

Maíz transgénico y sus diferentes aristas: un desarrollo biotecnológico con implicaciones económicas y sociales

F. Alejandro Sánchez Flores

El Dr. Alejandro Sánchez es investigador del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, miembro y presidente de la Academia de Ciencias de Morelos.

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

En mayo del 2019, comenzó el proceso de auscultación para modernizar y ratificar uno de los tratados internacionales de libre comercio más importantes para nuestro país: el *Tratado entre México, Estados Unidos y Canadá*, mejor conocido como el T-MEC. Si bien, este tratado tiene un antecedente histórico desde 1993, es necesario realizar modificaciones periódicas que permitan mejorar las actividades comerciales y productivas de nuestro país, apuntalando nuestra economía. La inversión extranjera directa que México ha recibido de EE. UU. y Canadá superó los 250 mil millones de dólares entre 1999 y 2018, lo que los convierte en socios inversionistas clave para México.

Dentro de este proceso de revisión y aprobación, surgió un conflicto originado por un decreto presidencial mexicano, emitido en febrero de 2023 el Diario Oficial de la Federación, que prohibía el uso inmediato de maíz transgénico en la elaboración de masa y tortillas, e instruyó la eliminación gradual de este tipo de grano en otros alimentos y en forrajes para animales. Considerando que Estados Unidos es el principal exportador de maíz amarillo a México y que usa este tipo de maíz modificado genéticamente, este país presentó una queja formal argumentando que estas medidas carecían de base científica y afectaban el acceso de sus productos al mercado mexicano. Canadá se unió también a esta queja. En los primeros diez meses del año pasado, las exportaciones estadounidenses de maíz a México alcanzaron los 4.8 billones de dólares, consolidándose como el principal mercado para este producto.

El 20 de diciembre de 2024, el panel para resolución de esta controversia determinó que las políticas mexicanas no cumplen con las obligaciones del T-MEC, al no basarse en principios científicos ni en evidencia reconocida a nivel internacional. En consecuencia, México debe ajustar sus medidas en un plazo de 45 días. Por lo tanto, en esta entrega me gustaría ofrecer un contexto científico acerca de esta problemática que tiene muchas aristas, donde la parte científica juega un papel muy importante para la toma de decisiones.

El maíz, su evolución y las modificaciones genéticas
En el caso particular del maíz, tomó mi-

les de años poder llegar al maíz como lo conocemos. Como la mayoría de las plantas que producen algún alimento para nosotros, el maíz es el resultado de procesos de domesticación y selección que los humanos empezaron cuando pasaron de ser nómadas y se convirtieron en agricultores. En este proceso de biotecnológico rudimentario, se tomaron plantas gramíneas silvestres llamadas *teocintle* o *teosinte* (en náhuatl significa "grano de Dios") (Figura 1) y se calcula que hace unos 10 mil años, las mujeres mesoamericanas empezaron a mezclar el polen de estas plantas con otras gramíneas para obtener un mayor número de granos, los cuales podían sembrar y repetir este proceso de selección hasta



FIGURA 1. EL teocintle y su posible evolución. Tomada de <https://masdemx.com/teocintle-antepasado-del-maiz-historia/>

llegar al maíz como lo conocemos. Existen varias teorías sobre la evolución del maíz (Figura 2), que difieren con respecto al tiempo y la generación de nuevas especies por medio de la manipulación humana. Sin embargo, el resultado de cualquiera de estos procesos, llegan al mismo resultado y que es la gran biodiversidad que tenemos de este cereal. Actualmente se tiene registro de casi 60 variedades de maíz nativo, pero además se tienen más de 60,000 elementos que contienen información genética (como semillas y polen) llamado *germoplasma*, donde se encierra la historia de esta biodiversidad y que contiene un gran potencial para seguir con el mejoramiento del maíz en México. Sin embargo, para resolver las necesidades actuales, el mejoramiento del maíz o de cualquier otro producto agropecuario, no puede esperar un proceso de cientos o miles de años, sobre todo cuando tenemos a la mano herramientas biotecnológicas más modernas que han sido el resultado también muchos años de investigación.

