Riesgos y peligros de la dispersión de

Actualmente estamos frente a la posibilidad de que se apruebe la liberación de líneas de maíz transgénico en el campo mexicano. Las consideraciones sobre lo deseable y seguro de esta tecnología para nuestro país han sido guiadas por intereses políticos y económicos privados, más que por estudios científicos concluyentes, dejando de lado además las consideraciones sociales y ambientales. Estos intereses han moldeado y apresurado un marco regulatorio encaminado a posibilitar la liberación de las líneas comerciales disponibles de maíz transgénico en el campo mexicano, lo cual desencadenaría un conjunto de riesgos y peligros.

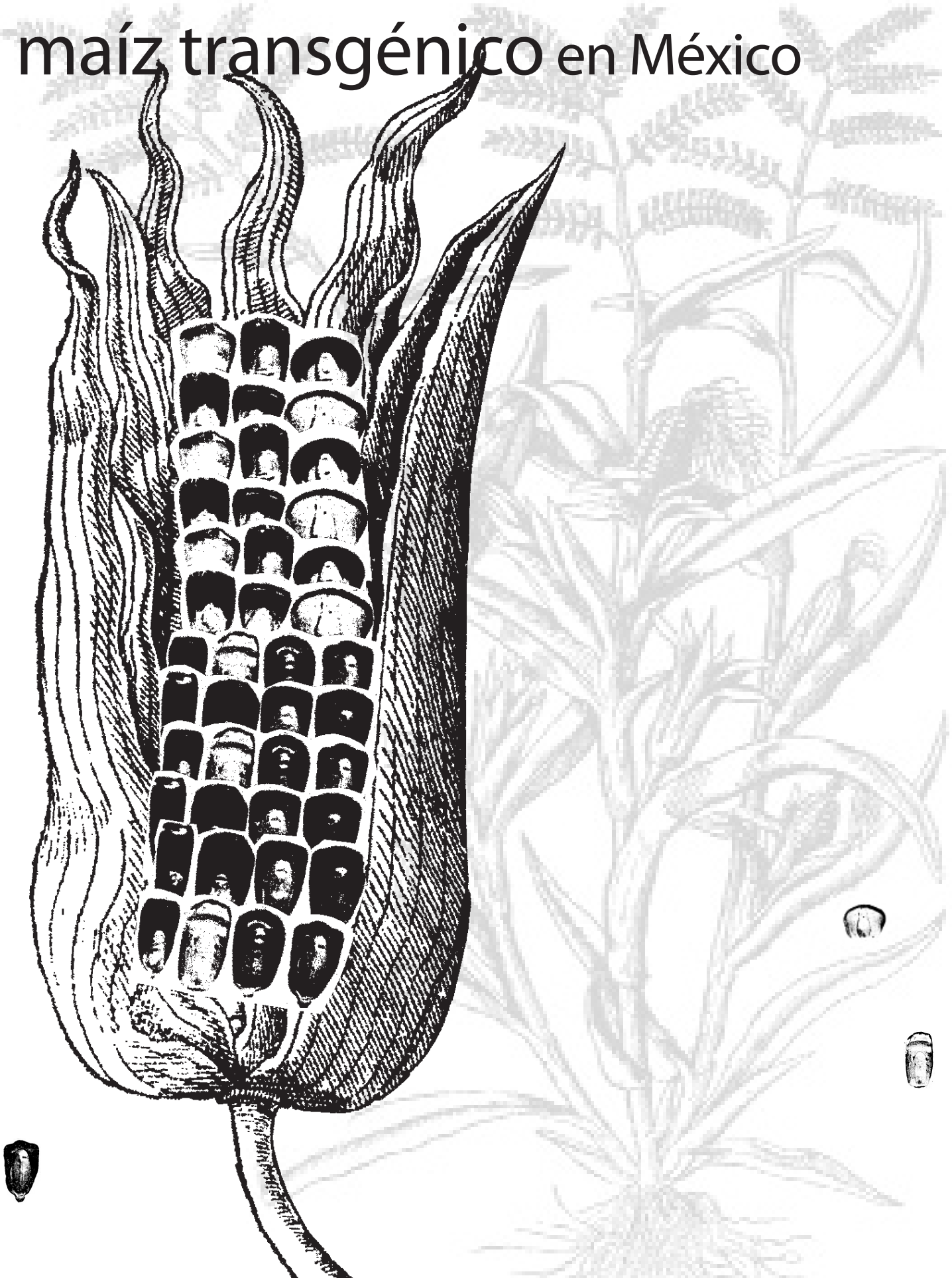
Lo que es peor, en el caso particular del maíz transgénico se sabe ya que estos desarrollos son obsoletos en términos tanto científicos como tecnológicos, aun para las condiciones de agricultura industrializada para los que fueron creados originalmente, debido a que se basan en un paradigma científico ya superado: un gen determina un rasgo visible —fenotípico— de manera simple y prácticamente independiente del resto de los genes del organismo y del ambiente en donde se desarrolla dicho organismo. Mientras se creaban los primeros organismos genéticamente modificados (OGM), este paradigma ya era cuestionado con base en innumerables datos experimentales y modelos formales. Sin embargo, se siguen desarrollando transgénicos con base en este paradigma y se promueve su comercialización y dispersión en el ambiente sin medir las consecuencias. ¿Cuáles son los riesgos de dicha liberación?

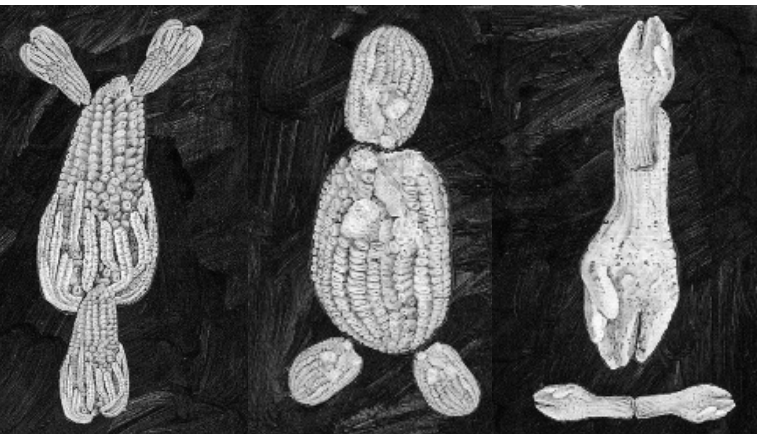
Para evaluar los riesgos e incertidumbres del uso de una tecnología se han elaborado diferentes protocolos de evaluación que analizan diferentes niveles en los cuales un desarrollo tecnológico puede presentar peligros, riesgos e incertidumbres. En el caso de los organismos genéticamente modificados, uno de los protocolos más acabados presentados hasta el momento por una autoridad nacional o supranacional es el elaborado por el panel científico consultado por la Autoridad Europea de Seguridad de los Alimentos. Este protocolo contempla que el análisis de bioseguridad de un OGM específico debe hacerse en varios niveles y mínimamente incluir: las características biológicas del(os) organismo(s) de donde se obtuvieron las secuencias transgénicas; las características biológicas del organismo receptor; el proceso de transformación genética; las características de la(s) proteína(s) recombinante(s), tanto su toxicidad para el hombre y los animales como la posibilidad de transferencia horizontal de los (trans)genes que las codifican hacia otros organismos, así como los posibles riesgos de su liberación al ambiente en diversos contextos.

Lo notable de este documento es que hace referencia explícita a que la evaluación de los posibles efectos negativos o peligros de la liberación de un OGM particular debe hacerse caso por caso, en donde un "caso" está conformado por el OGM mismo y sus características, pero también por el ambiente y el contexto agrícola en el cual se usará, así como por sus posibles usos. Para la liberación al ambiente de un OGM es necesario evaluar los posibles peligros

Elena Álvarez-Buylla Roces y Alma Piñeyro Nelson

maíz transgénico en México





(que definimos aquí como la fuente del riesgo, y se refiere a una sustancia o a una acción que puede causar daño) y riesgos (la posibilidad de sufrir un daño por la exposición a un peligro), los cuales se hallan contenidos unos en otros —como las muñecas rusas, de manera jerárquica, debido a los distintos niveles de organización de los sistemas biológicos por lo que se les llama "anidados"—, de acuerdo con parámetros ecológicos ambiente-específicos, pero también considerando las condiciones socioeconómicas bajo las cuales se usarán tales desarrollos.

De manera muy simplificada y esquemática, los principales niveles de riesgos e incertidumbres son: 1) la construcción recombinante o transgénica propiamente dicha, que incluye el o los genes que codifican para las proteínas objeto de la biotecnología, así como las secuencias reguladoras que determinan en dónde y cuándo se expresará dicho gen; las secuencias que permiten la selección de las plantas que resultan transgénicas y, finalmente, secuencias importantes para la transcripción del o los genes de interés (figura 1); 2) el contexto genómico y proteómico, así como el fondo genético de la planta receptora, en el cual se integrará la construcción recombinante y del cual dependerá el efecto fisiológico o morfológico del transgén; 3) el contexto ambiental en el cual se usará la planta transgénica; 4) el contexto agrícola-tecnológico de la zona o país en donde se liberará la planta transgénica; 5) el contexto socioeconómico —cultural, forma de uso, importancia alimentaria, organización de la producción agrícola, distribución, etcétera— de la región y país en que se usará la planta transgénica bajo evaluación.

