

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA



Estudio de Dispersión de Polen en Maíz (*Zea mays* L.)
para Determinar el Flujo Genético

Por:

JOSÉ ELMER GARCÍA HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

Saltillo, Coahuila, México

Octubre, 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA

Estudio de Dispersión de Polen en Maíz (*Zea mays L.*)
para Determinar el Flujo Genético

Por:


JOSÉ ELMER GARCÍA HERNÁNDEZ


TESIS

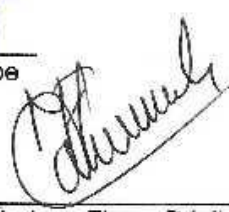
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

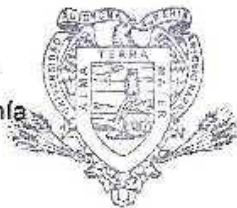
Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Luis Alberto Aguirre Uribe
Asesor Principal


Dr. Agustín Hernández Juárez
Coasesor


Dr. Mariano Flores Dávila
Coasesor


Dr. Gabriel Gallegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía



Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México
Octubre, 2016

DEDICATORIA

A MIS PADRES

RAUL GARCIA GARCÍA Y ANTONIA HERNÁNDEZ LÓPEZ

Agradecer por darme la oportunidad de terminar una carrera, el apoyo económico y moral durante mi estancia en la universidad, los esfuerzos que ellos dieron para que yo saliera adelante. Gracias a ellos he cumplido una meta y un sueño que había deseado en mi vida de estudiar en una universidad y formarme como profesionista, sin ustedes nada de esto habría sido posible.

A MIS HERMANAS

MARIA GUILLERMINA GARCÍA HERNÁNDEZ Y BLANCA FLOR GARCIA HERNANDEZ.

A ellas por el apoyo y absoluta confianza, que los llevo siempre presente en mi mente y corazón.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar hasta este momento de mi vida, en darnos la vida a toda mi familia, de darme conocimientos, por cuidarme y acompañándome en cada paso donde quiera que esté.

A mí Alma Terra Mater

Esta grande institución que para mí es una de las mejores universidades que existen en todo México, por albergarme durante mi carrera profesional, a la planta de académicos que la integran, y sus instalaciones que en conjunto formaron el ambiente propio para formar a la profesionista que hoy soy, las multitudes de cosas que tuve que vivir en esta institución no los olvidare nunca, es una experiencia única que en otra parte no los puedes vivir.

Al Dr. Luis Alberto Aguirre

Por su contribución y apoyo en la elaboración de esta investigación en compartir conmigo parte de su experiencia académica, mediante las revisiones del mismo, por sus conocimientos y contribuir a mi formación profesional gracias.

Al Dr. Agustín Hernández Juárez

Por brindarme su apoyo y participación en este trabajo en compartir conmigo parte de su experiencia académica, por esa disposición permanente que mostro a lo largo de esta investigación y por sus múltiples aportaciones gracias.

Al Dr. Mariano Flores Dávila

Gracias por aceptar ser parte en este trabajo, el apoyo, el asesoramiento y en contribuir en la revisión del presente trabajo de investigación gracias.

A mis amigos y amigas

A todos mis compañeros que tuve la oportunidad de conocerlos durante el tiempo que estuve en esta institución gracias por su gran amistad que, aunque ya no esté en esta universidad no los olvidaré, a mis compañeros del americano además de compañeros son una familia y hermandad bonitos recuerdos que llevo que no los olvidare nunca.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|--|------|
| Índice de Cuadros..... | vi |
| Índice de Figuras..... | vii |
| Resumen..... | viii |
| | |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Objetivo General..... | 2 |
| | |
| 2. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1. Los cultivos Transgénicos..... | 3 |
| 2.1.1. Importancia de los cultivos transgénicos en la agricultura..... | 5 |
| 2.1.2. Análisis y manejo del riesgo..... | 9 |
| 2.1.3. Riesgos para la agricultura..... | 12 |
| 2.1.4. Coexistencia entre cultivos transgénicos y convencionales..... | 14 |
| 2.2. Polinización en las plantas..... | 17 |
| 2.2.1. Flujo de genes en los vegetales..... | 18 |
| 2.2.2. Factores que intervienen en el recorrido del polen..... | 21 |
| 2.2.2.1. Factores físicos..... | 22 |
| 2.2.2.2. Factores Biológicos..... | 23 |
| 2.3. Dispersión de polen en gramíneas..... | 24 |
| 2.3.1. Flujo de genes en el maíz..... | 24 |
| | |
| 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 28 |
| 3.1. Descripción del sitio experimental..... | 28 |
| 3.1.1. Predio 1 (Sinaloa)..... | 28 |
| 3.1.2. Predio 2 (Tamaulipas)..... | 29 |
| 3.2. Procedimiento experimental..... | 29 |
| 3.2.1. Material genético..... | 29 |
| 3.2.2. Diseño del experimento..... | 30 |
| 3.3. Variables a evaluar..... | 31 |
| 3.4. Análisis estadístico..... | 32 |
| | |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 34 |
| 4.1. Dispersión de Polen..... | 34 |
| 4.1.1. Predio 1 (Sinaloa)..... | 34 |
| 4.1.2. Predio 2 (Tamaulipas)..... | 39 |
| | |
| 5. CONCLUSIONES..... | 46 |
| | |
| 6. LITERATURA CITADA. | 47 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Superficie mundial por país de cultivos biotecnológicos en 2014..... | 7 |
| Cuadro 2. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Sinaloa..... | 37 |
| Cuadro 3. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Sinaloa (Continuación)..... | 38 |
| Cuadro 4. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Tamaulipas..... | 42 |
| Cuadro 5. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Tamaulipas (Continuación)..... | 43 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1. | Diseño de la parcela de maíz para evaluar flujo genético..... | 31 |
| Figura 2. | Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo, en 4 puntos cardinales en Sinaloa..... | 34 |
| Figura. 3. | Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo en 3 puntos cardinales en Sinaloa (Continuación)..... | 35 |
| Figura 4. | Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo, en 3 puntos cardinales en Tamaulipas..... | 39 |
| Figura 5. | Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo en 4 puntos cardinales en Tamaulipas (Continuación)..... | 40 |

RESUMEN

El presente estudio de dispersión de polen en maíz, se llevó a cabo en predios de las localidades de El Camalote, Culiacán, en el estado de Sinaloa y en el municipio de Díaz Ordaz, Tamaulipas; durante el ciclo Otoño-invierno. El objetivo principal de este estudio fue generar información sobre la distancia a la que viaja el polen del maíz, con la finalidad de poder estimar el posible flujo genético en maíz genéticamente modificado con maíz convencional. En las parcelas experimentales se utilizó como fuente emisora de polen, el maíz convencional germoplasma DK1030 (amarillo) y como receptor de polen, el maíz convencional germoplasma NM1078 (blanco). El híbrido de maíz blanco se sembró alrededor de la parcela emisora de polen amarillo, dispuesto en espacios de 2 surcos de ancho por dos metros de largo, con distanciamientos de 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 metros, en ocho puntos cardinales. La tasa de cruzamiento de polen fue cuantificada mediante la evaluación del número de granos amarillos en las mazorcas cosechadas de maíz blanco, por distancia y punto cardinal. Para cada punto cardinal, se analizó el porcentaje de polinización cruzada (% de granos amarillos) contra la distancia a partir de la fuente de polen de maíz amarillo. Se observó que la distancia máxima donde se encontró granos amarillos fue de 50 metros y de acuerdo al análisis de regresión la máxima distancia a la que se alcanza el 0.01 % de polinización cruzada a partir de una fuente de polen de maíz amarillo en la parcela es de 100 m a favor del viento y 10 m en contra. Estos resultados indican que el flujo genético entre maíz se lleva a cabo a distancias cortas y a medida que la distancia entre plantas aumenta, se reduce drásticamente el grado de entrecruzamiento, lo que sugiere que el entrecruzamiento entre plantas de maíz se puede reducir implementando barreras de aislamiento espacial. Información que brinda una respuesta al posible uso del cultivo de maíz transgénico en México, para reducir el flujo de polen y lograr la coexistencia de maíces transgénicos y convencionales.

Palabras claves: Entrecruzamiento de polen, maíz, polinización, transgénicos.

I. INTRODUCCIÓN

El flujo de genes vía polinización, es un proceso natural donde se intercambian genes entre las plantas, ayudados por el viento, aves, mamíferos o insectos y dependerá mucho del movimiento de estos; este proceso puede ocurrir entre las plantas sexualmente compatibles y los parientes silvestres, si las condiciones apropiadas se reúnen (Lentini *et al.*, 2007). En muchas plantas, aunque la producción de polen es abundante, el tamaño y peso limitan su capacidad de viajar largas distancias y mantenerse viable para producir el tubo polínico y fecundar los ovarios (Kiesselbach, 1980; Westgate *et al.*, 2003), sin embargo; la capacidad de dispersión del polen puede variar dependiendo del material genético y las condiciones climáticas, en especial, el viento (Serratos *et al.*, 1997; Mercer y Wainwright, 2008).

En trabajos experimentales se determinó que el cruzamiento entre campos de maíz puede realizarse a una distancia de 200 metros de la fuente de polen (Luna *et al.*, 2001) y en algunas ocasiones hasta 300 m, con un 0.02 % de cruzamiento (Stevens *et al.*, 2004).

Una de las preocupaciones actuales de los investigadores sobre los organismos genéticamente modificados (OGM's) mediante la tecnología del ADN recombinante y su liberación como cultivos comerciales, es el posible riesgo que representa para el ambiente ecológico de la diversidad genética de los cultivos y especies silvestres emparentadas. En maíz *Zea mays* L. (Poales: Poaceae), esa preocupación se concentró en México (Serratos *et al.*, 1996; Serratos *et al.*, 2000), porque nuestro país es el centro de origen primario, domesticación y

diversificación de más de 61 razas nativas de maíz reconocidas (Reyes, 1990; Matsuoka, 2005; CONABIO, 2006; Kato *et al.*, 2009), y ha causado tanta controversia por la creencia generalizada, de que estos maíces pongan en riesgo los maíces nativos, con una posible contaminación, principalmente mediante la dispersión de polen (Kato-Yamakake, 2004; Serratos-Hernández *et al.*, 2004; Turrent *et al.*, 2010), sin embargo; Kato-Yamakake (2004) planteó que existe la preocupación de que el maíz nativo pueda contaminarse con transgenes y concluye que el maíz transgénico no debe cultivarse en México mientras no se tenga información experimental que rechace la posible contaminación antes de tomar una decisión respecto de si se permite cultivar comercialmente o no el maíz genéticamente modificado. Por tal motivo es importante realizar estudios de dispersión de polen en maíz que ofrezcan una idea clara de la distancia que alcanza el polen, en la cual no suceda entrecruzamiento.

1.1. Objetivo general

Generar información sobre la distancia a la que viaja el polen de maíz para estimar el grado de contaminación genética, ante el posible uso maíz genéticamente modificado en coexistencia con maíces nativos/criollos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Los cultivos transgénicos

Los adelantos biotecnológicos ocurridos en los últimos treinta años, en particular los que han resultado de la aplicación de la Biotecnología, la Ingeniería Genética, y la Biología Molecular, permiten crear nuevas recombinaciones genéticas que no existen en la naturaleza, con la intención de aportar un beneficio para la agricultura, la salud humana, animal y en el ambiente y, en consecuencia, producir nuevos organismos, sean plantas, animales y microorganismos modificados genéticamente, conocidos más comúnmente como transgénicos (Villalobos, 2008). Desde inicio de los años 90`s del siglo pasado, los cultivos transgénicos, se emplean en la agricultura, en una escalada tal, que compromete la supervivencia de las bases genéticas de múltiples especies de plantas. El desarrollo e implementación de estos nuevos organismos en el contexto de la agricultura, es promovido, esencialmente, por los países desarrollados, existiendo legislaciones que regulan su utilización; sin embargo, las implicaciones en el plano de la agrobiodiversidad en los países en desarrollo, son muy discutidas; por los efectos nocivos ya probados en el ámbito del medio natural y el hombre, así como su relación con la bioética y la salud del hombre (Cué, 2012).

Desde 1996 se han aprobado y comercializado más de 10 cultivos transgénicos alimentarios y de fibra en todo el mundo. Estos cultivos comprenden desde los principales productos básicos como el maíz, la soja y el algodón, hasta frutas y verduras como la papaya, la berenjena y la calabaza. Las características de dichos cultivos resuelven problemas comunes que afectan los beneficios de los

cultivos para los consumidores y los niveles de producción para los agricultores; incluyendo tolerancia a la sequía, resistencia a los insectos y a enfermedades, tolerancia a los herbicidas y mayor nutrición y calidad de los alimentos. Los cultivos transgénicos contribuyen a crear sistemas de cultivo más sostenibles y ofrecen respuestas que resisten los desafíos del cambio climático (James, 2015).

