



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**



**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Componente práctico del Examen Complexivo de Grado,  
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito  
previo para obtener el título de:

**INGENIERO AGROPECUARIO**

**TEMA:**

“Integración de tecnologías y técnicas de mejora genética en el  
cultivo del maíz”

**AUTOR:**

Alexander Bolívar Valenzuela Vera

**TUTORA:**

Ing. Agr. Emma Lombeida García, PhD.

Babahoyo - Los Ríos - Ecuador

2024

## RESUMEN

El presente documento hace referencia a la integración de tecnología y técnicas de mejora genética en el cultivo del maíz. Los objetivos planteados fueron detallar las técnicas de mejoramiento genético utilizadas para mejorar la producción en maíz e identificar las tecnologías usadas para aumentar la productividad en el cultivo de maíz. Se recopiló información de documentos, revistas, bibliotecas virtuales y los últimos artículos científicos que contribuyen al desarrollo de este documento cuya información obtenida se interpretó, resumió y analizó. Las conclusiones detallan que los procesos de mejoramiento genético en maíz abarcan el empleo de variedades de polinización libre, la introducción y uso recombinante de progenitores, la hibridación para lograr cruces simples y triples, la rotación de segregantes en diversos ambientes, la selección masiva mediante técnicas gravimétricas y la evaluación de segregantes en ambientes propicios; las tecnologías para mejorar la productividad abarcan una nutrición óptima de las plantas mediante fertilizantes adecuados, en particular nitrógeno, fósforo y potasio; control de plagas y enfermedades, despliegue de organismos genéticamente modificados, riego y densidad óptima de plantación. hay que destacar que el avance de la biotecnología se basa en la implementación de nuevas tecnologías de cultivo, como la agricultura de precisión, la labranza de conservación, la agricultura orgánica, la utilización de sistemas de información geográfica, así como el cultivo de cultivos transgénicos, siendo la principal ventaja del mejoramiento genético su efecto multiplicativo, lo que significa que los esfuerzos de un pequeño número de personas con una inversión limitada pueden producir resultados significativos.

Palabras claves: genética, transgénicos, maíz, productividad.

## SUMMARY

This document refers to the integration of technology and genetic improvement techniques in corn cultivation. The objectives set were to detail the genetic improvement techniques used to improve corn production and identify the technologies used to increase productivity in corn cultivation. Information was collected from documents, magazines, virtual libraries and the latest scientific articles that contribute to the development of this document whose information obtained was interpreted, summarized and analyzed. The conclusions detail that the genetic improvement processes in corn encompass the use of open-pollinated varieties, the introduction and recombinant use of parents, hybridization to achieve single and triple crosses, the rotation of segregants in diverse environments, mass selection using techniques gravimetrics and the evaluation of segregants in favorable environments; Technologies to improve productivity include optimal plant nutrition through appropriate fertilizers, in particular nitrogen, phosphorus and potassium; pest and disease control, deployment of genetically modified organisms, irrigation and optimal planting density. It should be noted that the advance of biotechnology is based on the implementation of new cultivation technologies, such as precision agriculture, conservation tillage, organic agriculture, the use of geographic information systems, as well as the cultivation of transgenic crops, the main advantage of genetic improvement being its multiplicative effect, which means that the efforts of a small number of people with limited investment can produce significant results.

Keywords: genetics, transgenics, corn, productivity.

## INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	II
SUMMARY .....	III
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO METODOLÓGICO .....	3
1.1. Definición del tema caso de estudio .....	3
1.2. Planteamiento del problema .....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General.....	4
1.4.2. Objetivos Específicos .....	4
1.5. Fundamentación teórica .....	5
1.5.1. Técnicas de mejoramiento genético utilizadas para mejorar la producción en maíz. ....	5
1.5.2. Tipos de técnicas de mejoramiento genético.....	9
1.5.3. Técnicas de mejoramiento genético utilizadas en el cultivo de maíz. ..	12
1.5.4. Tecnologías para aumentar la productividad del cultivo de maíz. ....	19
1.6. Hipótesis .....	25
1.7. Metodología de la investigación .....	26
CAPÍTULO II.....	27
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	27
2.1. Desarrollo del caso .....	27
2.2. Situaciones detectadas (hallazgo).....	28
2.3. Soluciones planteadas.....	28
2.4. Conclusiones.....	29
2.5. Recomendaciones .....	30

BIBLIOGRAFÍA ..... 31

## INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético del maíz en Ecuador comenzó en 1952 en la Estación Experimental Tropical de Pichilingue (EETP), ubicada en la región costera del centro de Ecuador, con financiamiento principalmente de personal extranjero y del sector cooperativo (SCIA). A partir de 1963, la EETP pasó a depender del Instituto Nacional de Agricultura (INIAP), que inició sus esfuerzos de mejoramiento genético estableciendo un programa de maíz en 1961 en la Estación Experimental Santa Catalina (EESC), al sur de Quito. Desde entonces, el INIAP ha realizado mejoramiento genético de maíz en Ecuador, creando variedades para las regiones tropicales secas y húmedas de los Andes, los valles inter-Sierra y las zonas costeras o costeras. A la fecha, el INIAP ha creado 25 variedades, incluyendo 22 variedades para la Sierra y 9 híbridos para zonas costeras (Albán *et al.* 2023).

La región de la Sierra del Ecuador se caracteriza por una diversidad de tipos, colores, texturas y formas de maíz. También aumenta continuamente el consumo directo de cereales secos y maíz. Una de las principales limitaciones de la agricultura en Sierra Nevada es el bajo rendimiento de sólo 1,63 toneladas de grano seco. En las zonas costeras o costeras predomina el cultivo de maíz duro amarillo para la industria de alimentos balanceados, cultivándose una menor cantidad de maíz duro blanco para productos frescos (choclo) (Caviedes *et al.* 2020).

Aunque el porcentaje de superficie sembrada con semillas mejoradas es un buen indicador del desempeño del sector semillero, es la única determinación, ya que también se debe analizar el tipo de semillas utilizadas y el entorno circundante para cada tipo de cultivo. No es un factor. Existe una clara tendencia entre los agricultores a gestionar superficies más grandes y condiciones de riego favorables utilizando semillas híbridas (Espinosa *et al.* 2003).

La producción y productividad del maíz amarillo duro en las regiones costera, costera y amazónica ha aumentado en los últimos años gracias a una tecnología más avanzada, que ha reducido las importaciones de maíz y representa alrededor del 85% de la producción total del país, ahora podemos satisfacer el 90% de las necesidades de grano. Demanda, especialmente en el ámbito de la avicultura. Estos incrementos no hubieran sido posibles sin el aporte de innovaciones en el campo del mejoramiento genético, como el desarrollo de variedades e híbridos con alto potencial de rendimiento, y en la agronomía, como la preparación del suelo, la densidad de siembra y la fertilización, plagas, manejo integrado de riego, mejora de los procesos de cosecha y poscosecha (Caviedes *et al.* 2020).

El cultivo de maíz introduce 75 especies de plagas de importancia económica y muchas enfermedades causadas por bacterias, hongos y virus en las hojas, raíces y panículas del agroecosistema de maíz. Además, algunas especies parásitas de gusano cogollero (*Spodoptera fragiperda* J. E. Smith), bacterias patógenas, hongos y virus. Muchos de estos amigos y enemigos del maíz han coevolucionado con el maíz y es probable que hayan desarrollado una gran variedad de sus contrapartes. Este equilibrio de la biodiversidad puede afectar la aplicabilidad y sostenibilidad de la actual tecnología de maíz transgénico, que es fundamental para el origen y la diversificación del maíz. (Turrent *et al.* 2010).

