Las directrices y técnicas diseñadas concretamente para un cultivo o un genotipo en particular se aplican luego directamente en los programas nacionales. Además, el material genético obtenido de las líneas de mutantes y clones que esté listo para ser ensayado sobre el terreno se envía de Seibersdorf a los Estados Miembros en desarrollo en apoyo de sus programas de fitotecnia.

Capacitación de fitogenetistas

La capacitación en materia de fitotecnia es el elemento de la transferencia de tecnología en que se trabaja más arduamente en los Laboratorios de Seibersdorf. Durante 20 años, la Dependencia de Fitotecnia ha apoyado el programa de becas del Organismo y organizado cursos interregionales de capacitación. Las actividades de capacitación están estrechamente vinculadas a los esfuerzos de investigación y desarrollo relacionados con el mejoramiento de los cultivos y la aplicación de técnicas nucleares en la fitotecnia. (*Véanse los gráficos*). Durante un período de tres a doce meses, los becarios suelen trabajar con la mutagénesis inducida por radiación o con agentes químicos en especies de plantas cultivadas en sus países de origen. Siempre que es posible, la capacitación se organiza en pequeños grupos de dos a cinco becarios para solucionar problemas comunes. Los experimentos se diseñan de forma individual para garantizar que las técnicas de laboratorio y los resultados puedan aplicarse directamente en sus institutos de origen una vez concluida la capacitación.

Como resultado de su trabajo, los becarios han presentado numerosos trabajos científicos en publicaciones periódicas de prestigio internacional y en actas de simposios. Con mucha frecuencia, como complemento de su beca en Seibersdorf, los becarios participan en proyectos coordinados de investigación y cooperación técnica del OIEA.

Desde 1982, los Laboratorios de Seibersdorf patrocinan el Curso de Capacitación Interregional FAO/OIEA sobre "La inducción y el uso de mutaciones en la fitotecnia". Todos los años, 20 participantes procedentes de diferentes Estados Miembros de la FAO y el OIEA asisten a este curso intensivo de capacitación que por lo general se extiende de 6 a 8 semanas. Mediante conferencias, ejercicios de laboratorio, evaluaciones de experimentos sobre el terreno, seminarios y excursiones, los participantes conocen lo más avanzado en técnicas de mutación y métodos biotecnológicos y de biología molecular para el mejoramiento de los cultivos. Se brinda capacitación especial sobre la manipulación segura de fuentes radiactivas, radisótopos y agentes químicos mutagénicos particularmente peligrosos. Al final de cada curso los participantes están en condiciones de debatir y evaluar la posible función de las mutaciones inducidas y las técnicas biotecnológicas avanzadas en sus programas nacionales de fitotecnia para el mejoramiento concreto de cultivos de cereales,

leguminosas, plantas oleaginosas, forraje, verduras, frutas, raíces y tubérculos, palmas, caucho y otras plantas.

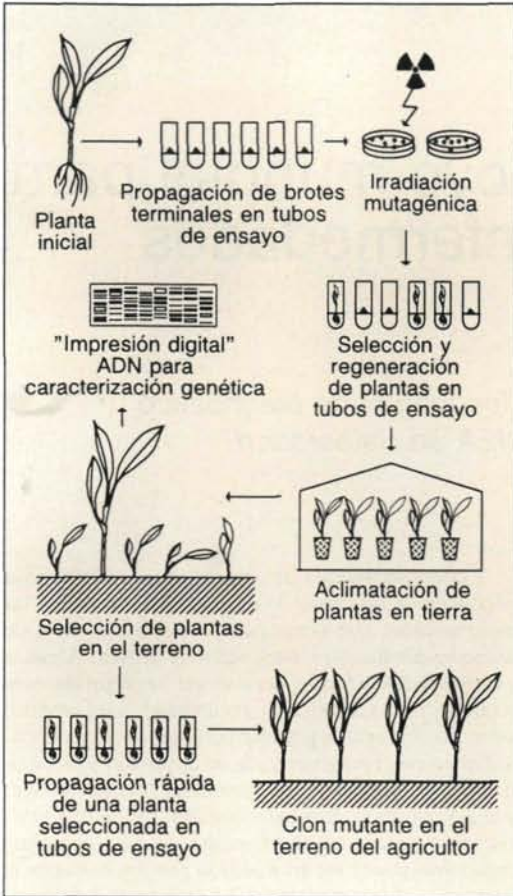
Apoyo a los programas nacionales

Los Estados Miembros de la FAO y el OIEA reciben a título gratuito el servicio de tratamiento radiactivo por irradiación para estimular la aplicación de técnicas nucleares en los programas de mejoramiento de los cultivos y apoyar directamente a los fitogenetistas de los países en desarrollo. Se aplica tratamiento mutagénico a semillas, bulbos, tubérculos, injertos, esquejes, y cultivos de tejido ("materiales *in vitro*") con dosis precisas de radiaciones gamma y de neutrones rápidos. Se calibran cuidadosamente las dosis para lograr efectos reproducibles. Se pide a los usuarios de este servicio que informen sobre los objetivos que persigue el proyecto de fitotecnia por mutaciones aplicado y que envíen un material adecuado (tamaño de la población) para garantizar una alta probabilidad de mutaciones inducidas con las características deseadas. Además, con frecuencia se realiza un ensayo previo de radiosensibilidad en invernadero para evaluar las dosis de radiación que resulten más útiles para la amplia variedad de muestras biológicas que se utilizan en la fitotecnia por mutaciones. Los materiales tratados se envían acompañados de directrices de irradiación detalladas con la solicitud de que se comuniquen los efectos de la radiación inducida en la primera y segunda generación de mutantes. Esta información resulta necesaria para mejorar las estimaciones de radiosensibilidad de las especies y cultivares procedentes de distintos medios.