En todo el mundo los cultivos transgénicos muestran un crecimiento constante; en 2014, se cultivó una superficie récord de 181.5 millones de hectáreas de cultivos transgénicos, lo que representa un aumento de 6 millones de hectáreas con respecto a 2013, de acuerdo con el informe publicado por el Servicio Internacional de Adquisición de Aplicaciones de Agrobiotecnología (ISAAA, por sus siglas en inglés), un total de 28 países cultivaron transgénicos durante el año. Los 20 países desarrollados y los 8 países en vías de desarrollo donde se cultivan transgénicos representan más del 60 % de la población mundial (ISAAA, 2015).

En México, para cultivos biotecnológicos se consideran tres etapas de liberación, en función de sus riesgos y de las medidas de bioseguridad asociadas, que son: experimental, piloto y comercial. De ellos les han aprobado 146 para 121.6 hectáreas en los estados del norte del país: Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango e incluso Nayarit (Seccam, 2012).

2.1.1. Importancia de los cultivos transgénicos en la agricultura

En los últimos datos provisorios a nivel mundial para el período que va de 1996 a 2013 muestran que los cultivos transgénicos aumentaron la producción por un valor de US\$ 133 mil millones; entre 1996 y 2012 disminuyó significativamente el uso de pesticidas, lo que permitió ahorrar aproximadamente 500 millones de kg de ingrediente activo. Solo en 2013, las plantaciones disminuyeron las emisiones de dióxido de carbono por una cantidad equivalente al retiro de circulación de 12.4 millones de automóviles durante un año. La tecnología de modificación genética, en promedio, ha reducido un 37 % el uso de pesticidas químicos, ha aumentado un 22 % el rendimiento de los cultivos y ha aumentado un 68 % las ganancias de los agricultores durante el período de 20 años entre 1995 y 2014 (Klumper y Qaim, 2014).

Estados Unidos continúa al frente de la producción con 73.1 millones de hectáreas. Con 3 millones de hectáreas más desde 2013, es decir, una tasa de crecimiento del 4 %, Estados Unidos registró el mayor aumento anual superando a Brasil, que registró el mayor aumento anual en los últimos cinco años. En Asia, China e India continúan al frente en la lista de países que cultivan productos transgénicos, con 3.9 millones de hectáreas y 11.6 millones de hectáreas sembradas en 2014, respectivamente. Los economistas británicos Brookes y Barfoot (2005), estiman que India aumentó los ingresos de la producción agrícola del algodón Bt en US\$ 2.1 mil millones solo en 2013. Vietnam e Indonesia, ambos países en vías de desarrollo, aprobaron la comercialización de cultivos transgénicos a partir de 2015 (ISAAA, 2014).

El crecimiento continúa en África y en América Latina, con una superficie cultivada de 2.7 millones de hectáreas en 2014, Sudáfrica se ubica a la cabeza en la lista de países en vías de desarrollo que cultivan productos transgénicos en África. Sudán aumentó la superficie cultivada de algodón Bt en aproximadamente un 50 % en 2014 y varios países africanos, por ejemplo, Camerún, Egipto, Ghana, Kenia, Malawi, Nigeria y Uganda, realizaron estudios de campo sobre varios cultivos en favor de los pobres, entre ellos los cultivos alimentarios de arroz, maíz, trigo, sorgo, banana, mandioca y batata. Estos cultivos pueden contribuir a crear resistencia y sostenibilidad de cara a los nuevos desafíos que plantea el cambio climático. En América, Brasil se ubicó segundo, solo por debajo de Estados Unidos, en la lista de cultivos transgénicos sembrados en 2014. Los 42.2 millones de hectáreas representan un aumento del 5 % respecto al 2013 (ISAAA, 2014).

De los 28 países que sembraron cultivos biotecnológicos en 2014 (Tabla 1), 20 son países en desarrollo (que incluyen el nuevo país adoptante de cultivos biotecnológicos, Bangladesh) y sólo 8 son países industrializados. Cada uno de los 10 países principales, de los cuales 8 son países en desarrollo, cultivó más de 1 millón de hectáreas y así construyó cimientos sólidos a nivel mundial para el crecimiento diversificado y continuo en el futuro. Más de la mitad de la población mundial, ~60% o sea ~4 mil millones de personas, viven en los 28 países que siembran cultivos biotecnológicos (Clive, 2014).

Cuadro1. Superficie mundial por país de cultivos biotecnológicos en 2014.

| Posición | País | Superficie sembrada ¹ | Cultivos Biotecnológicos |
|----------|-----------------|----------------------------------|---|
| 1 | Estados Unidos* | 73.1 | Maíz, soja, algodón, canola, remolacha azucarera, alfalfa, papaya y calabaza. |
| 2 | Brasil* | 42.2 | Soya, maíz, algodón |
| 3 | Argentina* | 24.3 | Soya, maíz, algodón |
| 4 | India* | 11.6 | Algodón |
| 5 | Canadá* | 11.6 | Canola, maíz, soja, remolacha azucarera. |
| 6 | China* | 3.9 | Algodón, papaya, álamo, tomate, pimiento |
| 7 | Paraguay* | 3.9 | Soya, maíz, algodón |
| 8 | Pakistán* | 2.9 | Algodón |
| 9 | Sudáfrica* | 2.7 | Maíz, soja, algodón |
| 10 | Uruguay* | 1.6 | Soya, maíz |
| 11 | Bolivia* | 1.0 | Soya |
| 12 | Filipinas* | 0.8 | Maíz |
| 13 | Australia* | 0.5 | Algodón, canola |
| 14 | Burkina Faso* | 0.5 | Algodón |
| 15 | Myanmar* | 0.3 | Algodón |
| 16 | México* | 0.2 | Algodón, soja |
| 17 | España* | 0.1 | Maíz |
| 18 | Colombia* | 0.1 | Algodón, maíz |
| 19 | Sudan* | 0.1 | Algodón |
| 20 | Honduras | <0.1 | Maíz |
| 21 | Chile | <0.1 | Maíz, soja, canola |
| 22 | Portugal | <0.1 | Maíz |
| 23 | Cuba | <0.1 | Maíz |
| 24 | Republica Checa | <0.1 | Maíz |
| 25 | Rumania | <0.1 | Maíz |
| 26 | Eslovaquia | <0.1 | Maíz |
| 27 | Costa Rica | <0.1 | Algodón, soja |
| 28 | Bangladesh | <0.1 | Berenjena |

¹Millones de hectáreas, Superficie total=185.5, *19 mega países biotecnológicos que cultivan 50,000 hectáreas, o más, de cultivos GM.

Fuente: James, 2010.

Park *et al.* (2010), desarrollaron un estudio de publicaciones científicas relativas a la utilización de transgénicos en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible y, estos autores afirman que “sería imprudente ignorar los cultivos transgénicos como una herramienta útil para satisfacer las aspiraciones de alcanzar un desarrollo global cada vez más sostenible”, en el cual, concluyen que hay una gran cantidad de evidencias científicas sobre el papel clave de los cultivos transgénicos ante los retos alimenticios del presente y del futuro. Así, se demuestra también que estos cultivos contribuyen activamente en los tres pilares tradicionales de la sostenibilidad, es decir, el ámbito económico, ambiental y social.

Actualmente hay mucha presión para no solo ampliar la lista de cultivos transgénicos, y el porcentaje de sus usos, sino también de que se les añada a estos la posibilidad de comercializar animales modificados genéticamente. El problema principal de la utilización de productos transgénicos es que, a día de hoy, no se saben realmente las consecuencias de su consumo en humanos a corto y largo plazo. Si bien es cierto que la utilización en cultivos evita la utilización de millones de litros y kilos de pesticidas, también es cierto que la mayoría de las empresas que utilizan los transgénicos no aportan otras opciones para el control y eliminación de plagas. Lo que sí está claro es que la utilización de transgénicos aumenta el beneficio de las empresas ya que el tamaño de las plantas puede ser mayor (al no afectarle las plagas las cosechas son mucho mayores y más abundantes, etc.). Por otro lado, en muchas ocasiones las empresas lo que hacen es crear semillas estériles de un solo uso para que el granjero tenga, necesariamente, que comprar al año siguiente nuevamente la

simiente si quiere volver a plantar el cereal, tubérculo, verdura, etc. y si esto se hace con plantas, es lógico pensar que los animales y su comercio selectivo será el siguiente paso (Herrero, 2014).

2.1.2. Análisis y manejo del riesgo

Está ampliamente documentado que todo adelanto científico o tecnológico implica riesgo y que es a través del análisis y manejo que la sociedad haga uso de ellos y reduzca los riesgos y aproveche adecuadamente sus beneficios (Villalobos, 2008). Reconociendo que no existe tecnología con riesgo cero, la humanidad acepta los frutos de los avances tecnológicos e implícitamente acepta los riesgos que conllevan, mientras aprenden a manejarlos. Existen muchos ejemplos al respecto, algunos que hoy en día tan comunes, pero en su momento causaron incertidumbre y hasta temor, como la vacuna contra la viruela, que ha permitido erradicar este mal que afectaba a la humanidad, u otro aún más familiar como el uso del automóvil, que siendo incuestionable su eficiencia como medio de transporte, sin lugar a dudas su uso representa un alto riesgo para la seguridad de los usuarios. Y sabemos que los accidentes automovilísticos han causado la pérdida de muchas vidas humanas y, no obstante, la venta de automóviles se incrementa cada año (Luhmann, 1991).

Los marcos regulatorios de los diferentes países del mundo en donde se ha permitido la producción y consumo de plantas modificados genéticamente, establecen en todos ellos que el empleo de esta tecnología debe suspenderse

inmediatamente, cuando a juicio de las autoridades competentes exista riesgo de daño (Acevedo, 2009).

La Bioseguridad o la seguridad en el uso de los transgénicos se sustenta en el análisis de riesgo y este tiene tres etapas principales: la evaluación del riesgo, el manejo del riesgo y la comunicación del riesgo (Ortiz y Escurra, 2003).

Las Instituciones europeas entienden que la coexistencia existe cuando hay una presencia menor del 0.9% de OGM`s en cultivos o cosechas convencionales o ecológicos. Por este motivo, en los textos referentes a la coexistencia, aparecen referencias a la presencia de elementos de OGM`s en la cadena agro-alimentaria en el contexto de “cultivos libres de OGM`s”. Se hace alusión a conceptos como “reducir al mínimo” o “limitar el flujo” de OGM`s. Independientemente de la equivocada interpretación de la ley que se hace para permitir hasta un 0.9%, hoy día en la Unión Europea se han establecido normas como permitir hasta un 0.9% de OGM`s en productos no modificados genéticamente (convencionales y ecológicos), cuando gran parte de los movimientos sociales reivindican la presencia cero como única definición de “libre de OGM`s”. En todo caso, las organizaciones están abiertas a considerar el cero técnico. Se entiende que la presencia de un OGM en una semilla, cultivo, cosecha, pienso o alimento humano o ganadero, ecológico o convencional significa que, deja de ser ecológico o convencional (COAG, 2008).

Mucho se ha escrito sobre los daños que causan el uso, cultivo y consumo de los transgénicos a la salud humana, al ambiente y a la diversidad biológica. Sin embargo, y recordando que han pasado diecinueve años desde que estos se consumieron por primera vez, no existe un solo caso documentado de daño a la

salud humana o animal. Hasta ahora se ha hecho referencia al uso de los cultivos alimenticios transgénicos; sin embargo, el riesgo ambiental real que se ha mencionado pudiera estar vinculado con la modificación que se pretende dar al destino de estos cultivos. En este sentido el manejo de estos nuevos productos transgénicos sin lugar a duda tendrá que ser diferente al que se da a un cultivo para uso alimenticio comercial, pues queda claro que de llegar estos a la cadena trófica, podrían causar serios problemas de salud humana y animal (Villalobos, 2008).

Las principales preocupaciones de la producción y consumo de plantas genéticamente modificadas, se relaciona con la posibilidad de un aumento de alérgenos, toxinas u otros compuestos nocivos en los productos que se ingieren; así como también en la transferencia horizontal de genes relacionados con la resistencia a antibióticos (FAO-WHO, 2000). Desde el año 1996 se han estado consumiendo productos o alimentos de origen de plantas genéticamente modificadas y desde esa fecha no se ha registrado algún caso de daño en la salud humana o animal.

2.1.3. Riesgos para la agricultura

Cualquier tipo de agricultura influye en el ambiente, por lo que es de esperarse que también la Ingeniería Genética aplicada a ella tenga su impacto. En este sentido, las repercusiones de los cultivos transgénicos en el sector agropecuario pueden ser positivas o negativas, según la forma y el lugar donde se empleen (Villalobos, 2008).

La cuestión de la producción agrícola a partir de cultivos transgénicos, es sin lugar a dudas, unas de las temáticas más controvertidas de la actualidad y los Estados dudan en resolverla después de haber sido, en un primer momento, favorables a esta práctica innovadora, de tal manera que, de acuerdo a Fresno (2005), “los organismos genéticamente modificados llegaron para quedarse”.