El esquema de anidamiento de incertidumbres, riesgos e insuficiencias deja claro que aquellos que surjan en los niveles más internos tendrán implicaciones más generales que los que surjan por fenómenos a niveles superiores, dentro de contextos económicos, sociales y culturales que si bien operan de manera independiente con los niveles inferiores, se traslapan con éstos, potenciando o atenuando los riesgos e incertidumbres presentes en los niveles basales. Más aún, dentro de las evaluaciones de riesgo, algunos niveles tendrán interacciones más relevantes —por ejemplo los riesgos e incertidumbres propios del nivel fisiológico de la transformación genética serán más importantes cuando se evalúe la posibilidad de toxinas que afecten la alimentación de la población, que los riesgos derivados de la transgénesis per se, que están en un nivel inferior. En contraste, para evaluar la posibilidad de flujo génico, el nivel agroecológico será el más relevante, tanto en las consideraciones de impacto a nivel social, como a nivel económico (figura 2). Así, los efectos que se derivan de factores o peculiaridades de los niveles superiores serán relevantes únicamente para los casos en donde se presenten las condiciones específicas asociadas a dicho contexto y riesgo e incertidumbre particular surgido de un nivel superior.

Así, las consecuencias de los maíces transgénicos en países para los cuales el maíz es el alimento básico, con la relevancia nutricional, ambiental, económica, social y cultural que esto conlleva, serán muy distintas a las que ten-

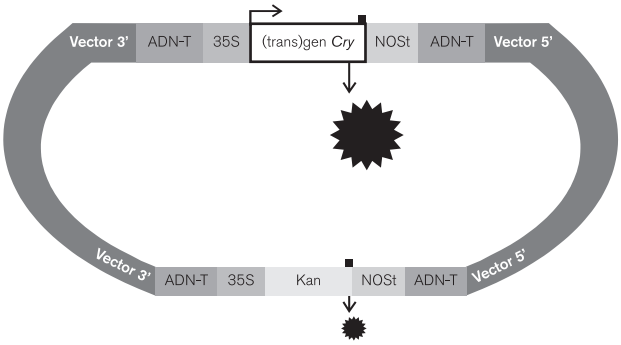
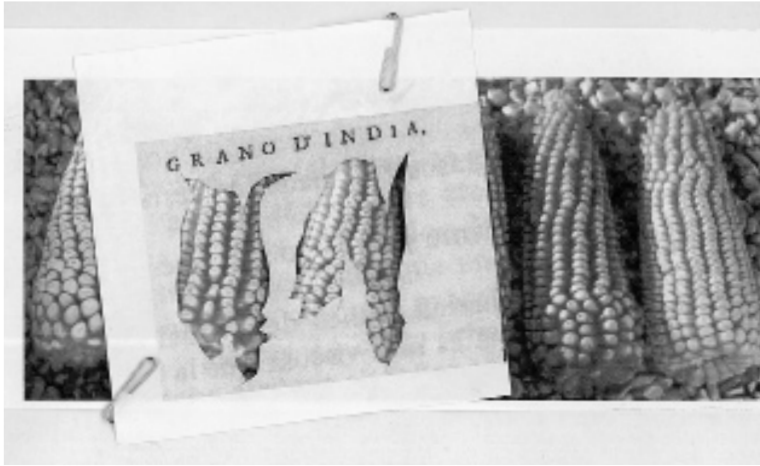


Figura 1. Esquema de un plásmido de transformación hipotético (vector), que lleva dos construcciones recombinantes: una que expresa el gen Cry de Bacillus thuringensis, que es el transgen de interés (caja blanca; proteína-estrella en gris), y otra construcción que expresa el antibiótico Kanamicina (Kan), utilizado como marcador de selección (caja gris claro; proteína-estrella gris con puntos blancos). Ambas construcciones tienen secuencias que no serán traducidas a proteína: cajas negras: extremos 3' y 5' del vector (plásmido); cajas grises: ADN de transferencia (ADN-T); éste se encuentra presente si la transformación fue mediante infección por Agrobacterium tumefasciens. Cajas con puntos: secuencias reguladoras. Lado izquierdo: promotor 35S del virus del mosaico de la coliflor (35S); lado derecho: terminador NOS, nopalina sintetasa, aislado de Escherichia coli (NOSt); flecha: inicio de la transcripción; rectángulo negro: fin de la transcripción.

drán estos desarrollos en otros países donde no lo es. Por los riesgos e incertidumbres del uso de este tipo de organismos, así como por la percepción social de los mismos, en los países para los cuales el arroz (Japón e India) y el trigo (Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y Europa) son los cereales básicos y se consumen masivamente de manera directa (como sucede con el maíz en México), ha habido mucha resistencia a la liberación de líneas transgénicas de estos cultivos. Sólo cinco líneas de arroz GM han sido aprobadas para su liberación al ambiente en espacios restringidos dentro de Canadá y Estados Unidos, mientras que siete líneas de trigo GM han sido liberadas al ambiente en espacios pequeños dentro de Canadá y Estados Unidos, pero no se ha aceptado la comercialización a gran escala de líneas transgénicas, como ha sucedido con el maíz. La protección de este último, corresponde a México y nuestro gobierno.

El análisis de los niveles de anidamiento es útil para discernir en qué punto de la cadena productiva puede haber riesgos o incertidumbres al usar tecnologías que no son claramente peligrosas. Tal es el caso de los maíces transgénicos de uso agrícola —conocidas popularmente como Bt y RR—, comercializados hasta el momento. Sin embargo, hay desarrollos tecnológicos que implican peligros contundentes para la salud y el medio ambiente en prácticamente



todos los niveles, sin importar la dinámica humana de los niveles superiores. En este caso no es conveniente minimizar los riesgos en ninguno de los niveles, por más pequeños que sean. Ejemplos de este tipo de desarrollo biotecnológico son los nuevos eventos de transformación en maíz que producen sustancias para uso farmaceútico —anticoagulantes, vacunas, reactivos experimentales, anticuerpos y muchas otras proteínas recombinantes para uso experimental, no especificadas y protegidas por secreto de empresa— e industrial —plásticos, solventes y otros.

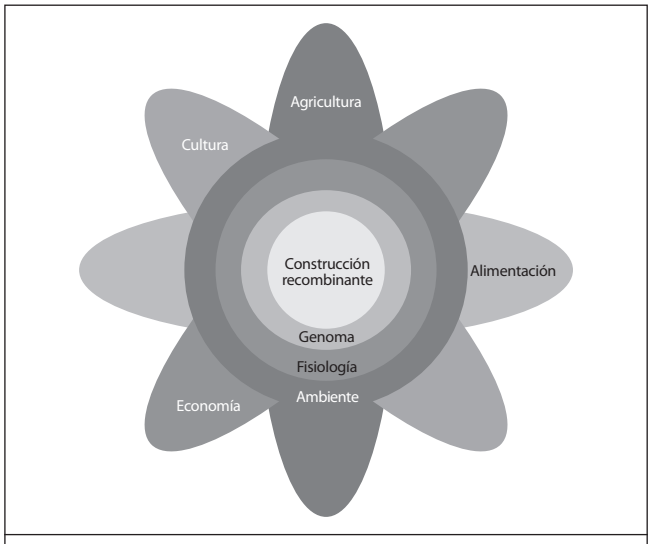


Figura 2. Niveles de riesgo anidados a partir del proceso de transgénesis y actividades humanas en donde puede haber traslape, dando pie a interacciones con peligros, riesgos e incertidumbres particulares, si se libera un OGM al ambiente y éste entra a la cadena productiva y alimentaria. Los niveles anidados considerados son; construcción recombinante; genoma; fisiología; ambiente, mientras que las dinámicas humanas consideradas son agricultura, alimentación, cultura y economía.

Construcciones recombinantes en maíz

El promotor viral 35S y los cassettes de resistencia a antibióticos. En este caso, el primer nivel de anidamiento está dado por las secuencias génicas reguladoras presentes al interior de la construcción quimérica en donde se encuentra fusionado el gen que codifica para la proteína objeto de la transgénesis. En la figura 1 ilustramos una construcción que contiene uno de los desarrollos económicamente más importantes en maíz transgénico: el que expresa una variante de la proteína Cry de la bacteria Bacillus thuringiensis —llamado maíz Bt. La construcción recombinante contiene por lo menos tres secuencias: una promotora, el gen de interés y otra terminadora. Es pertinente considerar la función de cada una de las secuencias usadas: a) secuencia promotora que dirige la expresión de un gen —gen Bt, en este ejemplo; b) (trans)gen de interés: codifica para la proteína que se quiere producir en un organismo genéticamente transformado, c) secuencia terminadora de la transcripción del mismo gen, que delimita hasta dónde llega el ADN polimerasa; d) secuencia utilizada como marcador

de selección, que sirve para determinar qué plantas han sido transformadas exitosamente —hasta ahora la estrategia más utilizada ha sido la cotransformación con genes que expresan una proteína que confiere resistencia a un antibiótico, en particular la kanamicina y otros de la familia de las penicilinas, o resistencia a herbicidas; e) secuencias flanqueadoras de la construcción recombinante que pueden aumentar las posibilidades de inserción exitosa en el genoma receptor. Todas las secuencias enlistadas, salvo la b no son objeto directo del desarrollo biotecnológico elaborado, sin embargo, sí se integran en el genoma de la planta receptora e implican peligros y riesgos importantes que consideramos en este apartado.