Durante los últimos 25 años la Dependencia ha prestado servicios de irradiación con respecto a más de 20 000 muestras procedentes de la mayoría de los Estados Miembros de la FAO y el OIEA (*Véase el cuadro*). En muchos de estos casos las muestras de semillas fueron irradiadas con rayos gamma de cobalto 60.

No obstante, últimamente se han hecho más frecuentes las solicitudes asociadas con el tratamiento mutagénico de materiales *in vitro* y la técnica de neutrones rápidos. Ello refleja la creciente importancia de la biotecnología y la genética molecular en los programas de mejoramiento de plantas.

Antes de iniciar los servicios de irradiación se habían difundido oficialmente menos de 80 variedades de mutantes. En los últimos 25 años, se han difundido más de 1500 cultivares de cultivos y plantas ornamentales con características considerablemente mejoradas: mejor rendimiento y calidad, mayor valor de mercado y resistencia o tolerancia a las enfermedades y los cambios climáticos. Algunas de estas variedades de mutantes se han obtenido gracias a los servicios de irradiación que prestan los Laboratorios de Seibersdorf.



Mejoramiento de bananos obtenidos mediante la fitotecnia por mutaciones utilizando radiación ionizante. A la izquierda: El esquema representa un sistema de fitotecnia por mutaciones del banano.

El banano, y el plátano de cocina son diferentes cultivares y especies pertenecientes al género botánico *Musa*. El bananero es en realidad una gran planta herbácea cuyos frutos constituyen uno de los alimentos más importantes para cientos de millones de personas de los países en desarrollo. La producción mundial asciende a más de 70 millones de toneladas anuales y un 90% de la cosecha se emplea como alimento para el consumo doméstico. La industria del banano genera un ingreso de cerca de 1700 millones de dólares anuales para los países en desarrollo que exportan este producto.

El cultivo del banano y el plátano se ve seriamente amenazado por varias enfermedades causadas por hongos patógenos, bacterias, virus, y nemátodos. Algunos de ellos pueden combatirse con plaguicidas; no obstante, el patógeno más epidémico, el *Fusarium*, es un hongo de tierra que provoca la enfermedad de Panamá. No existe ningún control químico eficaz contra la propagación de este hongo en los suelos infestados. La enfermedad de Panamá ha devastado varios cientos de miles de hectáreas de plantaciones de banano en América Central y ha creado graves problemas en África, donde muchas personas dependen del plátano o del plátano de cocina como parte de su régimen básico de alimentación. La única forma de resolver este problema es reproduciendo variedades más resistentes a la enfermedad.

La producción de banano a nivel mundial se basa en un número muy limitado de clones no mejorados genéticamente que son seleccionados en la naturaleza y después domesticados. Aunque la reproducción cruzada ha contribuido en cierta medida a la reproducción del banano, las variedades más importantes son totalmente estériles y, por tanto, imposibles de mejorar mediante las técnicas convencionales de reproducción.

En 1985 comenzaron en los Laboratorios de Seibersdorf las investigaciones sobre la inducción de mutaciones en el banano mediante su exposición a las radiaciones y las técnicas de cultivo de tejidos. Se aislaron los brotes terminales de diferentes cultivares de banano y plátano económicamente importantes y se reprodujeron en pequeña escala en tubos de ensayo con medios artificiales. Se aplicaron varios tipos de irradiación mutagénica (rayos gamma y neutrones rápidos) en las células de brotes terminales apicales en activo crecimiento que se regeneraron en plantas. Esta investigación propició el desarrollo de clones mutantes del más importante cultivar del banano del desierto, el "Grand Nain". En estos momentos se prueban estas variedades en varios países para evaluar sus resultados agronómicos, incluidos rendimiento, calidad del fruto, y cosecha más temprana.

El Laboratorio de Seibersdorf brinda su apoyo a un programa coordinado de investigación para el mejoramiento de los cultivos del género *Musa* y coopera en diferentes proyectos de cooperación técnica para emprender programas nacionales de fitotecnia en Colombia, Panamá, Costa Rica, Cuba, Ghana, Malasia y Tailandia.

Los últimos descubrimientos en la biología molecular han hecho posible caracterizar los genomas de las plantas e identificar marcadores para su uso práctico en la fitotecnia. La clasificación genética de los cultivares y mutantes de banano abre nuevas perspectivas para la reproducción de estos cultivos genéticamente "recalcitrantes" que resultan de vital importancia para la población de los países en desarrollo.

Reproducción de bananos más resistentes