Los métodos de mejoramiento utilizados para crear variedades de plantas (cultivares e híbridos) incluyen la transferencia de genes, el mejoramiento en masa y el mejoramiento periódico. La introducción de material genético se ha llevado a cabo desde el inicio de los programas de mejoramiento hasta la actualidad (Narro *et al.* 2022).

# CAPÍTULO I

## MARCO METODOLÓGICO

### 1.1. Definición del tema caso de estudio

El presente estudio trata acerca de la Integración de tecnología y técnicas de mejora genética en el cultivo del maíz. Los desafíos actuales en nuestro país es la baja producción en el sector maicero, siendo uno de los principales problemas el incremento de plagas y enfermedades, por tanto, es importante la incorporación estratégica de tecnología y avanzadas técnicas de mejora genética en la producción de maíz juega un papel crucial en el desarrollo y la optimización de este cultivo fundamental.

Este enfoque no solo potencia la eficiencia y la productividad, sino que también abre la puerta a oportunidades significativas para abordar desafíos agrícolas y satisfacer las crecientes demandas alimenticias de la sociedad.

### 1.2. Planteamiento del problema

Según datos proporcionados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el maíz (*Zea mays*) es actualmente el cereal más cultivado del planeta, ya que su rendimiento por hectárea es superior al de otros cereales grandes como el trigo y arroz. Por ello, en los últimos años se han realizado una serie de mejoras fitotécnicas en todo el proceso de cultivo del maíz con el fin de aumentar aún más esta productividad y conseguir mayores rendimientos (Álzate 2023).

Sin embargo, la agricultura tradicional utiliza cantidades excesivas de pesticidas potencialmente dañinos (fertilizantes, herbicidas e insecticidas), que dañan la salud humana y el suelo, y provocan deforestación y pérdida de hábitat natural. Esto se debe a que muchas especies buscan nuevas tierras para cultivar este y otros cereales. Económicamente, el costo de estos pesticidas ha aumentado significativamente, lo que encarece su producción y traslada esos costos a los

consumidores locales. Por este motivo, actualmente se están introduciendo nuevas técnicas agrícolas en el maíz con el objetivo de aumentar la producción de cereales, reutilizar las tierras cultivables y, en definitiva, reducir los costes de producción.

### **1.3. Justificación**

Una de las posibilidades para aumentar los niveles de productividad en la agricultura de maíz es utilizar materiales nativos seleccionados bajo la presión de las condiciones ambientales de plagas y enfermedades y desarrollar nuevas variedades híbridas que superen a otras variedades. Las variedades híbridas se cultivan en el país. Incrementar las ganancias y mejorar la calidad de vida de los pequeños y medianos agricultores (Vera *et al.* 2013).

La popularización de variedades modernas de maíz híbrido que sean resistentes a factores bióticos y abióticos dañinos ayudará a reducir las pérdidas poscosecha. Las técnicas de mejoramiento se han mejorado mediante una comprensión profunda de los aspectos fisiológicos que se correlacionan con el rendimiento y mediante la incorporación de señales de selección más efectivas en los métodos de mejoramiento en ambientes desfavorables.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General.**

Analizar la Integración de tecnología y técnicas de mejora genética en el cultivo del maíz.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos**

1. Detallar las técnicas de mejoramiento genético utilizadas para mejorar la producción en maíz.
2. Identificar las tecnologías usadas para aumentar la productividad en el cultivo de maíz.

## **1.5. Fundamentación teórica**

### **1.5.1. Técnicas de mejoramiento genético utilizadas para mejorar la producción en maíz.**

El aumento de la población mundial ha resultado en un aumento constante de la demanda de alimentos a escala global. Por lo tanto, uno de los principales desafíos que enfrenta la agricultura es garantizar la seguridad alimentaria abordando diversos factores como el cambio climático y la aparición de nuevas plagas y enfermedades que plantean amenazas a la producción agrícola mundial (Quiroga y Piñeiro 2020).