El promotor 35S del virus del mosaico de la coliflor. Esta secuencia promotora es una secuencia reguladora de la expresión de un gen que provoca una expresión fuerte y constante del gen bajo su acción. Es una secuencia originalmente aislada de un virus que provoca la enfermedad del mosaico en la coliflor. En un inicio se creía que sólo funcionaba en plantas dicotiledóneas de la familia Brassicaceae, como la coliflor, en la cual fue aislada y caracterizada a partir del virus del mosaico. Sin embargo, experimentos posteriores demostraron que este promotor podía ser funcional en otras plantas, tanto dicotiledóneas como monocotiledóneas, y en bacterias como Escherichia coli, Agrobacterium rhizogenes así como en células humanas.

Dada su eficiente y alta expresión en todo tipo de tejidos durante las etapas del desarrollo de las plantas —expresión ectópica y constitutiva—, ha sido el promotor más utilizado en la transformación genética de plantas. En el caso del maíz, ha sido utilizado en más de 85% de los eventos de maíz transgénico liberados al ambiente y muchos de ellos comercializados en diferentes partes del mundo.

La primera incertidumbre y potenciales riesgos a nivel de las construcciones recombinantes que incluyen este promotor surge justamente del hecho de que es un promotor de origen viral y los virus nunca transfieren sus secuencias promotoras a los genomas de las plantas o a los animales que infectan. Este hecho es relevante por varios motivos; por un lado, este promotor ha sido progresivamente modificado para expresarse de manera constitutiva e independiente del contexto genómico en el que se encuentre, fenómeno que se ha corroborado en diferentes organismos, incluidos tejidos humanos. También se ha documentado que puede activar y dirigir la expresión de genes que estén río abajo del sitio de inserción de la construcción transgénica que lo contiene, dichos genes pueden entonces ser endógenos o propios del organismo transformado genéticamente, y no sólo los genes de interés.

Al interior de los genes presentes en el genoma de muchos seres vivos, incluidas las plantas y humanos, se encuentran secuencias originarias de virus, mismas que podrían ser activadas por un promotor 35S. En el caso del ser humano esto sería mucho más difícil pues involucraría la transferencia de genes exógenos mediante técnicas como las utilizadas en terapia génica o por algún otro mecanismo de transferencia horizontal. Pero en el caso de las plantas, se han documentado casos en donde el promotor 35S ha activado ectópicamente un gen endógeno o ha silenciado los propios transgenes que dirige u otros genes de la planta receptora.

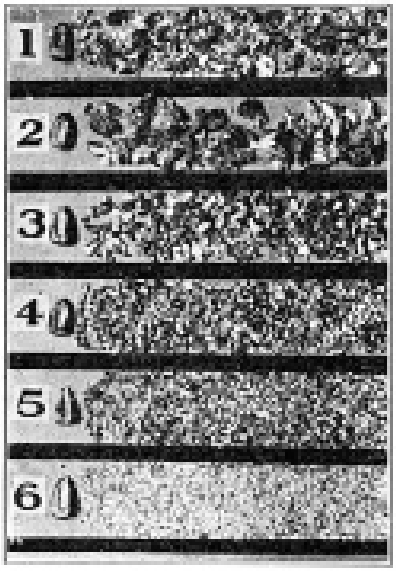
Por otro lado, la presencia de esta secuencia dentro del genoma de un organismo puede ser un factor intrínsecamente desestabilizador ya que contiene secuencias que han sido caracterizadas como hot-spots de recombinación, esto es, regiones que favorecen la unión al ADN de recombinasas, las cuales a su vez pueden cortar y pegar el ADN de manera aleatoria. Esto ha sido comprobado en virus, pero existe la posibilidad de que lo mismo ocurra cuando este promotor es insertado en otros genomas —es un hecho que no ha recibido la suficiente atención científica.

Algunos de los desarrollos comercializados en los últimos tres años han comenzado a utilizar otros promotores, como el de la ubiquitina y zeína del maíz o arroz, los cuales se expresan de manera más específica, tanto temporal como espacialmente, al interior de un planta. Sin embargo,

el promotor 35S sigue siendo el más utilizado en los eventos disponibles comercialmente.

Contexto genómico

En este nivel podemos, a su vez, distinguir varios tipos de riesgos: aquellos derivados de la presencia de secuencias reguladoras que funcionan de manera autónoma —y comúnmente ectópica con respecto al contexto genómico en que se insertan; tal es el caso del promotor 35S. También están los riesgos derivados de que una construcción transgénica se fragmente al ser introducida en una planta. Esto último es bastante común cuando se usan métodos de transformación por medios físicos, como la biobalística, que es ampliamente usada en la transformación de maíz, y otras monocotiledóneas que eran históricamente recalcitrantes a la transformación in planta mediada por la infección con Agrobacterium tumefasciens, que debe ser previamente modificada para llevar a cabo la construcción recombinante en su plásmido. En caso de fragmentación, las secuencias exógenas se quedan dispersas dentro del genoma receptor, y pueden interferir con la expresión de un gen si son insertadas dentro de su secuencia codificante, lo cual anularía la expresión de un gen funcional. Otra posibilidad es una afectación a nivel epigenético, lo cual sucede cuando los fragmentos de la construcción recombinante son secuencias reguladoras —promotores u otros enhancers— que están lo suficientemente cerca de un gen endógeno como para modificar su expresión.



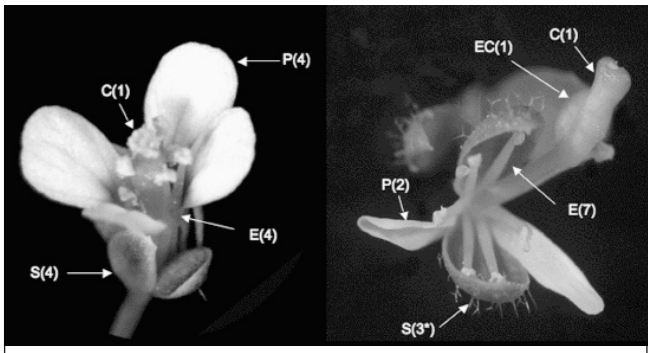
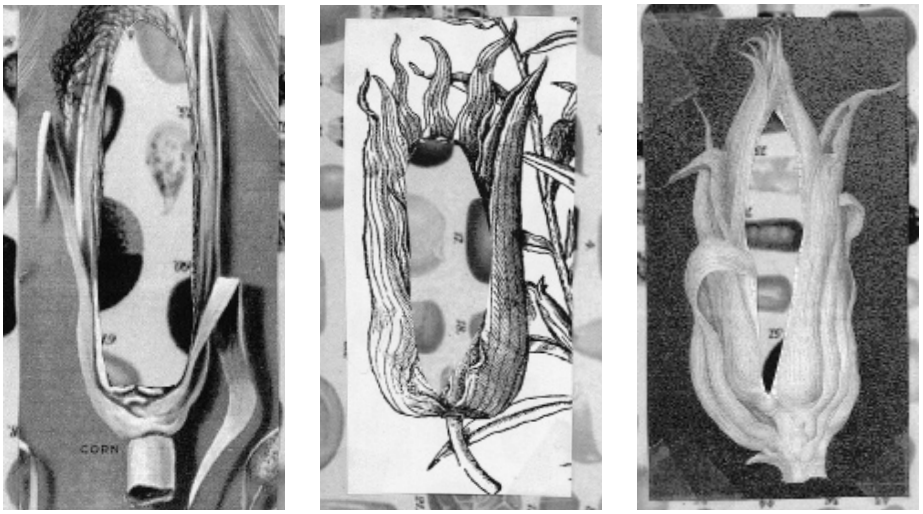


Figura 3. Comparación entre las flores de dos plantas hermanas producto de autofecundación que fueron transformadas con un gen MADS dirigido con el promotor 35S CAMV. La flor de la izquierda (a) es de tipo silvestre, mientras que la flor de la derecha (b) presenta aberraciones morfológicas severas. La única diferencia genética entre ambas plantas es el sitio de inserción de la construcción transgénica. Abreviaciones: S-sépalos; P-pétalos; E-estambres; C-carpelo; EC-estructura cilíndrica. Entre paréntesis están el número de órganos de cada tipo. Estos sépalos presentaban diferentes aberraciones morfológicas notorias, como el tipo de tricomas en su superficie.