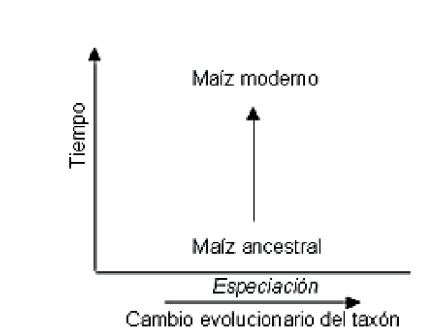
Como resultado de los avances en bio-

lógica molecular e ingeniería genética, desde hace tiempo somos capaces de crear organismos genéticamente modificados (OGM) en los cuales hemos alterado o modificado de manera rápida y específica su material genético. Si bien, las alteraciones en el ADN ocurren de manera natural (mutación), dichos cambios no son específicos y el proceso para obtener características deseables, es muy lento. Los OGM pueden ser plantas, animales o microorganismos.

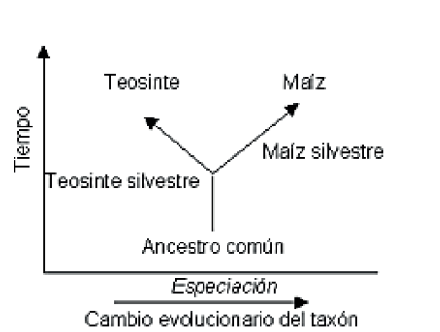
Por otro lado, los transgénicos son organismos (plantas, animales o microorganismos) que han sido modificado mediante técnicas de ingeniería genética y biología molecular, para introducir un gen de otra especie en su ADN.

Con estas modificaciones se busca que el organismo adquiera características ausentes en su forma natural, ofreciendo beneficios con un mínimo de riesgos. Ahora bien, la diferencia entre un OGM y un transgénico es que este último hace referencia a un organismo que contiene genes de otras especies introducidos artificialmente, mientras que OGM es un término más amplio que incluye cualquier modificación genética en un organismo, sin importar si la información genética proviene de otra especie o si se ha realizado una modificación interna dentro de la misma especie. Ambos términos están relacionados, pero no son sinónimos exactos. Todos los transgénicos son OGM, pero no todos los OGM son necesariamente transgénicos, ya que no todos los OGM incluyen genes de otras especies.

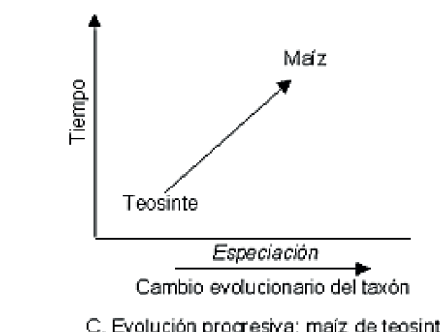
Poner el gen de un organismo en otro no es una tarea fácil y si bien en la naturaleza se llega a dar este fenómeno por un proceso llamado *transferencia horizontal*, no es algo común. Esto ha sido un gran logro científico que ha permitido acelerar



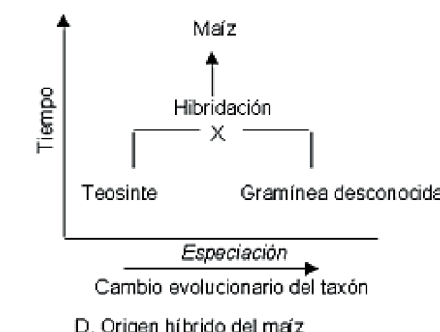
A. Evolución vertical: maíz de maíz silvestre



B. Evolución vertical: maíz y teosinte de un ancestro común pero con la domesticación del maíz a partir de maíz silvestre



C. Evolución progresiva: maíz de teosinte



D. Origen híbrido del maíz

FIGURA 2. ESQUEMA de los diferentes panoramas de la evolución del maíz. Tomada de <https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s03.htm>

un proceso que, en el caso particular del maíz, tomó miles de años. Pero además se le ha podido dar al maíz características que son poco probables y muy difíciles de seleccionar. En el caso de las plantas de maíz que han sido modificadas genéticamente, tenemos aquellas que pueden resistir el efecto de herbicidas que se pueden usar en el cultivo y la producción agrícola con la finalidad de maximizar los rendimientos de este alimento. Con estas plantas, es posible emplear un herbicida que elimina a las hierbas y maleza que competirían con el crecimiento del maíz, resultando en rendimientos mucho más altos con lo que es posible satisfacer la demanda de la población mundial, no solo para alimentación humana sino también para la alimentación de diferentes tipos de ganado. Sin embargo, este tipo de desarrollos han sido muy cuestionados por las implicaciones que pueden tener en la salud y en el medio ambiente, como es el caso del herbicida llamado glifosato. No obstante, las investigaciones científicas para encontrar las implicaciones que puede tener su uso, también han sido muchas y a continuación resumiremos lo que se ha podido concluir basado en estas evidencias.