Con base en Simón (2009) se reconoce que ha ocurrido una transferencia de genes entre plantas modificadas genéticamente de soja, y algunas hierbas indeseables como el amaranto, se ha convertido en resistente al herbicida Roundup e invade 5000 hectáreas de soja transgénica que provocó su abandono por parte de los agricultores y otras 50,000 están amenazadas en Estados Unidos. El riesgo siempre se ha visto como negativo, y se debe evitar o minimizar, pero también podría ser considerado como un fenómeno positivo, porque compartir riesgo también implica responsabilidades. Existen una estructura básica de poder dentro de la sociedad mundial del riesgo, que divide a quienes producen y se benefician de los riesgos y a los muchos que se ven afectados por esos mismos riesgos (Beck, 1999).

Con la liberación de este tipo de cultivos a los campos agrícolas restaría preguntarse si afecta negativamente a la biodiversidad y a la variabilidad genética de los cultivos y sus parientes silvestres. Es importante señalar que a la fecha existe muy poca información y evidencias del posible daño a las cuatro especies transgénicas más importantes que se cultivan comercialmente (maíz, soya, algodón y canola). De estos, el maíz es el que más atención ha atraído, debido a que es una especie de polinización cruzada (Villalobos, 2008).

Más aún, es importante conocer que el maíz actual no podría sobrevivir en condiciones naturales sin la mano del hombre, debido en mucho a la presión de selección que se ha ejercido por los mejoradores y los propios agricultores durante cientos de años. Basta comprender que la semilla de maíz no se dispersa por sí misma, y que, si sus semillas no son desgranadas y dispersadas por la mano del hombre, difícilmente se puede lograr el siguiente ciclo de cultivo (Martínez-Soriano y Leal- Klevezas, 2000). El flujo genético de transgenes es bien documentado. Para citar algunos ejemplos, se ha detectado flujo génico de una variedad resistente a herbicidas en canola (*Brassica* spp.) (Rieger *et al.*, 2002), y en una especie de *Agrostis* sp. (Poaceae) resistente a herbicidas (Reichmar *et al.*, 2006). Un ejemplo clásico de las implicaciones de la presencia de OGM`s en comida es el caso del maíz de la marca StarLink. El maíz StarLink, producido por la compañía Aventis, es un maíz resistente al glifosato que fue aprobado para consumo animal solamente. Este maíz fue encontrado en tortillas de la empresa Taco Bell y los gastos generados por producto retirado del mercado está calculado en \$1000 millones (Li, 2012).

En una posición más moderada el mencionado documento de las Academias recomienda que se hagan esfuerzos coordinados para investigar los posibles efectos ambientales, tanto positivos como negativos de las tecnologías de plantas transgénicas en cada una de las aplicaciones específicas y que todos los efectos ambientales de dichas plantas sean evaluados mediante una comparación con los efectos de los métodos agrícolas ordinarios que se utilizan actualmente en los lugares donde se desarrolla o siembra el cultivo transgénico (Darío, 2005).

2.1.4. Coexistencia entre cultivos transgénicos y convencionales

Hasta ahora se han planteado preocupaciones del posible flujo genético de los cultivos transgénicos a las plantas de la misma especie no transformada, las cuales se dan fundamentalmente desde el punto de vista ambiental, pues se especula que el flujo genético puede erosionar la variabilidad de la especie. Sin embargo, cabe mencionar que, en condiciones agrícolas tradicionales, es casi imposible evitar que existan pequeños niveles de materiales extraños como semillas, malezas o de otros cultivos en el producto, por lo que se establecen niveles o umbrales legales para minimizar la presencia de estos materiales (Villalobos, 2008).

La coexistencia entre diferentes tipos de cultivo existe desde hace mucho tiempo, y es algo común en la práctica de la agricultura. El flujo génico no es exclusivo de los cultivos transgénicos, por ello está por demás decir que el riesgo con los cultivos transgénicos está sobredimensionado. Se han realizado diversos estudios para conocer las distancias a las que viaja el polen del maíz, los resultados han

sido variables, al respecto Luna et al. (2001) observaron polinización cruzada hasta un máximo de 200 metros.

Un ensayo de coexistencia realizado por Melé *et al.* (2004) encontró que el flujo génico en maíz disminuía rápidamente en relación con la distancia, se tomaron 255 muestras y se estableció que tenían menos del 0.9 % de tolerancia de presencia de genes provenientes de cultivos GM a 10 metros de distancia.

En su estudio Messeguer *et al.* (2006) encontraron que el flujo génico en maíz disminuía rápidamente en relación con la distancia, se tomaron 255 muestras y se estableció que tenían menos del 0.9 % de tolerancia de presencia de genes provenientes de cultivos genéticamente modificados a 10 metros de distancia.

La coexistencia entre cultivos es una práctica agrícola tradicional y se aplica en función de las especies, sus ciclos, su sistema de polinización, sus mercados y entre otras variables. Algunos ejemplos son los cultivos de trigo, de diferente destino (para pan y trigo forrajero), cebada (para cerveza y forraje), maíz (para consumo humano y para almidón). La coexistencia entre transgénicos y no transgénicos se da en forma eficiente usando prácticas como: establecer parcelas de cultivos transgénicos en forma tardía para evitar la coincidencia de floración con cultivos convencionales, establecer las parcelas de los cultivos transgénicos a distancias técnicamente recomendadas para evitar la polinización cruzada, establecer bordos o hileras de plantas no transgénicas en la periferia de estos cultivos para minimizar el flujo de polen (en el caso del maíz, de 3 a 4 hileras), desespigar o emascular las plantas transgénicas para evitar el desarrollo de polen (cuando se trata de trabajos de investigación principalmente), sembrar cultivos transgénicos en superficies agrícolas donde no existan antecedentes de cultivo de

variedades criollas o parientes silvestres y promover la rotación de cultivos y la destrucción de los residuos de cosecha (Villalobos, 2008).

Estudios científicos señalan que prácticamente se puede reducir el flujo genético, aún para especies de polinización cruzada como el maíz, manejando las distancias de las parcelas entre plantas transgénicas y convencionales. Al respecto, Baltazar *et al.* (2005), concluyen que el manejo del cultivo, la ecología local, la distancia física, la sincronía de la floración y la selección humana, influenciarán directamente el nivel del flujo genético en las condiciones de campo de los productores. Respecto a las distancias de plantas de maíz y flujo genético específicamente, Luna *et al.* (2001), demostraron que la polinización cruzada de maíz entre variedades diferentes es muy limitada después de los 100 metros de separación, y que no ocurre polinización a distancias superiores a 200 metros. Estos resultados apoyan a muchos productores e investigadores respecto a la factibilidad de la coexistencia entre materiales transgénicos o no, si está de por medio una distancia científicamente predeterminada, aunado a otras medidas referidas anteriormente.

PRICE (Practical Implementation of Coexistence in Europe), (2014): Fue un proyecto que se desarrolló durante tres años en el que se evaluó la viabilidad de la aplicación de las estrategias de coexistencia europeas y sus costos, tanto para los agricultores como para los operadores de la cadena de suministro. El informe concluyó que las estrategias actualmente implementadas en la U.E. para asegurar la coexistencia de cultivos transgénicos y no transgénicos son viables en la práctica, tanto a nivel de la explotación agraria como a lo largo de la cadena de suministro de alimentos y piensos.

2.2. Polinización en las plantas

La polinización se define como el proceso de transporte de polen desde las anteras de una flor hasta un estigma localizado en la misma flor, en la misma planta o en una planta diferente de la misma especie y que conduce a la fertilización del óvulo para el posterior desarrollo del fruto. Sin embargo, la fertilización cruzada tiene mayor valor adaptativo al promover la mezcla de genes y mayor vigor de la progenie. Por esto, las plantas mediante procesos de selección, han desarrollado mecanismos complejos para asegurar este tipo de cruzamiento (Robacker *et al.*, 1988). Los vectores o agentes encargados de transportar el polen de una flor a otra, son tres: el viento, el agua y los animales (en este último caso, se denomina polinización biótica) (APOLO, 2002).

La polinización es vital para la producción de alimentos y los medios de vida de los seres humanos, y relaciona directamente los ecosistemas silvestres con los sistemas de producción agrícola. La gran mayoría de las especies de plantas fanerógamas sólo producen semillas si los animales polinizadores han transportado previamente el polen de las anteras a los estigmas de sus flores. Si este servicio no se realizará, muchas especies y procesos del ecosistema conectados entre sí, dejarían de existir (FAO, 2014).

En la naturaleza se dan distintos procesos que aseguran la polinización de las diferentes especies de plantas: la anemogamía, cuyo agente es el viento, sistema propio de muchas especies, entre las que se hallan las especies de Fagaceae, Betulaceae, Juglandaceae, Gramineae (Poaceae) y el olivo. La hidrogamía, tiene

como agente el agua; una familia típicamente hidrógamica está constituida por las Zosteraceae (Viejo, 1997).

La zoogamia utiliza como agentes a los animales y, a su vez, en función del grupo de que se trate, recibe distintas denominaciones: quiropterogamia, lleva a cabo por los murciélagos y de importancia restringida a los trópicos, ornitogamia a través de las aves y la entomogamia realizada por los insectos. Los insectos son organismos especialmente apropiados para polinizar, ya que tienen un tamaño relativamente semejante al de las flores y, probablemente sus mayores ventajas son voladoras y, por lo tanto, son muy móviles. Para una planta, el uso de vectores de polen selectivos tiene la ventaja de que se evita despilfarrar grandes cantidades de polen, con el consiguiente ahorro, en particular de elementos parecidos para un vegetal como el Nitrógeno (Mattson, 1980).

2.2.1. Flujo de genes en los vegetales

El flujo de genes es el movimiento natural de éstos entre organismos individuales, a través de un proceso de recombinación sexual o hibridación (Eastman y Sweet, 2002). En las plantas, este proceso ocurre cuando el polen poliniza y fertiliza exitosamente otra planta. La dispersión del polen puede representar una proporción significativa del flujo de genes en plantas que por mucho tiempo han sido de interés para la agricultura, y esta acción simboliza un potencial de contaminación dentro de un sistema de producción (Levin y Kerster, 1974).

El flujo de genes en vegetales por vía polinización es un proceso natural donde se intercambian genes entre las plantas, ayudados por el viento (maíz), aves (flores

de jardín), mamíferos (cactáceas) o por insectos (árboles frutales) y esto dependerá mucho del movimiento de estos (Handel, 1983). Este proceso puede ocurrir entre las plantas sexualmente compatibles y los parientes silvestres, si las condiciones apropiadas se reúnen (Lentini *et al.*, 2007). El flujo de genes mediado por el polen, sólo toma importancia relevante cuando el polen viable foráneo compite con éxito con el polen localmente producido para formar semilla viable. En muchas plantas, aunque la producción de polen es abundante, el tamaño y peso limitan su capacidad de viajar largas distancias y mantenerse viable para producir el tubo polínico y fecundar los ovarios (Westgate *et al.*, 2003).

El comportamiento del polen difiere no sólo según sus características intrínsecas sino también de acuerdo con variables externas, relacionadas con las características topográficas y climáticas de la región. Esta aproximación a los ecosistemas actuales permite obtener modelos de referencia para la búsqueda de análogos modernos en estudios orientados al conocimiento de la historia de la vegetación (Overpeck *et al.*, 1985; Burry, 2002).

Un estudio en Costa Rica sobre flujo de genes entre frijol, con el objetivo de analizar el flujo de genes entre frijol común silvestre y cultivado, determinó el porcentaje de alogamia en condiciones naturales de crecimiento del frijol silvestre y en estación experimental, cuyo resultado encontrado fue que en el frijol cultivado (Alajuela) el porcentaje de cruza varió entre 0,007 y 0,028 %; mientras que en frijol silvestre (Quircot), fue entre 0 y 0,199 % (Chaves, 2009).

Estudios genéticos con marcadores moleculares también pueden revelar flujo genético entre diferentes especies. Por ejemplo, *Phaedranassa viridiflora* Baker y *Phaedranassa dubia* (Kunth) son dos especies de la familia Amaryllidaceae que

existen en simpatria en la Reserva Geobotánica Pululahua, en el cráter del mismo nombre (provincia de Pichincha). El color de la flor de *P. viridiflora* es amarillo, mientras que el de *P. dubia* es predominantemente rojo. En el cráter del Pululahua también se encuentran individuos del género con flores anaranjadas (Oleas *et al.*, 2013).

También, el flujo génico es un componente fundamental de la estructura poblacional, ya que sus patrones y niveles determinan hasta qué grado cada población de una especie es (o no) una unidad evolutiva independiente y la tasa de movimiento de genes de una población a otra puede determinar si la especie evoluciona al azar (por deriva génica) o responde de manera adaptativa (por selección natural) y así puede afectar de manera importante a la evolución de las especies (Futuyma, 2009; Eguiarte, 2009).