En la región Sierra de Ecuador, el maíz se distingue por una amplia variedad de variedades, tonalidades, consistencias y configuraciones, además de observarse un aumento constante en su consumo directo tanto en su forma seca como en grano fresco. Una de las principales limitaciones del cultivo en las tierras altas es su bajo rendimiento, con un promedio de 1,63 t ha<sup>-1</sup> de grano seco. En la zona costera o litoral, se observa una predominancia en el cultivo de maíz amarillo duro destinado a la producción de alimentos balanceados, junto con un nivel menor de cultivo de maíz blanco duro, utilizado principalmente para consumo humano en fresco, conocido como choclo (Caviedes *et al.* 2020).

El maíz se destaca como uno de los cultivos económicos clave a nivel mundial; sin embargo, su producción enfrenta desafíos debido a los efectos del cambio climático en las diversas regiones habitadas por pequeños agricultores. En diversos países a nivel global, se ha adoptado el fitomejoramiento genético como una estrategia para desarrollar variedades de semillas que posean la capacidad de afrontar los desafíos presentes en los sistemas agrícolas. La mejora genética clásica ha demostrado ser una herramienta importante que los humanos han descubierto para satisfacer sus necesidades básicas (Pierre 2021).

El maíz se considera uno de los cultivos más importantes para la humanidad, ya que se ha cultivado durante milenios y ha desempeñado un papel fundamental en las prácticas dietéticas de numerosas culturas indígenas en todo el continente

americano. La historia del maíz en la zona de Montalvo, provincia de Los Ríos, Ecuador, se remonta a tiempos antiguos, durante los cuales los pueblos indígenas de la región ya se dedicaban a su cultivo. En la presente época, el cultivo de maíz continúa representando una actividad económica significativa en la región, donde los agricultores locales han integrado innovaciones tecnológicas para incrementar tanto la productividad como la calidad del maíz (Hasang *et al.* 2021)

La producción y productividad del maíz amarillo duro en la región Litoral y en la Amazonía han experimentado un crecimiento en los últimos años como resultado de una mayor mecanización, lo que ha llevado a una reducción de las importaciones de maíz y ha permitido al país cubrir entre el 85 y 90% de sus necesidades. Estos incrementos no hubieran sido posibles sin los aportes de las innovaciones realizadas en los campos del mejoramiento genético, a través del desarrollo de variedades e híbridos con alto potencial de rendimiento, así como avances en la agronomía de cultivos, abarcando aspectos como labranza, densidad de siembra, fertilización, manejo integrado de plagas, riego y mejoras en los procesos de cosecha y poscosecha (Caviedes *et al.* 2020).

Actualmente, el maíz sigue siendo un cultivo importante en Ecuador, siendo las provincias de Guayas y Los Ríos sus principales centros de producción. Los agricultores persisten en implementar tecnologías novedosas para mejorar la producción y la calidad del maíz, lo que les permitirá seguir siendo competitivos tanto en el mercado nacional como en el internacional. Sin embargo, es crucial considerar las implicaciones ambientales y sociales de estas prácticas agrícolas modernas y explorar alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente para este cultivo (Vargas *et al.* 2023)

El mejoramiento genético de variedades de maíz de polinización libre para la Sierra se inició en el país en 1962 en la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP. Desde su génesis, el proceso de mejora se centró en incrementar la productividad y la homogeneidad de las variedades de maíz, aprovechando tanto el germoplasma autóctono como el foráneo (Zambrano *et al.* 2023)

La elección de plantas, tanto en épocas pasadas como en la actualidad a través del mejoramiento genético vegetal, constituye el progreso científico continuo más notable y sostenible en términos de satisfacer las necesidades alimentarias de la humanidad. Este proceso comenzó a través de la selección ancestral y empírica en ciertas especies hasta el siglo XX, seguido por la mejora genética y la creación de nuevos tipos de cultivares, facilitados por el avance tecnológico y la innovación en la mayoría de las especies cultivadas, abarcando en particular aproximadamente 50 especies en todo el mundo (Rimieri 2021).