Otro riesgo relacionado con los anteriores, que surge en el nivel del genoma de la planta receptora, se desprende del hecho de que el efecto de un gen en el fenotipo —conjunto de rasgos fisiológicos o morfológicos de un ser vivo— depende del contexto genómico en el cual se encuentra dicho gen. En el caso específico de los transgenes, usamos un ejemplo de nuestro laboratorio para ilustrar cómo el sitio de inserción de una construcción recombinante puede afectar el fenotipo. En la figura 3 se muestran dos plantas gemelas, idénticas genéticamente, que sólo difieren entre sí en la localización del transgen insertado. En este caso, es una construcción que incluye el promotor 35S, un gen de la familia MADS, un terminador de la transcripción NOS —gen de la Nopalina-sintetasa, aislado de E. coli—, un gen de resistencia al antibiótico Kanamicina y secuencias que flanquean la construcción transgénica derivadas de Agrobacterium tumefasciens, las cuales permiten la inserción de la construcción recombinante en el genoma de Arabidopsis thaliana. Estos experimentos se hacen bajo estrictas condiciones de bioseguridad en un laboratorio biocontenido con el fin de entender cómo son y cómo funcionan las redes genéticas que regulan el desarrollo vegetal.

Como se ve en la figura 3, lo sorprendente es que a pesar de que las plantas transformadas son todas gemelas idénticas, porque Arabidopsis thaliana se autofecunda, algunas son de tipo silvestre (a) y otros no (b). Este hecho resulta de la imposibilidad de controlar el sitio de inserción de un transgén y del efecto sobre el mismo contexto genómi-



co en el cual cae el transgén, el organismo receptor. En el caso de los OGM para fines comerciales en países como Estados Unidos, este hecho no tiene gran relevancia, pues las compañías seleccionan a posteriori las líneas con el fenotipo adecuado para sus fines, establecen líneas puras y de ellas distribuyen semillas para su venta.

De cualquier manera, para un rango de condiciones parecidas a las usadas durante la selección a posteriori de las líneas transgénicas, éstas deben comportarse más o menos igual. Esto es cierto, y por ello los campos de maíz transgénico en Estados Unidos raramente muestran plantas aberrantes o con comportamientos extraños. Sin embargo, en el caso de México y de otros países en los que se encuentran variedades cultivadas y silvestres interfértiles con las transgénicas, el riesgo de efectos no deseados puede tener implicaciones mayores. En estas condiciones los transgenes estarán en contextos genómicos diversos y muy distintos a los de los maíces usados en la transformación inicial. El riesgo de efectos inesperados en generaciones posteriores dependerá de la probabilidad de flujo génico que se discute más adelante y opera en el nivel del sistema agroecológico en que se usarán los transgénicos.

El otro riesgo en el nivel genómico derivado de la transgénesis es el aumento en la labilidad e inestabilidad genómica del genoma receptor, lo cual incrementa la potencialidad de recombinaciones ilegítimas o mutaciones espontáneas. Esto puede resultar del daño físico que es producido en el ADN del genoma receptor cuando se introducen construcciones transgénicas por medios físicos, pero también podría suceder en la transformación por infección con Agrobacterium tumefasciens. En el caso de la biobalísitica, se rompe la cubierta celular y nuclear, así como la integridad del ADN, mediante la introducción a alta velocidad de partículas de oro o tungsteno recubiertas con la construcción transgénica de interés. El ADN incorpora la construcción transgénica al ser reparado por la maquinaria subcelular endógena. Este tipo de efectos potenciales por la transgénesis ha sido advertido pero no se ha documentado rigurosamente.

Los sitios de rompimiento e introducción del transgén cuando se usa la biobalística son aleatorios y deben ser reparados independientemente de si se incorpora la construcción transgénica completa, parcial o no, lo cual generará procesos de recombinación ilegítima al interior del genoma receptor. En cualquier caso, si la transgénesis genera mayores tasas de mutación o no, es algo que ha recibido muy poca atención y sin duda debería investigarse con mayor rigor antes de liberar una planta transgénica al ambiente, sobre todo si dicha planta puede entrecruzarse con otras locales. Estas incógnitas no han sido investigadas para el caso de la posible introducción de maíz transgénico en México.

Contexto fisiológico

Las proporciones y cantidades de proteínas producidas por una planta transgénica en comparación con su isolínea no transgénica se pueden ver trastornadas, llevando a la planta a producir más de cierto tipo de proteínas que de otras. Esto puede suceder en ciertas partes y momentos del desarrollo, o en todos ellos y es una posibilidad que ha sido corroborada para un evento de maíz transgénico (MON810),

en donde estudios proteómicos demostraron que por lo menos 100 proteínas estaban modificadas, mientras que 43 de éstas tenían aumentos o disminuciones significativas frente al perfil proteico de una planta no transgénica, con el mismo fondo genético que la MON810 y cultivada bajo las mismas condiciones controladas que las plantas transgénicas. Este estudio fundamenta la necesidad de poner a prueba las modificaciones fisiológicas de las plantas transgénicas a niveles más finos de las hechas hasta ahora, y deben abarcar otras sustancias, además de las producidas por el transgén de interés.

En otro estudio menos exhaustivo, se observó que la cantidad de lignina producida por una planta transgénica (MON810) aumentaba significativamente en comparación con su contraparte no transgénica. Estos dos estudios ponen de manifiesto que en ciertos contextos fisiológicos, la transgénesis puede modificar por lo menos la proporción y cantidad de proteínas totales producidas como consecuencia no deliberada de la transgénesis. Si bien estos cambios pueden conferir ventajas adaptativas a las plantas que las posean, también podrían ir en su detrimento. Por ejemplo, cabe también la posibilidad de que se produzcan compuestos tóxicos o alergénicos, además de que en el caso de conferir ventajas adaptativas, si también expresan fármacos u otras substancias no aptas para el consumo, la ventaja adaptativa implicaría un mayor riesgo de expansión y contaminación no deseada y sería difícil controlar las líneas biorreactoras.

Tampoco se sabe qué efectos e interacciones ocurrirán cuando se acumulen varios transgenes en una misma planta, algo que es plausible en condiciones como las de México, donde se puede dar la polinización cruzada repetida con varias líneas transgénicas distintas.

Escala agroecológica

Los más relevantes riesgos, incertidumbres y peligros de liberar maíz transgénico al ambiente son aquellos que surgen en el nivel agroecológico, y que están relacionados con el hecho de que México es el centro de origen y diversificación del maíz (Zea mays ssp. mays), así como de diferentes especies de teocintle, con los que se puede entrecruzar —en especies como Zea mays ssp. parviglumis, el teocintle más cercano al maíz, dicha tasa de hibridización puede alcanzar frecuencias de hasta 50%.

Varios estudios paleontológicos han fechado las primeras mazorcas de maíz descubiertas en una cueva del valle de Tehuacán, entre los estados de Puebla y Oaxaca, en aproximadamente 8 000 años antes del presente. Mientras que las investigaciones genéticas realizadas mediante cruzas controladas entre maíz y el mismo teocintle han ayudado a discernir los cambios genéticos que subyacen a las grandes diferencias morfológicas entre la mazorca del maíz y la infrutescencia del teocintle (figura 4). Tales diferencias son grandes a nivel del fenotipo, pero pequeñas a nivel genético —involucran, hasta donde se sabe, algunos genes homeóticos— pero es una evidencia que nos sirve para insistir en la no linealidad del mapeo del genotipo al fenotipo, y la posibilidad de que —como se muestra en la figura 3— algunas pequeñas alteraciones genéticas o epigenéticas producidas por la transgénesis puedan tener efectos fenotípicos grandes e inesperados dependiendo del contexto genómico en el que se inserte el transgén.

A lo largo del tiempo el mejoramiento agronómico campesino ha generado por lo menos 50 razas criollas de maíz, con características morfológicas, agrícolas y bioclimáticas particulares. Dada esta diversidad, es fundamental documentar no sólo los centros de origen, sino también los de diversificación del maíz, los cuales, más que los primeros, probablemente acumulan la mayor parte de la diversidad genética del maíz, como ha sido documentado para el caso de otro cultivar mesoamericano: el aguacate. Para el caso del maíz, en los acervos de México se resguarda más de 60% de la variación genética de todo el mundo. Por lo tanto, nuestro país es también el centro de diversidad de este cereal.