De esta manera, el flujo génico puede determinar la persistencia y adaptación de poblaciones locales, las tasas de extinción de las poblaciones y especies, la evolución de los rangos de adaptación y distribución de las especies y de muchas propiedades ecológicas. Si el flujo génico entre poblaciones de una especie es alto, entonces todas las poblaciones evolucionan de manera conjunta, pero si es muy bajo, las poblaciones de una especie empiezan a divergir y pueden evolucionar casi independientemente. Si continúa la diferenciación, puede llegar a surgir aislamiento reproductivo y en consecuencia el establecimiento de linajes evolutivamente independientes (o sea, se da un proceso de especiación) (Hedrick, 2005).

2.2.2. Factores que intervienen en el recorrido del polen

El flujo genético es un proceso que ocurre naturalmente vía dispersión de semillas, movimiento de polen o individuos, y su incorporación al acervo génico en una nueva localidad. El flujo genético depende de factores como la forma de dispersión, tiempo de viabilidad, distancia de dispersión, entre otros. El intercambio genético entre individuos es estudiado mediante la genética de poblaciones (Oleas, 2014). En el caso del flujo genético en angiospermas está estrechamente ligado a los diferentes tipos de flores, frutos y semillas. Existe un sin número de formas y colores en flores para atraer polinizadores y transferir el polen a otras flores. Así mismo los frutos y semillas tienen adaptaciones para dispersión por animales, viento, agua, entre otros (Stern *et al.*, 2008).

La posibilidad de que granos de polen sean depositados sobre los estigmas de una flor, iniciando de esta manera el proceso de fecundación, dependerá de factores como tamaño, densidad y carga eléctrica del grano de polen; tamaño y localización de las estructuras reproductivas; velocidad del viento; magnitud del campo eléctrico del medio y viscosidad del aire (Bowker y Crenshaw, 2007). En el caso del maíz el grano de polen no tolera la desecación, ya que pierde agua y viabilidad de manera rápida, y tiene una baja tasa de movilidad por su tamaño y peso, y por consiguiente la mayor proporción queda depositado cerca de la planta fuente (Luna *et al.*, 2001).

2.2.2.1. Factores físicos

El efecto del viento sobre el transporte de polen y la dispersión de semillas es de suma importancia, ya que con la fuerza del viento el polen puede ir de una dirección diferente al receptor y que no logre la fecundación. Un ejemplo en alfalfa criolla *Kochia scoparia* (L.) Schrad. (Caryophyllales: Amaranthaceae), Mulugeta *et al.* (1994) observaron que la deposición de los granos de polen era mayor en la dirección de los vientos dominantes; este patrón es responsable según los autores citados del flujo de genes desde la fuente, pudiendo alcanzar dicho flujo grandes distancias. Precisamente esta posibilidad de que el viento mediante el transporte de granos de polen sirva de vector al flujo de genes es un tema de máxima preocupación respecto de la bioseguridad, pues se teme que las nuevas características incorporadas en las variedades transgénicas puedan ser transmitidas a plantas emparentadas nativas o silvestres dando lugar a una descendencia híbrida con mayor potencial para convertirse en maleza.

Bravo *et al.* (2002), en Bolivia (donde existen numerosas especies del género *Solanum* L. emparentadas con *Solanum tuberosum* L. [Solanales: Solanaceae]), evaluaron el riesgo de diseminación de polen de cultivares de papas tetraploides con el objeto de fortalecer las normas de bioseguridad en relación con la liberación de genotipos transgénicos, y sus observaciones les permitieron determinar la importancia del viento en la dispersión del polen. Asimismo, trabajos realizados en la Universidad de Exeter por Hoyle y Cresswell (2007) usando datos de velocidad y dirección del viento de distintos sitios del continente europeo,

sugieren que se está subestimando el potencial de traslado del polen, pudiéndose producir cruces entre cultivos genéticamente modificados con no modificados.

2.2.2.2. Factores biológicos.

En un proceso natural de polinización, el polen se desprende de las anteras posándose sobre los estigmas, aunque en ocasiones, ambas partes no coinciden en su maduración; además es importante señalar que aproximadamente el 95% de los óvulos de un elote sufren polinización cruzada y sólo el 5% es autopolinizado. El polen en su mayor parte, viaja por el viento, aunque existen otros tipos de acarreadores menores (insectos); su desprendimiento puede durar varios días y su viabilidad entre 18 y 24 horas, en condiciones ambientales favorables (Santoyo, 2004). Además, la viabilidad del polen depende de factores relacionados con su contenido de agua y condiciones climáticas (Fonseca y Westgate, 2005).

En cuanto la polinización realizada por abejas, Reyes *et al.*, (2000) señalan que factores como la temperatura y la radiación solar influye en el vuelo de las abejas, las cuales no podrán volar a una temperatura bajo los 9 °C, el vuelo y la temperatura esta correlacionado linealmente a un rango de 14-22 °C, es decir, de los catorce grados la actividad de las abejas es creciente hasta los 22 °C y también no volaran si no hay suficiente luz.

2.3. Dispersión de polen en gramíneas

Muchas especies vegetales están adaptadas a la polinización por el viento (plantas anemófilas), por ejemplo, las ortigas, alisos, robles, abedules, hayas, la mayoría de las coníferas o las gramíneas. Los granos de polen de estas plantas se producen en grandes cantidades y suelen ser pequeños y/o secos, fáciles de transportar por el viento. En el caso de las gramíneas, los tallos que portan sus inflorescencias son normalmente largos y delgados, moviéndose de forma efectiva incluso con una leve brisa. En otros casos, las plantas muestran otras adaptaciones a este tipo de polinización, como la presencia de estigmas plumosas que les permiten atrapar el polen transportado por el viento, o unos filamentos estaminales largos como hilos, con las anteras expuestas al viento colgando libremente en sus extremos (Rosado, 2000).

La mayoría de las especies de las gramíneas son de polinización cruzada, siendo el aire el principal y, a veces el único vehículo del polen que se traslada de una planta a otra. Esto se debe al tipo de flor que tienen estas plantas que son tan modestas y sin ningún atractivo especial; ellas no necesitan atraer algún insecto para que realice la polinización (Hyck, 1974).

2.3.1. Flujo de genes en el maíz

Los maíces son polinizados por el viento, y también en algunas regiones por abejas que son atraídas por la cantidad impresionante de polen producida (Reyes *et al.*, 2000). Por las características, el maíz es una planta de polinización abierta

(anemófila) propensa al cruzamiento, la gran mayoría de los granos de polen viajan de 100 a 1000 m (Jugenheimer, 1988; Reyes, 1990; Benavidez *et al.*, 2010). El polen en su mayor parte viaja por el viento, aunque existe otros tipos de acarreadores menores; su desprendimiento puede durar varios días y su viabilidad entre 18 y 24 horas, en condiciones ambientales favorables (Santoyo, 2004). El polen del maíz (*Zea mays* L.), es fácilmente transportado a largas distancias por acción del viento, pudiendo ocurrir un flujo de polen entre campos cercanos con sincronía floral y con la probabilidad de ocasionar variaciones genéticas indeseables (Guzmán, *et al.*, 2008). Durante el recorrido del polen del maíz enfrenta condiciones desfavorables que impiden que llegue a su objetivo.

El polen del maíz es un vector en la transmisión y flujo de información genética entre poblaciones que coinciden en espacio y tiempo (Aylor *et al.*, 2003). El flujo genético en maíz depende de la sincronización entre la receptividad de los estigmas y la liberación y viabilidad de los granos de polen. Guzmán *et al.* (2008) cuantificaron el flujo de polen entre dos híbridos de maíz de distinto color de endospermo, cultivado bajo condiciones de riego. El lote experimental consistió en una cuadrícula central, que correspondió a la fuente de polen amarillo y cuatro ejes (norte, sur, este y oeste) formados por once subparcelas de maíz blanco, para una distancia máxima de 61 y 51 m para los ejes norte y sur de la fuente de polen amarillo; a un metro el flujo de polen fue de 25.65 y 5.80 %; mientras que para la distancia máxima (51 m) del eje norte y sur, el flujo fue de 0.79 y 0 %, respectivamente. En el caso de los ejes este y oeste para la distancia de 1 m, los valores fueron de 15.32 y 13.35 %; mientras que para la distancia máxima (61m) del eje este-oeste, el flujo fue de 0.42 y 0.05 %, respectivamente. El flujo de polen

disminuyó exponencialmente a medida que aumentó la distancia de la fuente. El comportamiento del viento y el efecto de la turbulencia influyeron en la distancia recorrida por el polen. En este sentido, la aplicación de un modelo matemático permitió estimar una distancia segura de 100 m para prevenir el cruzamiento entre dos genotipos diferentes (líneas, poblaciones, híbridos, parientes silvestres), quedando demostrado que mediante el uso de modelos matemáticos es posible estimar distancias seguras de aislamiento para evitar flujo de polen indeseado.

Resultados obtenidos en el ensayo de flujo genético de la tecnología Herculex I en el cultivo de maíz obtuvieron un porcentaje inicial y final en el sentido de la dirección del viento menor al 0.050% a una distancia de 50 metros. Y a partir de los 300 metros no se encontraron granos amarillos en los receptores blancos. Este resultado, al igual que las prácticas comunes en la producción de semillas híbridas de maíz, concuerdan, que lo normal es una distancia de aislamiento máximo de 300 metros de cualquier tipo de fuente de polen del mismo cultivo. Con esta distancia se evita con un alto grado de seguridad la contaminación con polen extraño (ICA, 2006). Baltazar et al. (2015), encontraron resultados similares, con una tasa de entrecruzamiento $\leq 1\%$ después de 20m y de 0.2-0.1% después de 50m en 8 localidades, de seis estados del norte de México.

Sauthier y Castaño (2004) realizaron una experiencia con maíz en Santiago del Estero, Argentina. Con el objeto de evaluar distancias posibles de recorrido del polen mediante el conteo de granos a diferentes distancias de la fuente; estos detectaron granos cuajados hasta 597 m, constatándose que la cantidad estuvo influenciada por la dirección de los vientos más frecuentes. De acuerdo con esta

observación, los autores concluyeron que la distancia de aislamiento de 250 m establecida en Argentina por el Reglamento Técnico Nacional era insuficiente.

Investigaciones realizadas por Robayo (2014) encontraron una tendencia de las dispersiones en direcciones sur-este y sur-oeste, con probables distancias de recorrido de 2.2 a 20 km en la mayor concentración de partículas correspondiente a 1.0×10^{-13} mg m⁻³, probando que éstas pueden recorrer distancias mayores a 300 y 500 m asumidos como medidas de bioseguridad.

Un estudio de flujo genético en maíz genéticamente modificado en Sudáfrica entre 2005 y 2007, en donde se sembraron maíz amarillo (modificado genéticamente) en la parte central en 0.0576 ha, rodeado con maíz blanco no genéticamente modificado en una superficie de 13.76 ha en dos regiones geográficas diferentes a lo largo de dos temporadas. Comparando los resultados que obtuvieron y con la ecuación basado en la logarítmica de ecuaciones de polinización cruzada sobre la distancia, 45 m es suficiente para minimizar la polinización cruzada entre <1.0 y 0.1%, 145 m de <0.1 a 0.01% y 473 m de <0.01 a 0.001%. Sin embargo, en comparación con esto, un teórico requiere una distancia de aislamiento de 135 m para garantizar un nivel mínimo de la polinización cruzada entre <1.0% y 0.1%, 503 m de <0.1% a 0.01% y 1.8 km para <0.01% a 0.001% basado en valores altos de polinización cruzada (Viljoen y Chetty, 2011).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción de sitio Experimental

El presente trabajo se realizó en dos localidades; cada una ubicada en los estados de Sinaloa y Tamaulipas.

3.1.1. Predio 1 (Sinaloa)

El predio 1 correspondió al Lote El Temporal propiedad de Fredy Angulo Hernández; ubicado en la localidad de El Camalote, Culiacán, Sinaloa en las coordenadas 24° 22' 47.3'' latitud N y 107° 17' 57.13'' longitud Oeste, cuyas siembras se realizaron durante el ciclo de siembra otoño-invierno en la eco-región Planicie Costera Sinaloense con Selva Baja Caducifolia. La localidad de El Camalote está ubicada a 20 msnm, esta zona presenta un clima cálido subhúmedo. En esta parte predominan los suelos vertisol. La temperatura media anual del estado es alrededor de 25°C, las temperaturas mínimas promedio son alrededor de 10.5°C en el mes de enero y las máximas promedio pueden ser mayores a 36°C durante los meses de mayo a julio. Las lluvias se presentan en el verano durante los meses de julio a septiembre, la precipitación media del estado es de 790 mm anuales (INEGI, 2011).