El glifosato, la salud y el medio ambiente

Uno de los herbicidas más utilizados es el *glifosato* por su capacidad de controlar una gran cantidad de maleza y hierbas. Funciona inhibiendo una proteína específica de plantas, que es la 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS),

interferiendo con la síntesis de los aminoácidos fenilalanina, tirosina y triptófano. Al bloquear esta enzima, el glifosato impide la síntesis de proteínas y otros compuestos esenciales, lo que eventualmente lleva a la muerte de las plantas. Los humanos y otros animales carecemos de EPSPS, por lo que el glifosato no puede ejercer esa acción. El glifosato fue descubierto por accidente por el químico John E. Franz en 1970, mientras trabajaba para la empresa Monsanto. Franz estaba investigando moléculas que pudieran ser utilizadas como herbicidas, y fue entonces cuando identificó al glifosato como una sustancia capaz de inhibir la enzima EPSPS. Monsanto patentó el glifosato en 1974 y lo comercializó desde 1976 bajo el nombre de *Roundup*. Este herbicida se convirtió rápidamente en uno de los más utilizados en la agricultura debido a su eficacia, costo relativamente bajo y la capacidad de ser aplicado en una amplia variedad de cultivos. Este herbicida de amplio espectro mata o inhibe el crecimiento de la mayoría de las plantas con las que entra en contacto. Es absorbido a través de las hojas y se traslada a las raíces. Se usa ampliamente en la agricultura para controlar malezas en cultivos como soya, maíz, algodón, entre otros. Incluso, es utilizado en calles y carreteras para remover la maleza que crece y obstruye dichas vías de comunicación. Por lo tanto, es una sustancia que ha estado presente en el medio ambiente por más de 40 años.

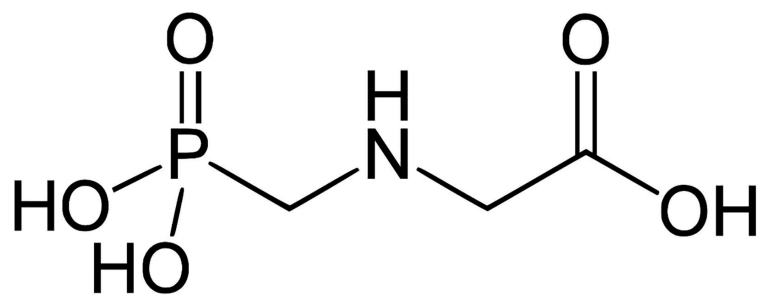


FIGURA 3. ESTRUCTURA química del glifosato. Tomada de <https://es.wikipedia.org/wiki/Glifosato>

El glifosato ha sido objeto de debate debido a preocupaciones sobre su seguridad para la salud humana y el medio ambiente. Algunas investigaciones han sugerido que el glifosato podría estar relacionado con ciertos tipos de cáncer, lo que ha llevado a litigios y restricciones en algunos países. Sin embargo, otras investigaciones y autoridades como la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han concluido que, cuando se usa adecuadamente, el glifosato tiene un bajo riesgo para la salud humana. Según la Agencia Internacional de investigación sobre Cáncer (IARC) el glifosato está catalogado en el grupo 2A, que agrupa a sustancias con un riesgo relativamente bajo. De hecho, existen otros productos de consumo humano como el cigarro y el alcohol que tienen un riesgo y potencial carcinogénico mayor que el glifosato. Desafortunadamente, el origen de la controversia se debe al trabajo publicado por el investigador francés Gilles-Éric Seralini, quien presentó (junto con sus colaboradores) un estudio en ratas, donde reportaban aumento de tumores al ser alimentadas por dos años con maíz genéticamente modificado para resistir al glifosato. Este trabajo ha sido revisado por la comunidad científica, encontrándose varios errores en su diseño. Entre otros, se sabe que el tipo de ratas utilizadas en el estudio tienden a desarrollar tumores independientemente de con qué se les alimente, por lo que la asociación de consumo de glifosato con el desarrollo de cáncer no es correcta. Por lo tanto, se retiró dicho artículo de la revista donde fue publicado; actualmente no existe evidencia suficiente para relacionar el glifosato y su uso con el cáncer en humanos. Desde el punto de vista ambiental, se tienen evidencias de que el glifosato puede permanecer en el suelo hasta por un año y filtrarse al agua en los mantos freáticos, alcanzando concentraciones muy bajas. En los estudios realizados no se observa que esto perjudique a la flora y fau-

na donde se ha encontrado los restos del herbicida ni mucho menos que pueda tener alguna relación con enfermedades en seres humanos.