Las técnicas tradicionales de mejoramiento genético han apoyado el avance de cultivos con mayor calidad y mayor productividad. Sin embargo, el desarrollo de nuevas variedades mediante esta tecnología requiere una cantidad significativa de tiempo y está limitado por la disponibilidad de variación genética que permita la incorporación de los rasgos deseados en los cultivos (Quiroga y Piñeiro 2020).

Además, la mejora convencional de rasgos específicos con importancia agronómica (por ejemplo, el rendimiento) a menudo se produce a expensas de otros rasgos como el sabor, las propiedades nutricionales, etc., que sin duda tienen importancia para los consumidores. Por lo tanto, es necesario promover tecnologías novedosas que puedan hacer frente al desafío de la seguridad alimentaria garantizando que los agricultores tendrán acceso a variedades capaces de satisfacer las crecientes demandas de alimentos de calidad de manera sostenible y asequible, particularmente frente a condiciones climáticas cambiantes y a menudo adversas. condiciones que afectan la producción (Quiroga y Piñeiro 2020).

El sistema de propagación vegetativa y el acervo genético limitado han planteado desafíos para el avance de los programas de mejoramiento genético. Sin embargo, la implementación de técnicas de cultivo ha demostrado ser eficaz para superar algunos de estos obstáculos. Dichas técnicas incluyen la germinación exitosa de semillas híbridas intra e interespecíficas, la inducción de variaciones somaclonales mejoradas mediante el uso de agentes mutagénicos y el cultivo de protoplastos, junto con avances en ingeniería genética (Ramos y Iglesias 2022).

El mejoramiento genético es una herramienta fundamental para el manejo de enfermedades en el cultivo de maíz. Mediante estrategias de selección genética, es posible crear cepas y cruzamientos de maíz que presenten una mayor resistencia a patógenos particulares, como la enfermedad de la mancha foliar (Estrada 2017).

Las técnicas biotecnológicas presentan un potencial significativo en términos de promover la resistencia a patógenos. Estos métodos proporcionan varias ventajas sobre los enfoques convencionales al permitir la selección de individuos de grandes poblaciones de plantas en un corto período de tiempo dentro de un espacio confinado. Esto sirve para mejorar la probabilidad de identificar los caracteres deseados. Además, posibilitan la regulación de la cantidad inicial de microorganismos y de los factores ambientales que podrían influir en los resultados obtenidos. Además, posibilitan la entrada a plantas libres de patógenos, y en última instancia, optimizan la eficacia de los programas de mejoramiento genético en la agricultura (García *et al.* 2021).

El enfoque del mejoramiento genético en este cultivo ha ido evolucionando junto con la mayor disponibilidad de herramientas biotecnológicas. Durante el siglo pasado, los métodos predominantes involucrados en la mejora del perfil aromático y la tolerancia a *Fusarium oxysporum* se centraron principalmente en la hibridación sexual y la germinación de semillas para generar híbridos intra e interespecíficos. En la última década, se ha observado un aumento notable en las iniciativas de mejora dirigidas hacia una variedad de factores bióticos y abióticos (Ramos y Iglesias 2022).

Durante los años noventa, se enfocó en el perfeccionamiento de los maíces autóctonos, teniendo en cuenta la elección de los agricultores por sus variedades regionales, atribuible a las características de textura, tamaño y color de los granos. La principal limitación de estas variedades radica en su adaptación específica a determinados entornos, lo que disminuye el alcance potencial de su adopción e impacto (Zambrano *et al.* 2023)

Actualmente, se emplea una extensa variedad de técnicas biotecnológicas centradas en el cultivo in vitro de tejidos vegetales con el fin de inducir diversidad genética y realizar una selección precoz. Observamos cómo estas estrategias suelen ser complementarias a la hibridación sexual intra e interespecífica, la cual continúa siendo reconocida como una metodología relevante para el mejoramiento genético. Sin embargo, aún se precisa de un mayor entendimiento acerca de la resistencia inherente a hongos, virus y tensiones ambientales presentes en el material genético silvestre de la especie *V. V. planifolia* y sus especies relacionadas (Ramos y Iglesias 2022).