3.1.2. Predio 2 (Tamaulipas)

La segunda evaluación se realizó en el estado de Tamaulipas, el lote propiedad del Sr. Guadalupe Muñoz, en el municipio de Díaz Ordaz, Tamaulipas; en las coordenadas 24° 37'83.9'' latitud Norte y 107°16' 60. 0'' longitud Oeste. Este predio cuenta con un suelo del tipo migajón-arenoso (70% de arena, 20% limo y 10% de arcilla); 2.1% de materia orgánica, pH de 6.1 y una capacidad de intercambio catiónico de 12.2 meq/100 g. presenta un rango de temperatura entre los 20-24° C. Una precipitación de los 400-600 mm anuales, con un clima Seco muy cálido y cálido (58%) y Semiseco muy cálido y cálido (42%) (INEGI, 2011).

3.2. Procedimiento experimental

3.2.1. Material genético

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el maíz convencional germoplasma DK1030 (amarillo) y germoplasma NM1078 (blanco), material proporcionado por Syngenta Agro de México S.A. de C.V. (San Lorenzo 1009, Primer Piso, Colonia Del Valle, 03100, México, D.F.).

Las siembras se realizaron bajo condiciones de bioseguridad, en parcelas con un aislamiento de más de 300 m de cualquier otro lote con siembras comerciales de maíz y con un desfase de 21 días en la fecha recomendada de siembra para evitar la sincronía de la etapa floral con los maíces de los predios vecinos y evitar la polinización cruzada, quedando establecida la fecha de siembra para el 18 de

noviembre de 2012 para el predio de Tamaulipas y el 14 de marzo de 2013 para el estado de Sinaloa.

3.2.2. Diseño del experimento

El estudio para la evaluación de flujo genético se realizó con una parcela única como fuente de polen amarillo (donador) con un tamaño de 10 surcos, cada surco de 10 metros lineales de largo y un espacio entre surco de 0.8 metros. La siembra del híbrido donador de polen se hizo manualmente, depositando 50 semillas por surco, con un aclareo posterior a 34 plantas por surco, equivalente a 85K plantas/ha, y se realizaron dentro de la ventana de siembra del ciclo otoño-invierno. El híbrido NM1078 de maíz blanco se sembró alrededor de la parcela emisora de polen amarillo, dispuestos en espacios de 2 surcos de ancho y dos metros de largo, con distanciamientos de 1, 2, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 metros, a partir del último surco de la fuente de polen en 8 puntos cardinales (Fig. 1).

El manejo agronómico del cultivo durante el desarrollo del experimento y las actividades de mantenimiento (fertilización, riego, control de plagas, etc.) se realizaron en base a las prácticas típicas de la región, y de acuerdo a las guías técnicas para el cultivo de maíz desarrolladas por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, para cultivar maíz en Tamaulipas y Sinaloa, respectivamente (González *et al.*, 2004; INIFAP, 2010).

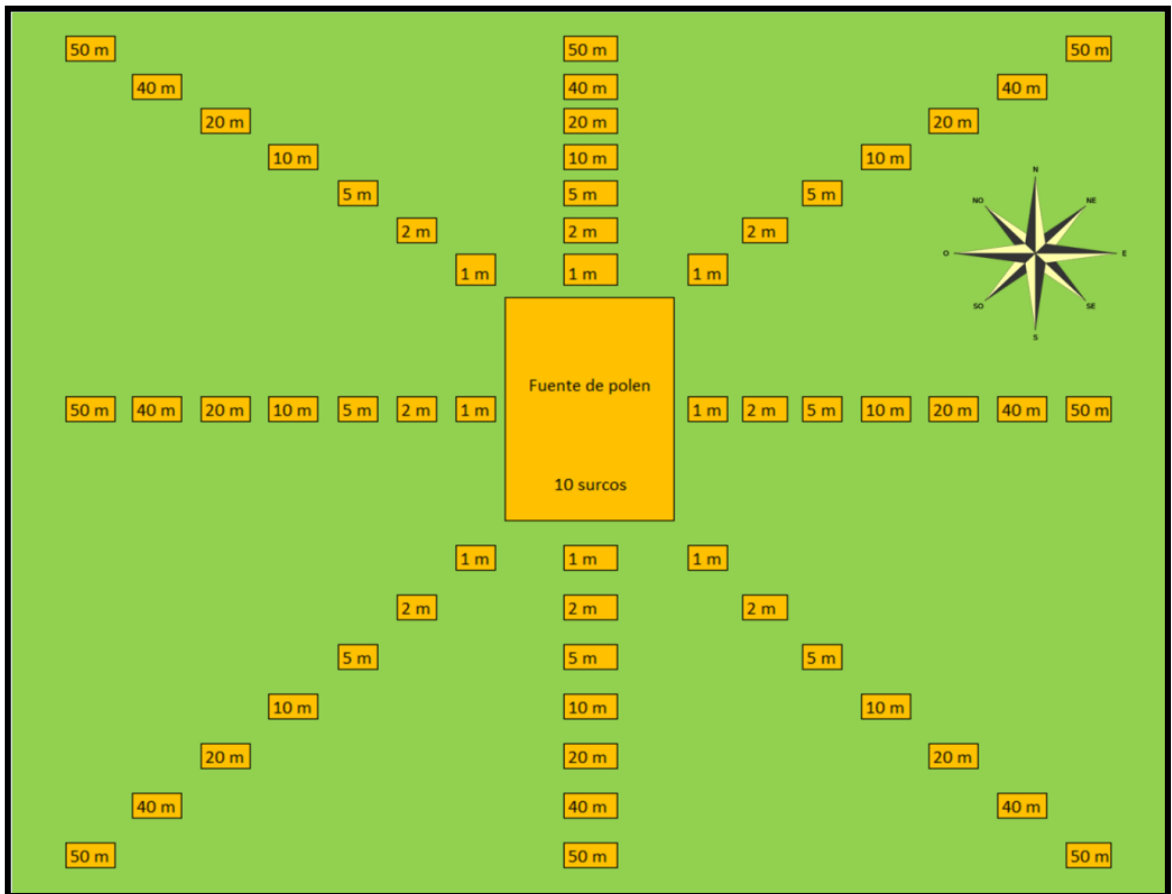


Figura 1. Diseño de la parcela de maíz para evaluar flujo genético. El recuadro amarillo central representa el área sembrada con el híbrido donador; el resto de la parcela se sembró con el híbrido blanco receptor.

3.3. Variables a evaluar

La estimación del flujo genético se realizó midiendo la intensidad de polinización cruzada en las plantas de maíz blanco, en la cual, se tomaron mazorcas en ocho orientaciones distintas y a diferentes distancias de la fuente de emisión de polen de maíz amarillo. En cada distancia muestreada en los ocho puntos cardinales, se cosecharon todas las mazorcas y se colocaron en sacos etiquetados con la distancia y el punto cardinal correspondiente. En la evaluación se tomaron en cuenta dos puntos importantes:

- a) Número de granos amarillos en las mazorcas cosechadas de maíz blanco por distancia y el punto cardinal.
- b) Número de hileras y número de granos por hilera en 3 mazorcas tomadas al azar de cada saco.

3.4. Análisis estadístico

Con datos obtenidos en la evaluación, se estimaron el total de granos cosechados en las mazorcas, multiplicando el número promedio de hileras por el número promedio de granos. El porcentaje de granos amarillos (polinización cruzada), se calculó dividiendo el número de granos amarillos contadas en las mazorcas, entre el número total de granos en las mazorcas, de cada distancia y punto cardinal.

Para la dispersión de polen en cada punto cardinal, se graficó el porcentaje de polinización cruzada (% de granos amarillos) contra la distancia a partir de la fuente de polen de maíz amarillo, en donde se analizaron estadísticamente para obtener la curva de regresión según el modelo de Ley de Potencia (). Este modelo tiene la formula $Y=a \cdot D^{-r}$, en donde Y= Porcentaje de polinización cruzada; a= es el punto de intersección con el eje de las Y (porcentaje de polinización cruzada a los 0 m de distancia de la fuente de polen); D=Distancia en m de la fuente de polen amarillo y r=Tasa de reducción de polinización cruzada.

Para obtener los parámetros a y r de este modelo y utilizarlos para graficar la línea de regresión, los datos de porcentaje de granos amarillos y de distancia de la fuente de polen amarillo se transformaron a logaritmo natural (ln) y se

sometieron a un análisis de regresión lineal. Los valores del parámetro "a" se multiplicaron por la función exponencial (e) y se integraron a la fórmula $Y=a \cdot D^{-r}$ para graficar la línea de tendencia "Ley de Potencia" a través de los puntos de porcentaje de granos amarillos graficados. La fórmula también se utilizó para proyectar las líneas de regresión y calcular la distancia en la que se alcanza el 0.01 % de polinización cruzada, es decir el porcentaje de granos amarillos en las islas de maíz blanco.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Dispersión de polen

4.1.1. Predio 1 (Sinaloa)

Al graficar los datos obtenidos de las islas de maíz blanco NM1078 expuestas al flujo de polen amarillo DK1030, se detectó un claro gradiente de reducción del porcentaje de granos amarillos conforme se incrementó la distancia a partir de la fuente de polen amarillo (Figs. 2 y 3).

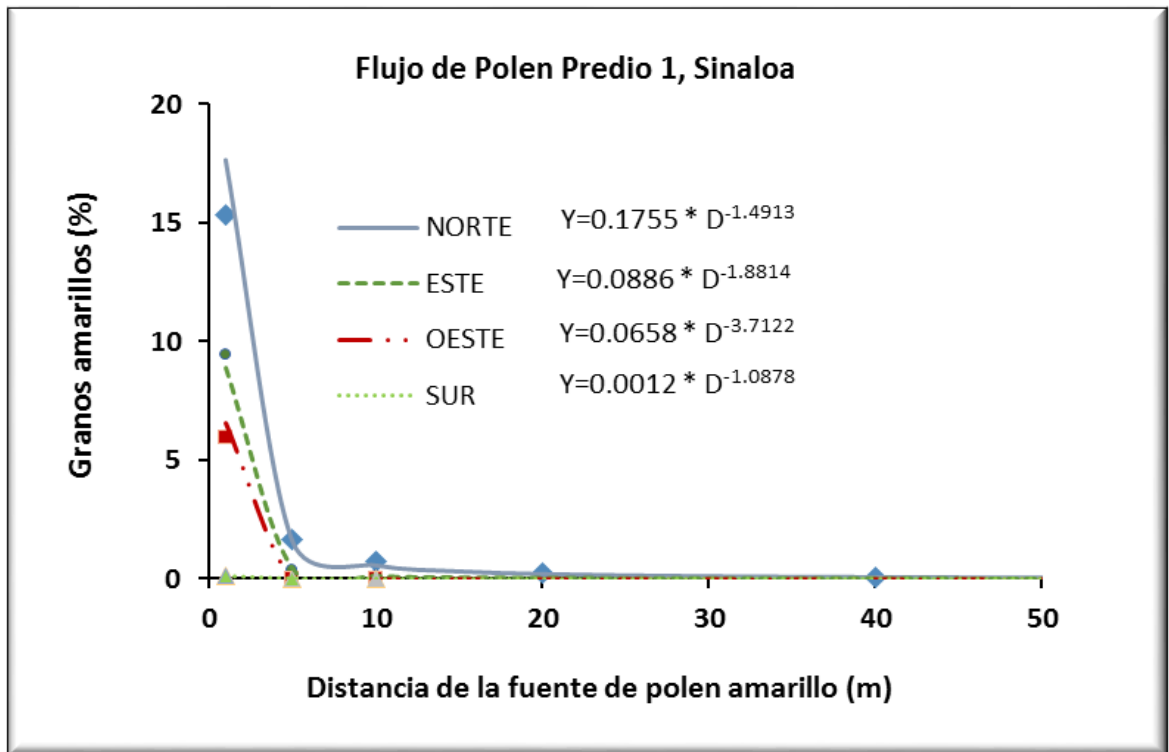


Figura. 2. Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo, en 4 puntos cardinales en Sinaloa. Las líneas de regresión se graficaron con el modelo $Y=a*D^{-r}$. Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y, r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