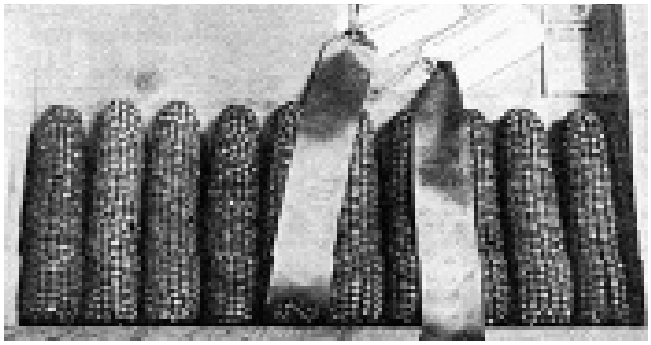
El maíz es además una planta de polinización abierta y muy promiscua, ya que más de 90% de las semillas de una

Figura 4. Diferencias fenotípicas entre el teocintle el maíz. La fotografía del lado izquierdo muestra las plantas de teocintle y maíz con sus respectivas infrutescencias, al lado de una moneda como referencia de tamaño (elaborada por N. Ellstrand). La imagen del lado derecho muestra un teocintle (izquierda), un híbrido entre teocintle y maíz (centro) y un maíz moderno. El híbrido es interfértil con ambos progenitores. Este experimento fue elaborado para corroborar la cercanía genética entre el teocintle y el maíz (experimento y fotografía realizados por J. Doebley).

mazorca son resultado de la fertilización de los óvulos por polen proveniente de otras plantas. La probabilidad de flujo vía polen y la distancia a la que viaja depende de las condiciones agroecológicas. Las plantas de maíz transgénico podrán polinizar plantas de maíz no transgénico aunque no estén en parcelas contiguas. El riesgo de polinización cruzada entre ambos tipos de plantas dependerá de muchos factores, prácticamente imposibles de controlar. Entre ellos están la distancia entre las parcelas, la sincronía en los tiempos de floración de ambos tipos de plantas, la dirección de las corrientes de viento y la orografía, los cuales pueden aumentar los riesgos de flujo de transgenes vía polen. Lograr documentar el flujo génico en el campo es técnicamente complicado y demandante, y todavía no existe un consenso sobre cómo hacerlo.

En México, el flujo de genes vía semilla es quizás el más importante. Los agricultores de comunidades distantes intercambian semilla con la finalidad de probar si la que reciben presenta alguna característica de interés. En este punto se puede proceder a la mezcla directa entre la semilla adquirida y la propia o, más comúnmente, se siembra una al lado de la otra, favoreciendo entonces la fecundación cruzada. Además, cada temporada de cosecha se recogen todas las mazorcas de una parcela, y de éstas se seleccionan unas pocas que serán utilizadas en la siembra del siguiente ciclo agrícola, práctica que favorece la posible acumulación de transgenes diversos en el banco de semillas de un agricultor, compuesto por los de ciclos anteriores, y que puede favorecer tanto la disminución como el aumento en la frecuencia de un transgén que pueda estar en las mazorcas seleccionadas para el siguiente ciclo.

Dado el número limitado de semillas seleccionadas para cada ciclo agrícola es posible incluso que un transgén se fije por un fenómeno conocido en genética de poblaciones como "cuello de botella", y que depende de un "error de muestreo". Por ejemplo, si en un costal tenemos 1000 frijoles negros y otros tantos blancos y sacamos a ciegas sólo 5, éstos podrían ser de un solo color, o en vez de tener 50% de cada uno como en la "población" original, podríamos tener 1 y 4, 2 y 3, etcétera. Por lo tanto, el manejo campesino tradicional puede ser un mecanismo que favorezca la introgresión de transgenes a razas criollas, siempre que estos genes no sean deletéreos.



Adicionalmente, en el proceso de distribución de semilla se pueden mezclar involuntariamente semillas transgénicas con no transgénicas. Por ejemplo, durante su transportación a granel en contenedores que no están sellados totalmente o en vehículos de transporte terrestre o ferrocarril, de los cuales se pueden escapar semillas durante su trayectoria a lugares de almacenamiento. Dichas semillas pueden germinar cerca de parcelas de maíz no transgénicas y entrecruzarse con las plantas que allí crecen. Asimismo, al llegar a los sitios de almacenamiento pueden mezclarse durante su empaquetamiento o cuando las bolsas o costales de semillas transgénicas se rompen y se mezclan con semillas no transgénicas guardadas en almacenes comunes; al igual que el uso de la misma maquinaria para manejar ambos tipos de semilla puede favorecer su mezcla a bajas frecuencias si no es correctamente limpiada.

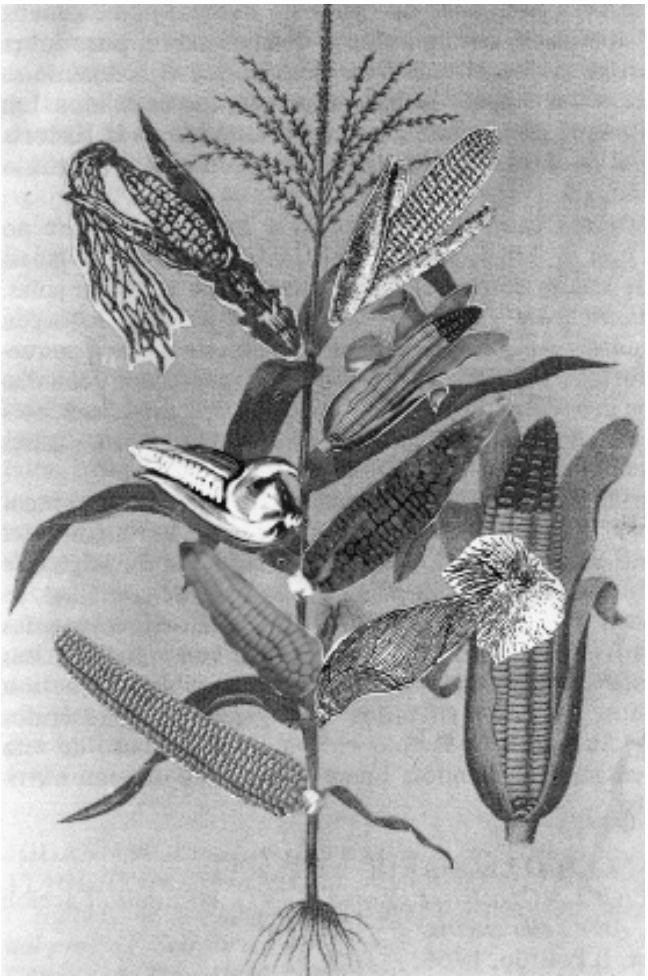
Si bien todos estos pasos involucrados en la distribución de semilla podrían teóricamente controlarse mediante el empleo de contenedores sellados durante el transporte de semilla transgénica, el uso de almacenes exclusivos, la elaboración de criterios más astringentes para el manejo de semilla de identidad dudosa —su destrucción—, la lim-

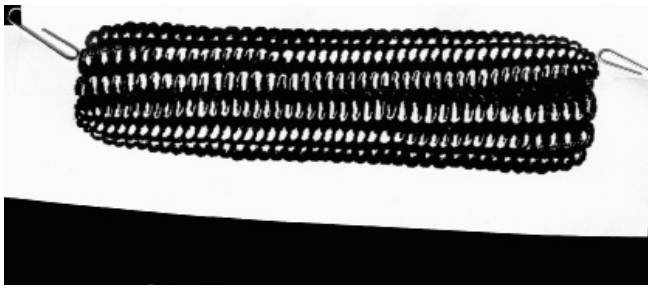
pieza de la maquinaria, contenedores y transporte utilizados, así como el informar al agricultor de la posible presencia de semilla transgénica no distinguible visualmente de la no transgénica, en los hechos la segregación es imposible aun en países como Estados Unidos, en donde el abasto de semillas es controlado por las compañías semilleras y existen medidas reguladoras estrictas. En ese país, 90% de los acervos de semillas de maíz, soya y canola que no deberían tener transgenes, están contaminados con más de 1% de los mismos. Además, existen varios casos concretos que ejemplifican la imposibilidad de segregar, aun cuando se vigila que esto no suceda, como el del escape de maíz "Starlink" que produce una variedad de la proteína Cry (9c) de Bacillus thuringiensis, que por sus posibles efectos alergénicos en humanos fue aprobada sólo para consumo animal. De manera inadvertida, esta proteína llegó a diversos productos alimenticios presentes en los anaqueles de los supermercados de Estados Unidos.

En ese país tampoco se ha podido contener al 100% las siembras experimentales de OGM que expresan fármacos o sustancias industriales, las cuales están sujetas a medidas de regulación y contención mucho más estrictas que los otros tipos de transgénicos. Dos casos de ello son la contaminación en 2002 de la maquinaria y la posible cruza con otros maíces, de un maíz transgénico creado por ProdiGene que expresaba una vacuna para puercos; y el reciente escape, en 2006, de una línea de Bayer de arroz Liberty Link (evento LL601), sembrado a nivel experimental en Estados Unidos y que inadvertidamente llegó al arroz destinado a la exportación a Japón. Más tarde se detectó en arroces de anaquel en muchos países del mundo. En México, el Instituto Nacional de Ecología publicó en los periódicos que cerca de 90% de los paquetes de arroz en el supermercado estaban contaminados con esta variedad aún no autorizada para consumo humano, una situación grave si pensamos que 70% del arroz que se consume en México proviene de aquel país.