Implicaciones ecológicas, económicas y sociales del uso de transgénicos

Desde el siglo pasado se ha vigilado el uso de organismos transgénicos en todo el mundo y México no ha sido la excepción. Un ejemplo de ello ha sido el uso de algodón transgénico resistente a la plaga de gusano barrenador, tema que ha sido abordado en una entrega pasada de esta columna (<https://acmor.org/articulos-antteriores/trans-nicos-ono-trans-nicos-en-m-xico-impacto-del-algod-n-gen-ticamente-modificado>). Por un lado, la siembra de algodón transgénico desde los años 90s ha salvado a la industria algodonera del norte del país, pero también existió una preocupación sobre el impacto en el algodón nativo, debido a que México es el centro de origen del algodón. La Comisión Intersecretarial de Bioseguridad y Organismos Genéticamente Modificados (CIBIOGEM) ha seguido el caso durante mucho tiempo para garantizar la seguridad del uso de OGM en el país y hasta la fecha, no hay evidencias científicas que generen una preocupación sobre perder o destruir la biodiversidad de algodón en el país, ya que su manejo y control minimiza dicho riesgo. El tema del maíz es diferente al ser un producto alimenticio de consumo humano y animal, por lo que existe un temor sobre el uso de maíz transgénico y la afectación a la biodiversidad del maíz nativo en el país. Como ya se mencionó, el uso de glifosato no genera un riesgo para la salud humana ni para el medio ambiente. Además, existen otros transgénicos de maíz que son resistentes a sequías o a plagas de insectos. En particular, existe un maíz transgénico que produce la toxina Cry, por lo que es resistente a plagas de insectos. Esta toxina proviene de la bacteria *Bacillus thuringiensis* y mata específicamente al insecto plaga. Se han realizado

estudios para ver si el uso de estos transgénicos pudiera afectar a otros insectos de importancia ecológica como a los polinizadores. Se tienen evidencias suficientes para concluir que la afectación es muy poca y si son sembrados de manera correcta, el riesgo es mínimo. Por lo tanto, es de suma importancia que los organismos transgénicos sean utilizados de la manera correcta y siguiendo las instrucciones de las compañías que los venden, donde se debe observar la localización geográfica para realizar la siembra y cultivo con la finalidad de reducir el esparramamiento de polen que pueda alcanzar a las especies nativas. En el caso de aquellos resistentes a herbicidas, si se utilizan en las concentraciones indicadas, también se reducen los riesgos implícitos tanto para la salud como el medio ambiente. Ahora bien, en particular el uso de maíz transgénico en México puede generar una problemática a nivel económico y social, que debe separarse de los otros problemas de índole científica que ya se han mencionado. Por un lado, el uso de maíz transgénico podría ser ventajoso, al tener rendimientos mucho mayores con maíz transgénico (de 3 a 5 toneladas por hectárea) comparado con los rendimientos actuales del maíz nativo (~1.5 toneladas con maíz nativo). Pero por otro lado, existiría una dependencia de comprar tanto las semillas como de herbicidas como es el caso del maíz resistente a glifosato. Es importante mencionar que la máxima efectividad del maíz transgénico se alcanza con semillas de primera generación, por lo que hay que comprar semillas constantemente, a diferencia del maíz nativo donde las semillas con mejores características, se seleccionan y se guardan para las siguientes siembras. Por lo tanto, se requiere de hacer un análisis de costo-beneficio para ver si el uso de transgénicos es una opción mejor desde el punto de vista económico, como fue el caso del algodón. Finalmente, a partir de lo mencionado anteriormente se deriva un problema social y es que el maíz además de ser un producto alimenticio es también un símbolo nacional y cultural. En la cultura indígena de nuestro país, forma parte de muchos rituales religiosos, así como de una herencia que es parte de nuestra historia. Esto es un factor importante pero desgraciadamente, se han tomado decisiones políticas y económicas basadas en ideología y es por esto por lo que en el T-MEC, el fallo fue a favor de Estados Unidos y se tendrán que hacer las modificaciones correspondientes para quitar la prohibición publicada en el 2023 respecto a la importación de harinas y herbicidas, las cuales nunca tuvieron un fuerte sustento científico para justificarlo. Además, a raíz de estas modificaciones, se hicieron