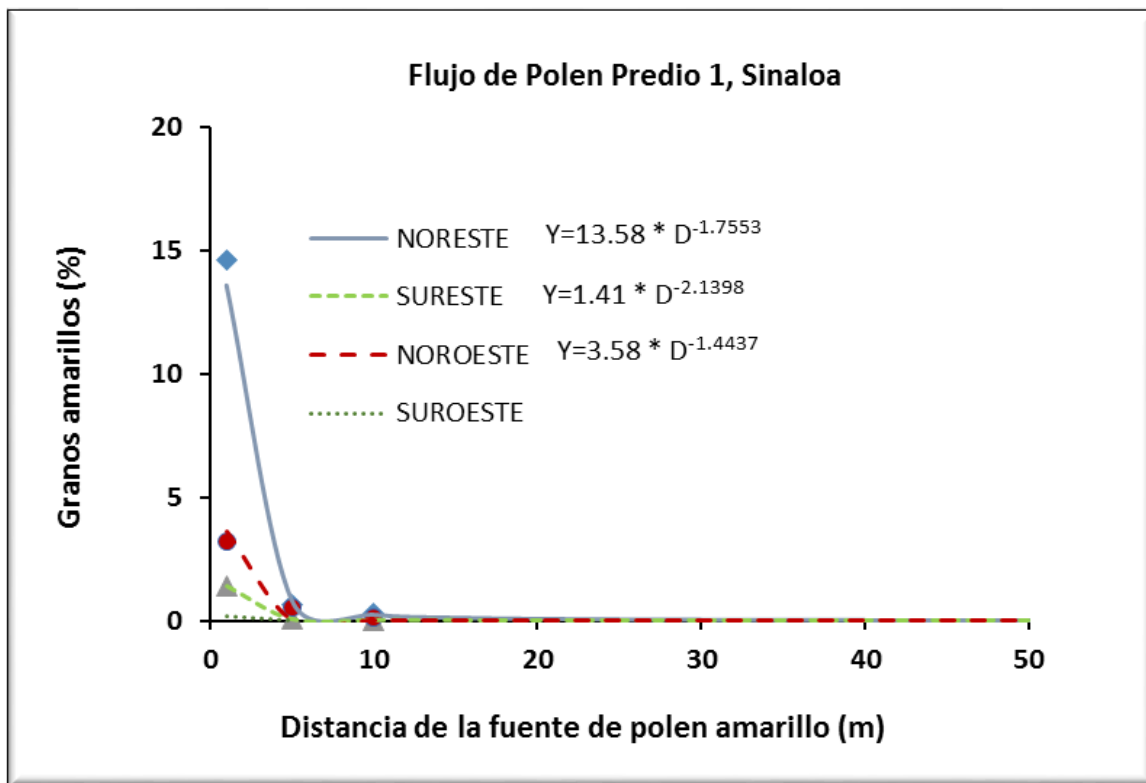


Figura. 3. Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo en 3 puntos cardinales, en Sinaloa (Continuación). Las líneas de regresión se graficaron con el modelo $Y=a*D^{-r}$. Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y, r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

La reducción se ajustó bien al modelo Ley de Potencia como lo demostró el análisis de regresión y el ajuste del modelo a los datos de porcentaje de granos amarillos graficados contra la distancia a partir de la fuente de polen de amarillo. En las líneas de tendencia trazadas con el modelo Ley de Potencia se observa claramente que la dirección cardinal en la que se observaron los mayores porcentajes de granos amarillos fue el norte y noreste con 17.6 y 13.6 % a un

metro de distancia de la fuente de polen amarillo, lo cual es un reflejo de la dirección predominante del viento que de acuerdo a la estación meteorológica del INIFAP en la región del valle de Culiacán, es sur-norte. En todos los puntos cardinales se observa una pronunciada pendiente de reducción de granos amarillos de 1 a 10 m, lo que refleja la rápida precipitación de los granos de polen debido al tamaño grande de estas células y por lo tanto a su alto peso relativo (Raynor *et al.*, 1972 y Pfahler, 1978). En el punto cardinal norte, la distancia a la que el modelo alcanza el 0.01 % de granos amarillos a partir de la fuente de polen amarillo fue de 100 m (Cuadro 2). Al punto cardinal Norte, le siguieron en abundancia de granos amarillos (polinización cruzada) los puntos noreste y este. Con base en el modelo de predicción, la reducción más rápida en el porcentaje de granos amarillos y la menor distancia a la que viajó el polen para alcanzar el 0.01 % de granos amarillos sucedió en el punto cardinal noroeste, oeste y suroeste que alcanzó el 0.01 % de granos amarillos a los 5 m (Cuadro 3).

Los resultados obtenidos indican que la polinización cruzada se reduce rápidamente y alcanza niveles menores al 0.01 % entre los 5-100 m. La reducción de granos amarillos es rápida en los primeros 10 metros, alcanzando niveles por abajo del 1 % en todos los puntos cardinales muestreados.

Cuadro 2. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Sinaloa.

| Distancia (m) | $Y=0.1755 * D^{-1.4913}$ | $Y=0.0012 * D^{-1.0878}$ | $Y=0.0886 * D^{-1.8814}$ | $Y=0.0658 * D^{-3.7122}$ |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | NORTE (%) | SUR (%) | ESTE (%) | OESTE (%) |
| 1 | 17.651 | 0.127 | 8.860 | 6.584 |
| 5 | 1.601 | 0.022 | 0.429 | 0.017 |
| 10 | 0.569 | 0.010 | 0.116 | 0.001 |
| 15 | 0.311 | 0.007 | 0.054 | 0.000 |
| 20 | 0.203 | 0.005 | 0.032 | 0.000 |
| 25 | 0.145 | 0.004 | 0.021 | 0.000 |
| 30 | 0.111 | 0.003 | 0.015 | 0.000 |
| 35 | 0.088 | 0.003 | 0.011 | 0.000 |
| 40 | 0.072 | 0.002 | 0.009 | 0.000 |
| 45 | 0.060 | 0.002 | 0.007 | 0.000 |
| 50 | 0.052 | 0.002 | 0.006 | 0.000 |
| 55 | 0.045 | 0.002 | 0.005 | 0.000 |
| 60 | 0.039 | 0.001 | 0.004 | 0.000 |
| 65 | 0.035 | 0.001 | 0.003 | 0.000 |
| 70 | 0.031 | 0.001 | 0.003 | 0.000 |
| 75 | 0.028 | 0.001 | 0.003 | 0.000 |
| 80 | 0.026 | 0.001 | 0.002 | 0.000 |
| 85 | 0.023 | 0.001 | 0.002 | 0.000 |
| 90 | 0.021 | 0.001 | 0.002 | 0.000 |
| 95 | 0.020 | 0.001 | 0.002 | 0.000 |
| 100 | 0.018 | 0.001 | 0.002 | 0.000 |

Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y; r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

Cuadro 3. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Sinaloa (Continuación).

| Distancia (m) | $Y=13.58 * D^{-1.7553}$ | $Y=3.58 * D^{-1.4437}$ | $Y=1.41 * D^{-2.1398}$ | SIN APLICAR MODELO |
|---------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| | NORESTE (%) | NOROESTE (%) | SURESTE (%) | SUROESTE (%) |
| 1 | 13.582 | 3.586 | 1.410 | 0.201 |
| 5 | 0.806 | 0.009 | 0.045 | 0.000 |
| 10 | 0.239 | 0.001 | 0.010 | 0.000 |
| 15 | 0.117 | 0.000 | 0.004 | 0.000 |
| 20 | 0.071 | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| 25 | 0.048 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| 30 | 0.035 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| 35 | 0.026 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| 40 | 0.021 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| 45 | 0.017 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 50 | 0.014 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 55 | 0.012 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 60 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 65 | 0.009 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 70 | 0.008 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 75 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 80 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 85 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 90 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 95 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 100 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y; r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

Con base en estos resultados, la distancia para evitar el flujo genético en la región de Sinaloa, son los 50 metros y 100m de acuerdo al análisis de regresión, los cuales incluso está por debajo del umbral de polinización cruzada aceptado por la unión europea que es de 0.9% (la más estricta en este sentido) y está en el rango de bioseguridad impuesto por las autoridades regulatorias Mexicanas, para cumplir con los requerimientos de regulación para experimentación en campo con

maíz genéticamente modificado, que es de 500 m de distancia de alguna otra parcela de maíz, para no coincidir con la etapa de floración de los predios vecinos y evitar la polinización cruzada (Halsey *et al.*, 2005; LBOGM, 2005).

4.1.2. Predio 2 (Tamaulipas)

Al graficar los datos obtenidos de las islas de maíz blanco NM1078 expuestas al flujo de polen amarillo DK1030, se detectó un claro gradiente de reducción del porcentaje de granos amarillos conforme se incrementó la distancia a partir de la fuente de polen de maíz amarillo (Figs. 4 y 5).

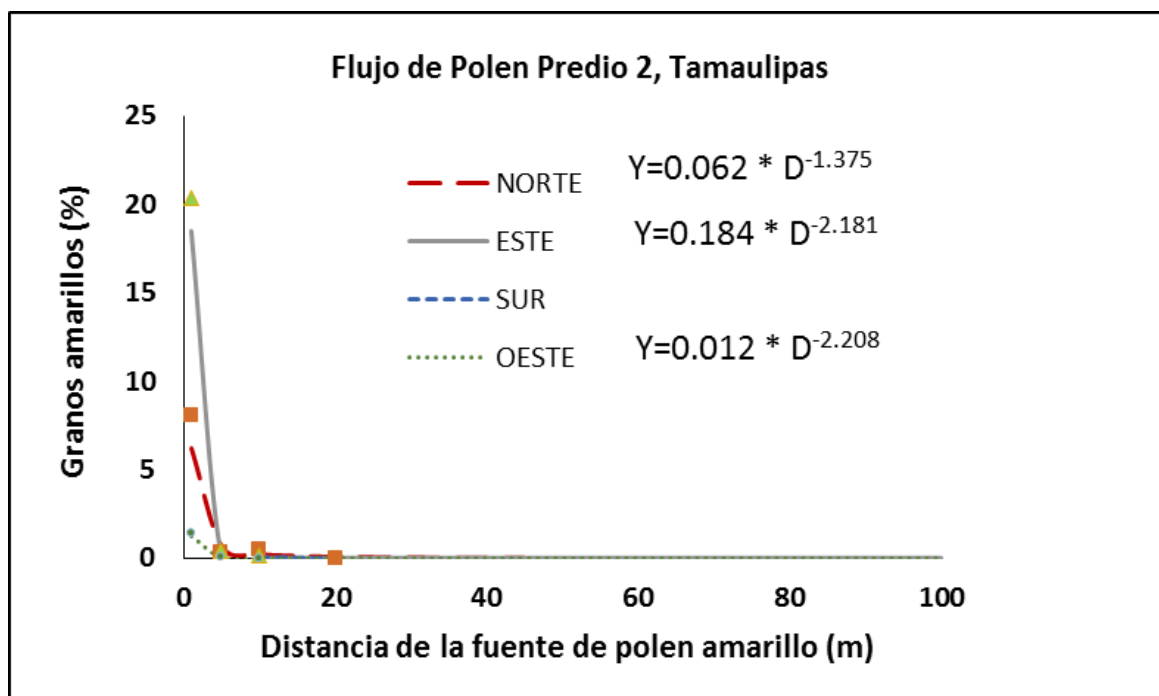


Figura. 4. Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo, en 3 puntos cardinales, en Tamaulipas. Las líneas de regresión se graficaron con el modelo $Y=a*D^{-r}$. Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y, r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

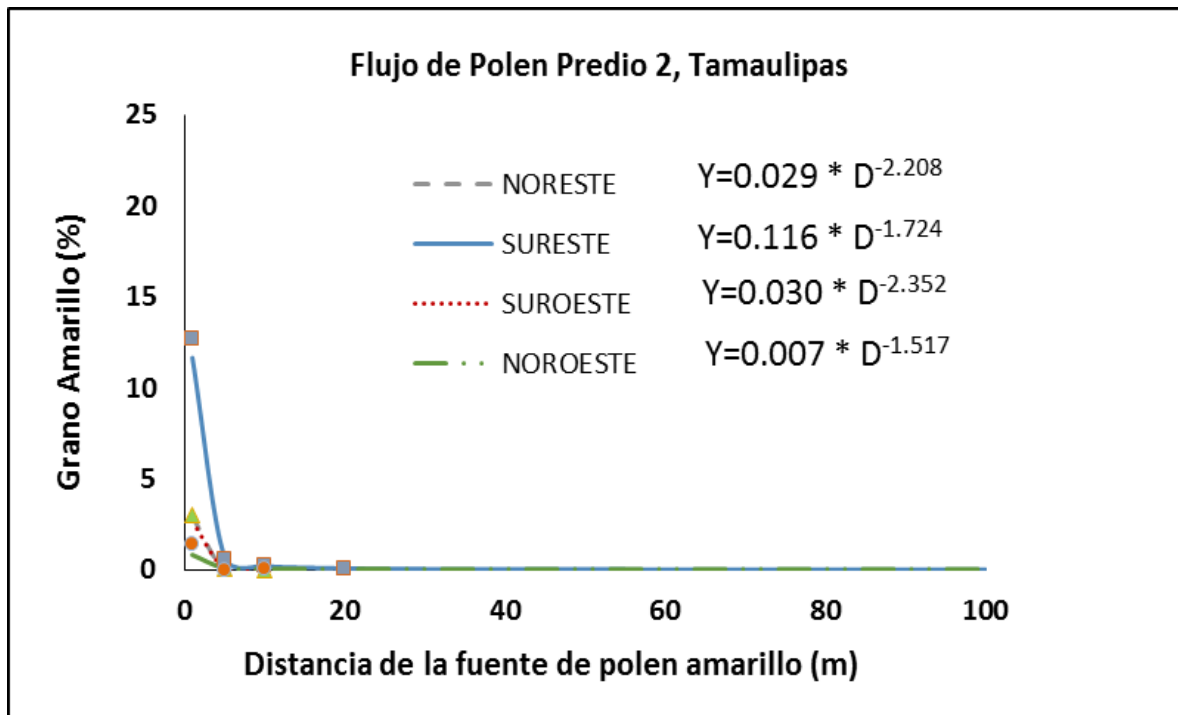


Figura. 5. Porcentaje de granos amarillos en maíz blanco colocados a diferentes distancias de la fuente de polen amarillo en 4 puntos cardinales en Tamaulipas (Continuación). Las líneas de regresión se graficaron con el modelo $Y=a*D^{-r}$. Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intersección con el eje de las Y; r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