La evidencia disponible permite asegurar que una vez sembrado el maíz transgénico a campo abierto en México, la introgresión no deliberada de transgenes al genoma de razas criollas de maíz no podrá prevenirse de ninguna forma, algo que ha sido ya comprobado para el algodón, del cual México es centro de origen —de una de las especies de mayor importancia comercial: Gossypium hirsutum. Es una planta mucho menos promiscua que el maíz, con una red de producción menor y una probabilidad de dispersión vía polen menor; sin embargo, estudios recientes de genética de poblaciones sugieren que es probable que ocurra flujo génico a larga distancia —estimada en 265 kilómetros— de las variedades transgénicas a las no transgénicas por la vía de la dispersión de semilla. Dado este potencial de dispersión, es de esperar que los acervos silvestres eventualmente presenten contaminación a pesar de estar a miles de kilómetros de distancia entre sí.

Más aún, monitorear el flujo génico en el momento que está ocurriendo es muy difícil pues requiere métodos moleculares o bioquímicos sofisticados y esfuerzos de muestreo grandes, muy demandantes en tiempo y recursos. Además, en México no existe la capacidad técnica en términos de laboratorios o personal necesario para implementar un monitoreo eficaz de las semillas que entran a nuestro país, algo cada vez más necesario y urgente, pues los riesgos descritos en las secciones anteriores para los niveles inferiores se multiplican, dado que el riesgo de flujo génico es muy grande. Ambos aspectos implican un peligro que no se debe correr: el efecto disruptivo de los transgenes —so-





bre todo del promotor 35S como se explicó arriba— sobre la integridad de los acervos genéticos de maíz mexicano, y los efectos no esperados por la introgresión de transgenes en distintos contextos genómicos. Y en caso de escapes, los peligros que se desprenden del riesgo de contaminación de los acervos de maíz mexicano con genes que condifican para sustancias tóxicas.

Al peligro de disrupción de los acervos genéticos per se, que puede tener consecuencias muy negativas para futuros planes de mejoramiento agronómico o para la seguridad alimentaria nacional, se le deben sumar los posibles efectos ecológicos no deseados. Entre ellos, discutidos ampliamente en otras contribuciones, se cuentan la posible aparición de insectos resistentes a las proteínas insecticidas de la variedades de maíz Bt comercializadas actualmente, la evolución de supermalezas tolerantes a los herbicidas que se tendrán que administrar en cantidades cada vez mayores al maíz transgénico tolerante a estos agrotóxicos, la acumulación de los mismos en el ambiente, el daño o efecto nocivo a organismos no blanco y sus efectos multiplicativos y difíciles de predecir en los ecosistemas, la persistencia de los transgenes en variedades criollas o silvestres, y la acumulación de proteínas recombinantes en el suelo con posibles efectos nocivos, entre otros.

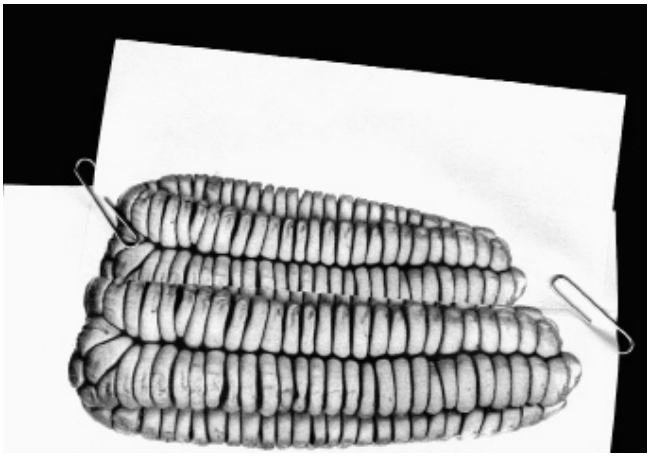
Finalmente, el riesgo de flujo génico puede tener implicaciones socioeconómicas importantes. Dadas las leyes internacionales de patentes, las secuencias recombinantes patentadas le dan derecho a los dueños de las mismas. Si estas secuencias llegan accidentalmente a los maíces criollos, en principio, estos dueños podrían demandar a los usuarios de los acervos contaminados o incluso reclamar la pertenencia de los mismos.

¿Una tecnología inadecuada para México?

Actualmente nuestro país está entre los diez principales productores de maíz a nivel mundial y este cultivo ocupa el primer lugar en superficie cultivada en Mexico. Si bien se cultiva en todo el territorio, se hace de maneras diversas; en el norte, en estados como Sinaloa y Tamaulipas y algunas zonas del Altiplano o el Bajío, su cultivo se lleva a cabo en parcelas de gran extensión, en una agricultura tecnificada con muchos insumos, tales como semilla mejorada, fertilizantes químicos y pesticidas. En el centro y sur, su cultivo se lleva a cabo en parcelas más pequeñas, con menos insumos y en el contexto de una agricultura diversificada de milpa en donde el maíz es acompañado comúnmente por frijol, chayote, calabacitas y hierbas comestibles o quelites.

La milpa es un sistema agroecológico robusto y sustentable que asegura un abasto diverso de alimentos complementarios de elevada calidad nutricional. Además, la interdigitación, extensión y complejidad de los sistemas de producción de maíz en todo México hacen que el riesgo de flujo génico, y con ello los otros riesgos y peligros intrínsecos a los niveles inferiores descritos en las secciones anteriores, sean muy grandes, lo cual debería de ser suficiente para cancelar el uso de los transgénicos de maíz disponibles en el mercado como opción tecnológica para nuestro país. Pero además, los desarrollos actuales son insuficientes para las condiciones de México y lo están siendo también para las que fueron desarrollados.

Así, de los maíces transgénicos disponibles comercialmente, el que se ha adoptado con mayor éxito es el maíz Bt resistente a insectos, el cual representa la mayor proporción del total de maíz transgénico sembrado a nivel mundial. Sin embargo, las proteínas Cry de dichos maíces transgénicos (Cry1Ab/Ac y Cry1c) no son eficaces para el control de las plagas de maíz mexicanas como Manduca sexta. Esto significa que además de los riesgos y peligros implicados



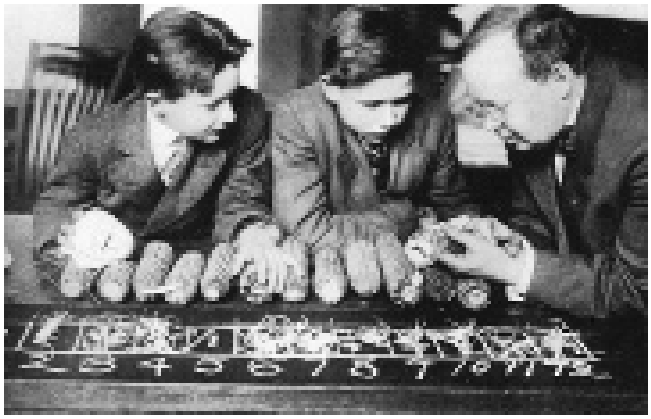
en el uso de maíz transgénico, este desarrollo no conlleva beneficios potenciales para este cultivo en nuestro país.

De igual manera, las líneas de maíz transgénico tolerantes a herbicidas más usadas son las que expresan la proteína EPSPS recombinante proveniente de la cepa CP4 de Escherichia coli, la cual es tolerante al herbicida glifosato, que inhibe la producción de un aminoácido esencial, el triptofano y así mata las plantas. En México esta variedad es incompatible con el policultivo de la milpa, ya que los herbicidas afectan a todas las plantas, y mataría a todas las especies acompañantes del maíz en la milpa. La primera consecuencia negativa del uso de este desarrollo sería el empobrecimiento de la dieta de aquellas familias que decidan utilizar semilla resistente a herbicidas, además de que se contaminarían los suelos y cuerpos de agua por el lixiviado de estos agroquímicos no biodegradables, algo que está ya sucediendo en países como Argentina, en donde se están sembrando extensiones grandes de cultivos de soya resistente al glifosato.

Por otro lado, existe la posibilidad de transferencia de genes de tolerancia a herbicidas por la vía del flujo génico a plantas como el teocintle, cuyas especies conviven comúnmente en México con el maíz y son interfértiles con el mismo. El teocintle es tolerado aparentemente porque favorece la transferencia de genes útiles al maíz. Sin embargo, el uso de maíz RR puede llevar a la introgresión del gen de tolerancia al teocintle y a la evolución, por exposición repetida al herbicida, de teocintles tolerantes y otras malezas, como ya está sucediendo en varios países que utilizan este herbicida.

Otro de los riesgos que ha sido más ampliamente discutido e investigado es la afectación de los insectos no blanco y la microbiota del suelo. Esto puede ocurrir en varios niveles: debido al consumo de proteínas Cry que contiene la planta o de los exudados de las raíces de una planta transgénica. También se podría modificar la cadena trófica en los agroecosistemas por la eliminación de los insectos blanco, así como por la adquisición de resistencia de éstos hacia las diferentes versiones de proteínas Cry expresadas por los distintos eventos de maíz transgénico, dando lugar a una carrera tipo "armamentista" entre insectos resistentes y variedades de maíz Bt. Estos insectos resistentes eventualmente podrían volverse una plaga de grandes dimensiones en caso de salirse de control y evolucionar mecanismos que los haga resistentes a una gran variedad de proteínas Cry expresadas por los transgénicos, y entonces habría que echar mano de pesticidas tóxicos. Este escenario no es nada remoto y por ello desde un inicio fueron establecidas estrategias de retardo en la evolución de resistencia por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos.