propuestas para modificar la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM) y aún nuestra Constitución. Esto podría afectar el desarrollo de la ingeniería genética y biotecnología en México, impidiendo el desarrollo de nuestros propios organismos transgénicos o más aún, de aprovechar el germoplasma que tenemos usando otras técnicas de biología molecular que permiten generar OGMs llamados *cisgénicos*. Con el enfoque *cisgénico*, podríamos tomar las mejores variantes genéticas de cada variedad conocida y conjuntarlas en una sola variedad para producir un "super maíz", sin tener que introducir genes de otros organismos. Esto permite acumular características que ofrecen ventajas para la producción y rendimiento de los cultivos, con menores posibles afectaciones. Si bien, actualmente se conoce mucho acerca del germoplasma mexicano gracias a los trabajos realizados por instituciones en México, como la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) y el Instituto Nacional de Investigación Forestal (INIFAP), el apoyo a estas instituciones y en general a la ciencia básica, no ha sido suficiente. Estas instituciones han obtenido nuevas variedades de maíz, pero que todavía no alcanzan a resolver los problemas a los que nos enfrentamos actualmente y que son difíciles de controlar, como el calentamiento global y la sequía, o las dificultades inherentes a nuestro territorio, donde la superficie para la siembra del maíz es escasa. En conclusión, el consumo de productos de origen transgénico y en particular maíz resistente a glifosato, así como el uso de este herbicida, no genera un riesgo mayor que el uso de otros productos de consumo común, que han podido regularse sin una prohibición estricta. Para el uso de organismos transgénicos, existen antecedentes de los cuales podemos aprender para usarlos de la mejor manera posible. No se nos está obligando a comprarlos ni a utilizarlos, pero es innegable que dichos desarrollos biotecnológicos resuelven necesidades que tenemos. Estoy seguro que con el debido apoyo a la ciencia y tecnología nacional, podrían ser desarrollados en nuestro país. Finalmente, se deben tomar decisiones basadas en hechos y datos duros y no caer en el error de seguir ideologías que afecten la economía y a la sociedad.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org

¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: coord.comite.editorial.acmor@gmail.com

Ligas y referencias de interés

- American Cancer Society (2024). Known and Probable Human Carcinogens. <https://www.cancer.org/cancer/risk-prevention/understanding-cancer-risk/known-and-probable-human-carcinogens.html>
- Biblioteca Digital del INIFAP (2024). Variedades e Híbridos de maíz (Zea mays L.) del INIFAP. https://vun.inifap.gob.mx/BibliotecaWeb_Content?7=14560
- Camacho Servín, Francisco. Envía Sheinbaum a San Lázaro iniciativa para proteger maíces nativos. *La Jornada*, 23 de enero de 2025. <https://www.jornada.com.mx/noticia/2025/01/23/politica/envia-sheinbaum-a-san-lazarro-iniciativa-para-proteger-maices-nativos-5346>
- Diario Oficial de la Federación. Decreto por el que se establecen diversas acciones en materia de glifosato y maíz genéticamente modificado. 13

- de febrero de 2023. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5679405&fecha=13/02/2023#gsc.tab=0
- Duan, J. J., Marvier, M., Huesing, J., Dively, G. & Huang, Z. Y. (2008). A meta-analysis of effects of Bt crops on honey bees (Hymenoptera: Apidae). *PLoS ONE* 3, e1415. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2169303/>
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Desarrollo INIFAP híbridos y variedades de maíz aptos para la industria de la masa y la

- tortilla. <https://www.gob.mx/inifap/articulos/desarrolla-inifap-hibridos-y-variedades-de-maiz-aptos-para-la-industria-de-la-masa-y-la-tortilla>
7. Paliwal, R. L. Origen, evolución y difusión del maíz. <https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s03.htm>
8. Secretaría de Economía. Inicia el proceso de aprobación del T-MEC en México. 30 de mayo de 2019. <https://www.gob.mx/se/articulos/inicia-el-proceso-de-aprobacion-del-t-mec-en-mexico-202047?idiom=es>

9. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Maíz, base de la alimentación mexicana. 1 de marzo de 2023. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/maiz-base-de-la-alimentacion-mexicana>
10. Suárez, Karol. México pierde disputa con Estados Unidos sobre maíz transgénico bajo el T-MEC. CNN en español, 20 de diciembre de 2024. <https://cnnespanol.cnn.com/2024/12/20/mexico/mexico-pierde-disputa-estados-unidos-maiz-transgenico-orix>