La reducción se ajustó bien al modelo Ley de Potencia como lo demostró el análisis de regresión y el ajuste del modelo a los datos de porcentaje de granos amarillos graficados contra la distancia a partir de la fuente de polen de amarillo. En las líneas de tendencia trazadas con el modelo Ley de Potencia se observa claramente que la dirección cardinal en la que se observaron los mayores porcentajes de granos amarillos fue el Este y Sureste con 18.5 y 11.6 % a un metro de distancia de la fuente de polen amarillo, lo cual es un reflejo de la dirección predominante del viento que de acuerdo a la estación meteorológica del INIFAP en la región de Tamaulipas, es Oeste-Este. En todos los puntos cardinales

se observa una pronunciada pendiente de reducción de granos amarillos de 1 a 5 m, lo que refleja la rápida precipitación de los granos de polen debido al tamaño grande de estas células y por lo tanto a su alto peso relativo (Raynor *et al.*, 1972 y Pfahler, 1978). En el punto cardinal Norte y Sureste, distancias a la que según el modelo se alcanza el 0.01 % de granos amarillos a partir de la fuente de polen amarillo fue de 85 m (Cuadro 4). Según el modelo de predicción, la reducción más rápida en el porcentaje de granos amarillos y la menor distancia a la que viajó el polen para alcanzar el 0.01 % de granos amarillos sucedió en el punto cardinal Este, Oeste y Noroeste que alcanzó el 0.01 % de granos amarillos a los 10 m (Cuadro 5). Los resultados obtenidos indican que la polinización cruzada se reduce rápidamente y alcanza niveles menores al 0.01 % entre los 10-85 m. La reducción de granos amarillos es rápida en los primeros 5 metros, alcanzando niveles por abajo del 1 % en todos los puntos cardinales muestreados.

Estos resultados indican que la distancia que se requiere para evitar el flujo genético es de 85 m, el 0.9 % (0.68 y 0.73 %) ocurrió entre los 1-5 m si utilizamos el criterio de umbral de 0.9 % de polinización cruzada aplicado por Guzmán *et al.* (2008) (Cuadro 5).

Cuadro 4. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Tamaulipas.

| Distancia (m) | $Y=0.062 * D^{-1.375}$ | SIN APLICAR MODELO | $Y=0.184 * D^{-2.181}$ | $Y=0.012 * D^{-2.208}$ |
|---------------|------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| | NORTE (%) | SUR (%) | ESTE (%) | OESTE (%) |
| 1 | 6.21 | DP | 18.48 | 1.24 |
| 5 | 0.68 | DP | 0.05 | 0.04 |
| 10 | 0.26 | 0.08 | 0.01 | 0.01 |
| 15 | 0.15 | 0.01 | 0.00 | 0.00 |
| 20 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 25 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 30 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 35 | 0.05 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 40 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 45 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 50 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 55 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 60 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 65 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 70 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 75 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 80 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 85 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 90 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 95 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intesección con el eje de las Y; r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo, DP=dato perdido.

Cuadro 5. Porcentaje de polinización cruzada estimado con el modelo "Ley de Potencia" a diferentes distancias y puntos cardinales a partir de la fuente de polen amarillo en Tamaulipas (Continuación).

| Distancia (m) | $Y=0.029 * D^{-2.208}$ | $Y=0.007 * D^{-1.517}$ | $Y=0.116 * D^{-1.724}$ | $Y=0.030 * D^{-2.352}$ |
|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | NORESTE (%) | NOROESTE (%) | SURESTE (%) | SUROESTE (%) |
| 1 | 2.92 | 0.78 | 11.64 | 3.03 |
| 5 | 0.05 | 0.07 | 0.73 | 0.07 |
| 10 | 0.01 | 0.02 | 0.22 | 0.01 |
| 15 | 0.00 | 0.01 | 0.11 | 0.01 |
| 20 | 0.00 | 0.01 | 0.07 | 0.00 |
| 25 | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.00 |
| 30 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| 35 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.00 |
| 40 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| 45 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| 50 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 55 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 60 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 65 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 70 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 75 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 80 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 85 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 |
| 90 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 100 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

Y=Porcentaje de polinización cruzada; a=punto de intesección con el eje de las Y; r=Tasa de reducción y D=Distancia a la fuente de polen amarillo.

Bajo las condiciones en las que se realizó el experimento en la región de Tamaulipas, la distancia máxima donde se encontró granos amarillos fue de 50 m. De acuerdo al análisis de regresión la máxima distancia a la que se alcanza el 0.01 % de polinización cruzada a partir de una fuente de polen de maíz amarillo en la parcela es de 85 m a favor del viento y 15 m en contra; los cuales al igual que para el estado de Sinaloa, se encuentran por debajo del umbral de polinización cruzada

aceptado por la unión europea que es de 0.9% y está en el rango de bioseguridad impuesto por las autoridades regulatorias Mexicanas, para cumplir con los requerimientos de regulación para experimentación en campo con maíz genéticamente modificado (Halsey *et al.*, 2005; LBOGM, 2005).

En ambas regiones de evaluación, los resultados coinciden con Baltazar *et al.* (2015), quienes encontraron una tasa de entrecruzamiento $\leq 1\%$ después de 20m y de 0.2-0.1% después de 50m, en 8 localidades, de seis estados del norte de México, Con base en los resultados, estos indican que el flujo genético entre maíz sucede hasta los 100 metros, lo que también sugiere que es posible el entrecruzamiento de maíz genéticamente modificado y otras variedades sexualmente compatibles en esta misma distancia, no obstante; se puede reducir un posible impacto en la agricultura mexicana, implementando barreras de aislamiento espacial, tal como sugieren Baltazar *et al.* (2015).

Al respecto Ma *et al.* (2004) mencionan que la tasa de cruzamiento es menor a 1% después de 28 m en la dirección del viento y 10 m en contra de la dirección del viento. En los resultados de Guzmán *et al.* (2008) donde cuantificaron el flujo de polen entre dos híbridos de maíz de distinto color de endospermo, encontraron que el flujo de polen disminuyó exponencialmente a medida que aumentó la distancia de la fuente. El comportamiento del viento y el efecto de la turbulencia influyeron en la distancia recorrida por el polen. En este sentido, la aplicación de un modelo matemático permitió estimar una distancia segura de 100 m para prevenir el cruzamiento entre dos genotipos diferentes (líneas, poblaciones, híbridos, parientes silvestres), quedando demostrado que mediante el uso de

modelos matemáticos es posible estimar distancias seguras de aislamiento para evitar flujo de polen indeseado.

Langhof *et al.* (2010), encontraron que para el caso del híbrido transgénico MON 810, una distancia de aislamiento de 50 m, es suficiente para mantener los estándares requeridos en los Estados Unidos.

Por otro lado, durante las prácticas comunes en la producción de semillas híbridas de maíz, se concuerda, que lo normal es una distancia de aislamiento máximo de 300 metros de cualquier tipo de fuente de polen del mismo cultivo. Con esta distancia se evita con un alto grado de seguridad la contaminación con polen extraño (ICA, 2006).

No obstante las investigaciones realizadas por Robayo (2014), encontraron una tendencia de las dispersiones en direcciones sur-este y sur-oeste, con probables distancias de recorrido de 2.2 a 20 km en la mayor concentración de partículas correspondiente a $1.0 \times 10^{-13} \text{ mg m}^{-3}$, probando que éstas pueden recorrer distancias mayores a 300 y 500 m asumidos como medidas de bioseguridad.

V. CONCLUSIONES

Los resultados del presente trabajo permiten concluir que existe flujo genético entre maíz a distancias cortas y a medida que la distancia entre plantas aumenta, se reduce drásticamente el grado de entrecruzamiento, lo que da una pauta para responder a las preguntas más apremiantes sobre la utilización de híbridos genéticamente modificados de maíz en México, apoyando a establecer una respuesta más sólida al uso del cultivo de maíz transgénico en México.

Ante la posible utilización comercial de híbridos genéticamente modificados de maíz, la implementación de barreras de aislamiento espacial, pueden ser una herramienta útil para reducir el flujo de polen y lograr la coexistencia de maíces transgénicos y convencionales, minimizando el entrecruzamiento entre híbridos.

VI. LITERATURA CITADA

- Acevedo, G. F. 2009. La bioseguridad en México y los organismos genéticamente modificados: cómo enfrentar un nuevo desafío, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, México. 353 pp.
- APOLO (Observatorio de Agentes Polinizadores). 2002. Polinizadores y biodiversidad. Apolo. España. 160 pp.
- Aylor, E. D., Shultes, P. Y Shields, J. 2003. An aerobiological framework for assessing cross-pollination in maize. *Agricultural and Forest Meteorology*. 119:111-129.
- Baltazar, B., Sánchez, J., Cruz, L., and Shoper, J, B. 2005. Pollination between maize and Teosinte: an important determinant of gene flow in Mexico. *Theoretical and Applied Genetic*. 110:519-522.
- Baltazar, M. B., Castro, E. y Espinoza, A. 2015. Pollen-mediated gene flow in maize: implications for isolation requirements and coexistence in Mexico, the center of origin of maize. *Plos One*.10 (7): e0131549.doi:10.1371.
- Beck, U. 1999. La sociedad del riesgo global. Ed. Siglo XXI. México, D. F.
- Benavidez, M. A., R. E. M. Hernández V., H. Ramírez R. y A. Sandoval R. 2010. Tratado de Botánica Económica Moderna. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN). Saltillo, Coahuila; México. 332 pp.

- Bravo, W., Franco, J. y Main, G. (2002). Evaluación de la dispersión de polen como medida de bioseguridad para la liberación de plantas transgénicas de papa a campo. *Revista Latinoamericana*.13:95-103.
- Brookes, G., and Barfoot, P. 2005. GM crops; The global economic and environmental impact. The first nine years 1996-2004. AgBioForum. www.agbioforum.org.
- Browker, E. G. and Crenshaw, C. H. 2007. Electrostatic forces in wind pollination Part 1: Measurement of the electrostatic charge on pollean. *Atmospheric Environment* 41:1587–1595
- Burry, L. S. 2002. Dispersión del Polen Actual en el Sur de Chubut. Tesis de doctorado. Universidad de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina.155 pp.
- Campbell, C. L. and Madden, L. V. 1990. Introduction to plant disease epidemiology. 1ª Ed. Ed. John Wiley and Son. E.U.A. 532 pp.
- Chaves, B. N., Villalobos, A., y Debouck, D. 2009. Flujo de genes entre frijol común y silvestre en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 20(2):237-244.
- COAG, 2008. La coexistencia entre cultivos modificados genéticamente y cultivos convencionales y ecológicos. COAG. Valencia, España. 9pp.
- CONABIO. Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (2006) “Elementos para la determinación de centros de origen y centros de diversidad en general y el caso específico de la liberación experimental de maíz transgénico al ambiente en México”. Documento base preparado por la Coordinación Nacional de la CONABIO para la Secretaría de Medio

Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (SAGARPA). En [Http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/pdf/Doc_CdeOCdeDG. Pdf](http://www.biodiversidad.gob.mx/genes/pdf/Doc_CdeOCdeDG.Pdf)

Cué, G. J. L. 2012. Los cultivos transgénicos en la agricultura. Su relación con el medio natural. DELOS. Vol. 5. N°15. Revista Desarrollo Local Sostenible. Dpto. Agropecuario, Facultad de Forestal y Agronomía. Universidad de Pinar del Río. Cuba. 8pp.

Darío, B. S. 2005. El principio precautorio y los riesgos en el cultivo de variedades transgénicas. Revista do Programa de Mestrado em Direito do UniCEUB, Brasília. 2(1):55-115.

Eastman, K. y Sweet, J. 2002. Genetically modified organisms (GMOs): The significance of gene flow through pollen transfer. European Environment Agency. Issue report N° 28.

Eguiarte, F. L. E. 2009. Guía para principiantes a la Genética de Poblaciones. Ciencias. 38pp.

FAO, 2014. Principios y avances sobre polinización como servicio ambiental para la agricultura sostenible en países de Latinoamérica y el Caribe. FAO. Santiago, Chile. 55pp.

FAO & WHO. 2000. Safety aspects of genetically modified foods of plant origin. FAO. Geneva, Switzerland. 37p.

Fonseca, E. A. Y Westgate, E. 2005. Relationship between desiccation and viability of maize pollen. Field Crops Research. 94:114-125.