Además de estas insuficiencias y riesgos se ha demostrado que los maíces transgénicos usados hasta ahora no aumentan de manera neta el rendimiento, pues no fueron desarrollados para ello. En algunos casos lo disminuyen, y en pocos implican aumentos menores a los que se podrían alcanzar con el uso de híbridos mejorados disponibles en las instituciones públicas de México. Los híbridos mexicanos en combinación con otras prácticas agrícolas sí podrían implicar aumentos significativos en el rendimiento de maíz en México. El promedio de cosecha por hectárea es de alrededor de 3 toneladas por hectárea, frente a las 12 toneladas por hectárea cosechadas en Estados Unidos y



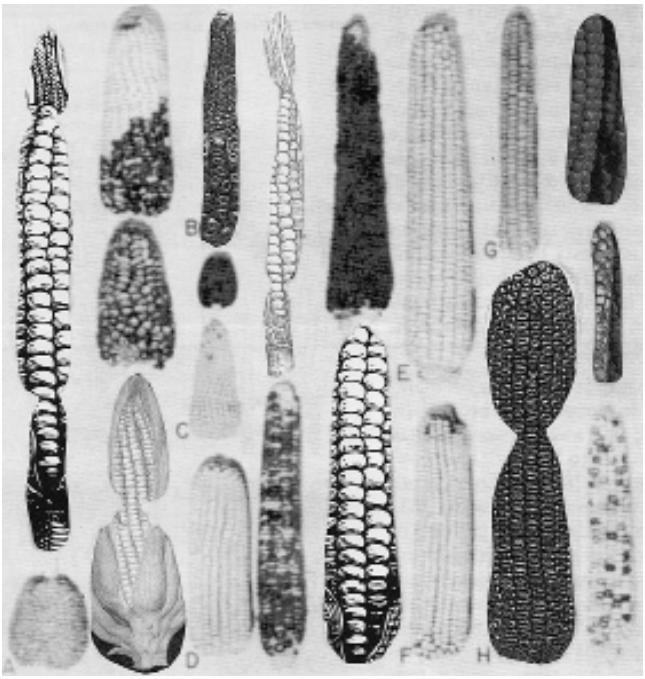
otros países. Estos niveles en México sólo se alcanzan en algunos estados del norte del país en el contexto de una agricultura industrializada, como es el caso del estado de Sinaloa.

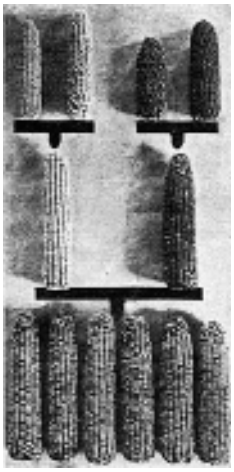
Biocombustible vs alimentos

Hasta el momento se han abordado los riesgos, incertidumbres y peligros de las líneas de maíz comercializadas actualmente. En estas líneas, los riesgos a la salud no son aparentes. Sin embargo, los estudios de efectos a la salud se han hecho con base en el principio de equivalencia substancial, que ha sido ampliamente criticado en Europa, y que establece que una planta transgénica y otra no transgénica son iguales, y sólo difieren en la proteína producida en la primera. De tal manera, que los efectos a la salud de

las plantas transgénicas generalmente se restringen a estudiar los efectos de dichas proteínas recombinantes purificadas y aisladas del contexto de la planta en donde se producen. Es imperativo promover estudios sistemáticos usando, a lo largo de varias generaciones de animales de laboratorio, las plantas transgénicas como tales. Algunos estudios independientes han alertado sobre algunos efectos nocivos que no han sido ampliamente investigados en diferentes organismos.

Más allá de conducir estos estudios en las líneas transgénicas comercializadas actualmente, las líneas de maíz transgénico que han sido modificadas para producir de manera endógena sustancias industriales —fármacos como anticoagulantes, vacunas, etcétera—, que son tóxicas para animales y humanos o cancelan el uso del maíz como planta alimenticia —como los que producen plásticos— representan un peligro irrefutable para la cadena productiva y alimentaria de maíz. Dado este peligro, una parte significativa de la comunidad científica ha externado su rechazo al uso de plantas comestibles como biorreactores. En México, dentro de la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados, así como en los reglamentos emanados de la misma, se ha establecido explícitamente que este tipo de desarrollos en maíz no serán permitidos en el territorio nacional. Sin embargo, en Estados Unidos se han sembrado más de 77 531.35 hectáreas a campo abierto de este tipo de cultivos. Éstos incluyen una larga lista de sus-





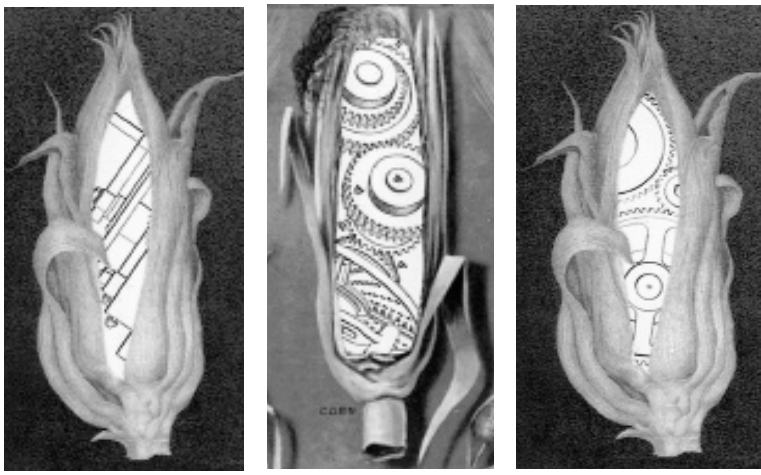
tancias farmaceúticas, de uso industrial y experimental no explicitadas por prerrogativa de secreto industrial. Si bien estos campos están sujetos a controles más estrictos de bioseguridad que los de transgénicos para uso agrícola, ya han existido casos de escape —mencionados arriba— y mezcla de este tipo de cultivos biorreactores con cultivos convencionales o con cultivos transgénicos no tóxicos. Existe un riesgo inminente de escape o este puede ya haber ocurrido en Estados Unidos.

Dado este riesgo, sería urgente insistir en que se cancelara el uso de plantas alimenticias para generar biorreactores en todo el mundo. Pero para México el caso es particularmente preocupante. Dadas las condiciones productivas y de consumo de maíz —se produce en todo el territorio, hay un flujo de genes importante en distancias largas y se consume en grandes cantidades por un amplio sector de la población, de manera cotidiana, sostenida, y en muchos casos, con un nivel bajo o nulo de procesamiento—, una mínima infiltración de estas líneas de maíz biorreactor podría multiplicarse en cada paso de la cadena productiva y alimentaria del maíz en México.

Dado que en Estados Unidos no están haciendo un escrutinio cuidadoso de los transgenes en sus acervos y que ingresan 10.2 millones de toneladas de este grano a nuestro país sin exigir —como lo hace Japón para su cereal básico, que es el arroz— etiquetado y segregación, la posibilidad de contaminación por alguno de los genes que expresan estas sustancias farmaceúticas o industriales es un riesgo latente que no se está monitoreando y mucho menos previniendo.

Por todo lo anterior, es crucial y urgente que el Gobierno mexicano: a) establezca con rigor qué tipo de transge-

nes están ya en las cadenas productivas y alimentarias del maíz; b) haga un escrutinio cuidadoso que asegure establecer cuáles son las vías de entrada de los transgenes encontrados; c) en caso de presencia de transgenes, que implemente mecanismos eficaces para evitar que sigan entrando y con ello evitar la contaminación de nuestros acervos de maíz con transgenes que codifican para substancias no aptas para el consumo animal y humano.



Consideraciones finales

Muchos de los riesgos y peligros aquí mencionados no se han considerado explícitamente en las evaluaciones de riesgo oficiales. Es el caso del uso de secuencias, como el promotor viral (35S del CaMV) y los efectos en la integridad genómica de la transgénesis, la posibilidad de flujo génico a larga distancia por el intercambio o mezcla de diversos acervos de semillas, y la transferencia de genes a variedades locales cultivadas o parientes silvestres.

Lo anterior se suma al hecho de que en nuestro país no se cuenta con la infraestructura necesaria para llevar a cabo estudios de biomonitoreo, los cuales necesitan herramientas de la biología molecular para detectar las secuencias transgénicas en una muestra de tejido, semilla o sus derivados. Los estudios de biomonitoreo realizados en nuestro país hasta la fecha, estimulados por el primer reporte de la presencia de transgenes en razas criollas de maíz en la Sierra Norte de Oaxaca, aún no cuentan con estándares unificados en términos de los equemas de muestreo o de los métodos moleculares a usarse. Establecer dichos estándares es urgente para contar con datos confiables acerca de la presencia de transgenes en los acervos mexicanos así como su tipo y sus vías de entrada, con el fin de establecer medidas para rectificar la posible contaminación.