Fresnos, L. O. 2005. Cultivos genéticamente modificados. No 6. Enfoques. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0111sp.htm>

- Futuyma D. 2009. Evolution. Sinauer Associates. 3rd Edition. Inc., Estados Unidos de América. 763 pp.
- González, J. A., Aguirre, E. A., Velarde, H. M. V. y Garza, U. E. 2004. Guía para cultivar maíz y sorgo para forraje bajo riego en la Planicie Huasteca Potosina. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental Ébano. Folleto para productores Núm. 7. San Luis Potosí, México. 20 pp.
<http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/761/106.pdf?sequence=1>
- Guzmán, H. M., San Vicente, F. y Díaz, D. 2008. Flujo de polen entre híbridos tropicales de maíz de diferente color de endospermo. Bioagro. 20(3):159-166.
- Halsey, M. E., Remund, K.M., Davis, C. A., Qualls, M., Eppard, P. J. and Berberich, S. A. 2005. Isolation of maize from pollen-mediated gene flow by time and distance. Crop Science. 45(6):2172-2185.
- Handel, S. N. 1983. Pollination Biology. Pollination ecology, plant population structure, and gene flow. Ed. Pollination Biology, Academic Press, New York. 331pp.
- Hedrick, P. W. 2005. Genetics of populations. Third edition. Jones and Bartlett publishers. Sudbury, Massachusetts. 737pp.
- Herrero, O. S. 2014. Los alimentos transgénicos como bienes públicos globales. Suma Neg. 5(10):59-66.
- Hoyle, M. y Cresswell, J. 2007. Polinización cruzada entre cultivos GM y cultivos tradicionales. Ecología Aplicada. 17:1234-1243.

- Hycka, M. M. 1974. Especies gramíneas para las praderas de secano de condición extrema. *Aula Die*.12 (3/4):233-240.
- ICA, 2006. Resultados del ensayo de flujo genético de la tecnología Herculex I en el cultivo del maíz en el departamento de Córdoba. Magisterio de Agricultura y Desarrollo Rural. Instituto Colombiano Agropecuario, Colombia. 17pp.
- INEGI, 2011. México en cifras. Información nacional, por entidad federativa y municipios. Sinaloa, México. <http://www.inegi.org.mx/>
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). 2010. Centro de Investigación Regional del Noreste (CIRNO). Campo Experimental Valle de Culiacán (CEVACU). Maíz, pp. 41-47. *In: Guía técnica para el área de influencia del Campo Experimental Valle de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa; México. pp: 200.
- ISAAA, 2014. Los cultivos transgénicos muestran un crecimiento constante; beneficios obtenidos en 2014; la superficie sembrada en todo el mundo aumentó en 6 millones de hectáreas. ISAAA. 3 pág. <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/49/pressrelease/pdf/B49-PressRelease-Spanish.pdf>
- ISAAA, 2015. International Service for the acquisition of Agri-Biotech Applications” 2014: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2014. Brief 48-2014:
- James, C. 2014. Situación mundial de los cultivos biotecnológicos/GM comercializados: 2014. Informe 49. ISAAA. 32 pp.

- James, C. 2015. Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops; 2014. N°43
Founders and Emeritus Chair, ISAAA. 4pp. 320pp.
- Jugenheimer, R.W. 1988. Maíz, variedades mejoradas, métodos de cultivo y
producción de semillas. Ed. Limusa. México D.F. 841Pág.
- Kato T. A., C. Mapes, L. M. Mera, J. A. Serratos and R. A. Bye. 2009. Origen y
diversificación del maíz: una revisión analítica. Universidad Nacional
Autónoma de México (UNAM), Comisión Nacional para el Conocimiento y
Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México.
- Kato-Yamakake T. A. 2004. Variedades transgénicas y el maíz nativo en México.
Agricultura, Sociedad y Desarrollo. 1(2): 101-109.
- Kiesselbach, T. A. 1980. The structure and reproduction of corn. 50th Anniversary
Edition. University of Nebraska Press. USA. 238pp.
- Klümper, W., Y Qaim, M. 2014. A Meta-Analysis of the impacts of Genetically
Modified Crops. *Plos One*. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0111629>
- Langhof, M., Hommel, B., Hüsken, A., Njontie, C., Schiermann, J., Wehling, P.,
Wilhelm R. and Rühl, G. 2010. Coexistence in maize: isolation distance in
dependence of conventional maize field depth and separate Edge harvest.
Crop Sci. 50:1496-1508pp.
- LBOGM, 2005. Marco regulatorio de los Organismos Genéticamente Modificados
(OGMs) destinados para la agricultura. Diario Oficial de la Federación.
44pp.
- Lentini, Z., Díaz, A., Quintero, M., Burbano, E., Silva, G. Y Bolaños, E. 2007.
Valoración en campo del flujo de genes entre híbridos comerciales de maíz

- (*Zea mays*). Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C. Colombia. 99pp.
- Levin, D. A. y Kerster, H. 1974. Gene flow in seed plants. *Evolutionary Biology* 7: 139-200.
- Li, Y. 2012. Gene deleter: a new tool to address gene *flow* and food safety concerns over transgenic crop plants. *Frontiers in Biology*.7 (6): 557–565.
- Luhmann, N. 1991. Sociedad de riesgo. Ed. Universidad Iberoamericana y U. Guadalajara. México. 285pp.
- Luna, V. S., Figueroa, J. M., Baltazar, B. M., Gómez, R. L., Townsend, R. and Schoper, J. B. 2001. Maize pollen longevity and distance isolation requirements for effective pollen control. *Crop Science*. 41: 1551–1557.
- Ma, L. B., Subedi, K. D., y Reid, L. M. 2004. Extend of cross-fertilization in maize by pollen from neighboring transgenic hybrids. *Crop Sci*. 44(4): 1273-1282.
- March, G., Marinelli A. y Oddino C. 2004. Epidemiología aplicada al manejo de las enfermedades de los cultivos. Especialización en Protección Vegetal. Escuela de Postgrado. Universidad Católica de Córdoba, Córdoba, Argentina, 95 pp.
- Martínez, S. y Leal, K. 2000. Transgenic Maize in Mexico: in the need fir Concern. *Science*. 287:1399pp.
- Matsuoka, Y. 2005. Origin matters: Leessons from the search for the wild ancestor of maize. *Breeding Sci*. 55:383-390. <http://doi.org/10.1270/jsbbs.55.383>
- Mattson, W. J. 1980. Herbivory in relation to plant nitrogen content. *Ecology System*. 11:19-61.

- Melé, E., Ballester, J., Peñas, G., Folch I., Alcalde, E y Messeguer, J. 2004. First result Co-existence study. Euro. Biotech. News. 4:8
- Mercer, K. L. and Wainwright, J. D. 2008. Gene flow from transgenic maize to landraces in Mexico. Agriculture, Ecosystems and Environment 123:109-115.
- Messeguer, J., Peñas, G., Ballester, J., Bas, M., Serra, J., Salvia, J. Melé, E. (2006). Pollen-mediated gene flow in maize in real situations of coexistence. Plant Biotechnology Journal, 4(6):633–45.
- Mulugeta, D., Maxwell, B., Fay, P. Y Dyer, W. 1994. Kochia (*Kochia scoparia*) pollen dispersion, viability and germination. Weed Science. 42:548-552.
- Oleas, N. 2014. Métodos para el estudio de flujo genético en plantas. N° 3. CienciAmericana. Universidad Tecnológica Indoamerica, Ecuador. 18pp.
- Oleas, N. H., Meerow, A. W. y Francisco-Ortega, J. 2013. Molecular markers and conservation of plant species in the Latin-America: the case of *Phaedranas saviridiflora* (Amaryllidaceae). The Botanical Review. 79:507-527.
- Ortiz, S. Y Ezcurra, E. 2003. La liberación de los cultivos transgénicos al ambiente: esquemas adecuados y su importancia en el manejo de riesgo. Fronteras de la Biología en los inicios del siglo XXI. Módulo 3. Biotecnología Agrícola. El Colegio Nacional. México. 115-132pp.
- Overpeck, T. J., Webb, T., Y Prentice, C. 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra, dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. Quaternary Research. 23:87-108.
- Park, R. J., McFarlane, I., Hartley, R. Y Ceddia, G. 2010. The role of transgenic crops in sustainable Development. Plant Biotechnology Journal. 9:2–21.

- Pfahler, P. L. 1978. Biology of the maize male gametophyte. *In*: Maize Breeding and Genetics. D. B. Walden Ed. John Wiley and Sons. New York, USA. pp: 517-530.
- PRICE (Practical Implementation of Coexistence in Europe), (2014). Periodic Report Summary. European Commssion. Europa. 3pp.
- Raynor, G. S., Ogden, E. and Hayes, J. 1972. Dispersion and deposition of corn pollen from experimental sources. *Agronomy Journal* 64: 420-427.
- Reichmar, R. J., Watrud, L., Lee, H. Y Burdick, C.2006. Establishment of transgenic herbicide-resistant creeping bentgrass (*Agrostis stolonifera* L.) in nonagronomic habitats. *Molecular Ecology*. 15:4243-4255.
- Reyes, C. J. L., Cano, R. P. 2000. Manual de Polinización Apícola. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Departamento de Biología y Horticultura. Torreón, Coahuila, México. 52pp.
- Reyes C. P. 1990. El maíz y su cultivo. AGT-EDITOR S.A. México. 280 pp.
- Rieger, M. A., Lamond, M., Preston, C. y Powles, S. 2002. Pollen-Mediated Movement of Herbicide Resistance Between Commercial Canola Fields. Vol. 296. *Science*. USA. 2387pp.
- Robacker, D. C. Y Wolfenbarger, D. 1988. Attraction of laboratory-reared irradiated Mexican fruit flies to male- produce pheromone in the field. *Southwest. Entomol.* 13:75-80.
- Robayo, A. A., Y Galindo, M. G. 2014. Análisis de la probabilidad de dispersión de polen de maíz genéticamente modificado usando el modelo Hysplit. *Agrociencia*.48: 511-523.

- Rosado, G. A. M. 2000. Polinizadores y biodiversidad. Apolo. Depto. de Zoología y Antropología Física. Facultad de Biología, Universidad Complutense de Madrid. España. 131pp.
- Santoyo, C. E. 2004. Guía para cultivos de cereales en el estado de México. Ed. ICAMEX. México, D. F. 22pp.
- Sauthier, M. A. y Castaño, F. D. 2004. Dispersión del polen en un cultivo de maíz. Ciencia, Docencia y Tecnología. 29(15):229-246.
- Seccam, 2012. Maíz transgénico en México. El Surco. México, D.F. 16pp.
- Serratos-Hernández J. A., F. Islas-Gutiérrez, E. Buendía-Rodríguez and J. Berthaud. 2004. Gene flow scenarios with transgenic maize in Mexico. Environ. Biosafety Res. 3(3):149-157. doi: 10.1051/ebr:2004013
- Serratos, J. A. 1997. Gene Flow among Maize Landraces, Improved Maize Varieties, and Teosinte: Implications for Transgenic Maize. México, CIMMYT. 122pp.
- Serratos, J. A., López, A. H., y G. C. Carrillo. (Eds). 2000. Taller de maíz transgénico. Memoria NAPPO, DGSV, CNBA. Cd. de México, 13-16 de octubre de 1997. 120 p.
- Serratos, J. A., M. C. Willcox y F. Castillo (Eds). 1996. Flujo genético entre maíz criollo, maíz mejorado y teocintle: implicaciones para el maíz transgénico. CIMMYT, México, D. F. 149 p.
- Simón, S. 2009. Effet boomerang chez Monsanto. Disponible en: Altermonde-sans-frontières. On line: <http://www.altermonde-sans-frontiere.com/spip.php?article10632>.

- Stern, K. R., Bidlack, J. E. y Jansky, S. H. 2008. *Introductory Plant Biology*, 11th edition. McGraw-Hill, NY. 640pp.
- Stevens, W. E., Berberich, S. A., Sheckell, P. A., Wiltse, C. C., Halsey, M. E., Horak, M. J. and Dunn, D. J. 2004. Optimizing pollen confinement in maize grown for regulated products. *Crop Science* 44(6):2146-2153.
- Turrent, F. A., Cortés F. J. I., Espinosa C. A., Mejía, A. H., Serratos, H. J. A. 2010. ¿Es ventajosa para México la tecnología actual de maíz transgénico? *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(4): 631-646.
- Viejo, M. J. L. 1997. Artrópodos y el hombre. Los insectos polinizadores: una aproximación antropocéntrica. N°20. *Bol. S.E.A. Departamento de Biología Animal, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.* 71-74pp.
- Viljoen, C. y Chetty, L. 2011. A case study of GM maize gene flow in South Africa. *Environmental Sciences Europe.* 23:0-8.
- Villalobos, A. M. V. 2008. *Los transgénicos: Oportunidades y amenazas.* Ediciones Mundi-Prensa. México, S. A. de C. V. 109pp.
- Westgate, M. E., Lizaso, J. y Batchelor, W. 2003. Quantitative relationship between pollen-shed density and grain yield in maize. *Crop Sci.* 43(3): 934-942.