Adicionalmente, para aquellos grupos campesinos que no deseen sembrar cultivos transgénicos por razones diversas —acceder a mercados preferenciales de orgánicos y otros que exigen que estén libres de transgénicos—, la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados debe establecer responsabilidad social al agente "contaminante", quien debe asumir el costo de monitoreo y remediación en caso necesario. Sin embargo, actualmente, dicha ley transfiere la responsabilidad a las personas o grupos que no desean tener trasngénicos en sus acervos de semilla.

Dada la evidencia presentada, el único mecanismo de protección real del maíz mexicano es, con base en el principio precautorio —que postula que "cuando haya sospechas razonables de que una determinada tecnología pueda producir daños severos a la sociedad o al ambiente, y existan razones para pensar que tal daño puede llegar a ser irreversible, debe impedirse el uso de esa tecnología, aun cuando la evidencia disponible en el momento sobre estos daños potenciales no cumpla los estándares exigidos usualmente en las investigaciones científicas para considerar una hipótesis como verificada"— reinstaurar la moratoria a la siembra de maíces transgénicos a campo abierto en México bajo cualquier modalidad de uso, y a su vez realizar un estudio cuidadoso y extensivo de los transgenes que están penetrando a la cadena productiva y de consumo de maíz en México, y proponer estrategias para evitar esta infiltración por completo.

En nuestro país se podrían combinar los conocimientos y riqueza de maíces criollos con ciencia y técnicas de biología molecular y genética de frontera, para buscar alternativas sustentables de mejoramiento genético asistido. Esta estrategia se podría complementar con otros avances tecnológicos que estén diseñados para resolver o prevenir problemáticas agrícolas, alimentarias o ambientales apremiantes propias de nuestro país. Ante las incertidumbres del mercado de granos básicos, este tipo de desarrollo tecnológico más apropiado a las condiciones mexicanas sería una de las vías más seguras para recuperar la autosuficiencia alimentaria en un marco de soberanía y agricultura sustentable.

En estos momentos en que el Gobierno mexicano está por completar el marco regulatorio que abrirá las puertas a la liberación de maíz transgénico en nuestro país, es crucial que toda la comunidad científica nacional e internacio-

nal evalúe los riesgos y peligros de la liberación de transgénicos a campo abierto en sus centros de origen, en particular para el caso del maíz en México; y se manifieste públicamente y fundamente su postura ante este posible evento.

En un aspecto más general, el creciente impacto de la ciencia sobre la naturaleza y la sociedad hace inminente la necesidad de principios éticos en el quehacer científico, que incluyan consideraciones ambientales y económicas. La ciencia debe ejercerse con responsabilidad social y ambiental y todos los científicos debemos asumir activamente la responsabilidad de nuestros descubrimientos. Esto implica participar activa y transparentemente con otros sectores de la sociedad para evaluar, informar y ayudar a prevenir los riesgos que pueden derivarse de la aplicación de nuestros descubrimientos en los distintos contextos ambientales y sociales que éstos puedan ser usados. Por ello, es importante fomentar una ciencia y un desarrollo tecnológico que incorporen consideraciones éticas, no sólo pertinentes a las relaciones entre individuos, sino también a la relación de los seres humanos con el resto de la naturaleza y a los efectos económicos y sociales que los desarrollos tecnológicos puedan tener en diversos contextos.

Elena Álvarez-Buylla Roces
Alma Piñeyro Nelson
Instituto de Ecología,
Universidad Nacional Autónoma de México.

Referencias bibliográficas

Dyer, J. A., Taylor, J. E. 2008. "A crop population perspective on maize seed systems in Mexico", en Proceedings of the Nacional Academy of Science, vol. 105, núm. 2, pp. 470-475.

Editorial: "Drugs into crops-the unpalatable truth". 2004. Nature Biotechnology, vol. 2, núm. 2.

James, Clive. 2007. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops. ISAAA Brief, núm. 37. ISAAA: Ithaca, Nueva York.

Kapoor, M., A. Baba, K. Kubo, K. Shibuya, K. Matsui, Y. Tanaka y H. Takatsuji. 2005. "Transgene-triggered, epigenetically regualted ectopic expression of a flower homeotic gene pMADS3", en Petunia. The Plant Journal, núm. 43, pp. 649-661.

Kohli, A., S. Griffiths, N. Palacios, R. M. Twyman, P. Vain, D. A. Laurie y P. Christou. 1999. "Molecular characterization of transforming plasmid rearrangements in transgenic rice reveals a recombination hotspot in the 35S CaMV promoter and confirms the predominance of microhomology mediated recombination", en The Plant Journal, vol. 17, núm. 6, pp. 591-601.

Myhre, M. R., K. A. Fenton, J. Eggert, K. M. Nielsen y T. Traavik. 2006. "The 35S CaMV plant virus promoter is active in human enterocyte-like cells", en European Food Research Technology, núm. 222, pp. 185-193.

Piñeyro-Nelson, A., J. van Heerwaarden, H. R. Perales, J. A. Serratos-Hernández, A. Rangel, M. B. Hufford, P. Gepts, A. Garay-Arroyo, R. Rivera-Bustamante y E. Álvarez-Buylla. "Transgenes in Mexican maize: molecular evidence and methodological considerations for GMO detection in landrace populations", en Molecular Ecology, en prensa.

Quist, D., e I. Chapela. 2001. "Transgenic DNA introgressed into traditional maize landraces in Oaxaca, Mexico", en Nature, núm. 414, pp. 541-543.

Rosi-Marshall, E. J., J. L. Tank, T. V. Royer, M. R. Whiles, M. Evans-White, C. Chambers, N. A. Griffiths, J. Pokelsek y M. L. Stephen. 2007. "Toxins in transgenic crop byproducts may affect headwater stream ecosystems", en Proceedings of the National Academy of Sciences, núm. 104, pp. 16204-16208.

Soberón, M. y A. Bravo. 2008. Avoiding Insect Resistance to Cry Toxins from Bacillus thuringiensis. ISB News Report.

Zolla, L., S. Rinalducci, P. Antonioli y P. G. Riguetti. 2008. "Proteomics as a Complementary Tool for Identifying Unintended Side Effects Occurring in Transgenic Maize Seeds As a Result of Genetic Modifications", en Journal of Proteome Research, núm. 7, pp.1850-1861.

Imágenes

Pp. 83-86: Benjamín Murguía, Transcollage, 2008. P. 87: Clasificación de semillas de maíz, Estados Unidos. P. 88: Benjamín Murguía, Transcollage, 2008. P. 90: Colección de mazorcas de maíz; Medición de plantas de maíz, Estados Unidos. Pp. 91-92: Benjamín Murguía, Transcollage, 2008. P. 93: Demostración de diferentes mazorcas de maíz, Estados Unidos. P. 94: Benjamín Murguía, Transcollage, 2008. Siembra de maíz experimental, Estados Unidos; Colección de mazorcas, Estados Unidos. P. 94: Benjamín Murguía, Transcollage, 2008.

Palabras clave: transgénicos, principio precautorio, flujo génico, anidamiento, bio-reactores.
Key words: Transgenics, cautionary principle, gene flow, nesting, bio-reagents.

Resumen: Aquí se analizan los potenciales riesgos, incertidumbres y peligros de la liberación a campo abierto de maíz transgénico en su centro de origen y diversidad: México. Se abordan los diferentes niveles de complejidad biológica y social, enfatizando la importancia del maíz en la cadena alimentaria, la cual puede ser afectada si se contamina con maíz transgénico bio-reactor que exprese sustancias no aptas para la alimentación.

Abstract: This article analyzes the potential risks, uncertainties, and hazards of releasing transgenic corn in open cropland at its center of origin and diversity: Mexico. We discuss the different levels of biological and social complexity, emphasizing corn's importance in the food chain, which may be disrupted if it is contaminated with bio-reactive transgenic corn that expresses substances unsuited for food.

Elena Álvarez-Buylla obtuvo el doctorado y posdoctorado en Botánica y Genética Molecular en la Universidad de Berkeley, Cal. Actualmente es jefa del Departamento de Ecología Funcional del Instituto de Ecología (UNAM). Ha publicado cerca de 90 contribuciones internacionales, formado más de 40 estudiantes y posdoctorantes. Ha recibido importantes distinciones académicas; ha trabajado en maíz transgénico desde 2001. Alma Piñeyro es estudiante de doctorado en el Laboratorio de Genética Molecular, Desarrollo y Evolución de Plantas, Instituto de Ecología (UNAM). Su tema es sobre la regulación de genes de determinación floral en Lacandonia schismatica.

Recibido el 17 de julio de 2008, aceptado el 17 de septiembre de 2008.