### **1.5.2. Tipos de técnicas de mejoramiento genético.**

#### **Nucleasas de Dedos de Zinc (ZFN) de tipo -1, -2 y -3 (Técnicas de edición de genes)**

Las técnicas que utilizan ZFN son técnicas de ingeniería genética que buscan realizar cambios deliberados en la composición genética y rasgos de un organismo. También se conocen como técnicas de edición de genes. En la actualidad existen otras técnicas de edición génica que están adquiriendo relevancia, pero en la lista de la UE sólo se mencionan las ZFN.

#### **Selección Natural**

La selección natural impulsa el cambio evolutivo al favorecer a los organismos mejor adaptados, quienes transmiten cambios genéticos beneficiosos a lo largo de las generaciones. Este proceso, basado en la eficacia biológica medida por la supervivencia y reproducción, puede llevar a la formación de nuevas especies a lo largo de un vasto número de generaciones. La selección natural actúa de manera direccional, aumentando la frecuencia de los alelos que contribuyen a la adaptación exitosa de los individuos en la población (Barrios 2015).

Determina qué plantas podrán llegar a la edad adulta y reproducirse, con base en cómo las plantas responden a las condiciones ambientales, la duración de los días, los patógenos y otros factores externos que están fuera del control de los seres humanos (Mastretta y Acevedo 2020).

## **Selección Artificial.**

La selección artificial, practicada por seres humanos a lo largo de milenios en plantas y animales domesticados, implica manipular la reproducción para alterar características deseadas. En las últimas décadas, esta técnica se ha vuelto sistemática y poderosa, permitiendo mejoras significativas en la producción de especies de interés, gracias al apoyo de la teoría genética cuantitativa y la mejora genética (Gefaell *et al.* 2023).

También es el proceso mediante el cual los seres humanos seleccionamos los individuos que nos gustan más (por ejemplo por sus características de grano), a partir de los individuos que la selección natural ya filtró (Mastretta y Acevedo 2020)

## **Hibridación.**

El botánico Verne Grant definió la hibridación como el cruzamiento al azar entre poblaciones que tienen una historia previa de aislamiento ecológico, es decir, están apartadas porque tienen requerimientos ambientales diferentes o por aislamiento reproductivo o bien por ambos. La hibridación se puede presentar cuando los progenitores tienen una distribución simpátrida o cuando especies cercanas que tendían a divergir restablecen contacto a lo largo de una zona geográfica, la cual comúnmente es llamada zona híbrida (Flores *et al.* 2016).

La recombinación de gametos de dos o más padres implica desarrollar poblaciones con una combinación de caracteres genéticos variados. Estas poblaciones, llamadas segregantes, son genéticamente variables y se someten a procesos de selección para mejorar características específicas (Rosas 2018).

Existen varios procedimientos por medio de los cuales las líneas endocriadas de maíz pueden cruzarse para producir híbridos, cuando se cruzan solo dos líneas A y B, el resultado es un híbrido simple (AxB); si luego se emplean dos híbridos de cruce simple (AxB) x (CxD), se forma un híbrido más complejo, éste se llama híbrido doble; el maíz híbrido se caracteriza por proceder de una semilla obtenida de un cruzamiento controlado de líneas endocriadas seleccionadas por su alta calidad productiva. (Córdova 1996; Rajo, 2015, citado por Barrios 2015).

## **Mutagénesis**

En la mutagénesis se inducen deleciones o inserciones de fragmentos de ADN, que eventualmente conducen a cambios en los aminoácidos y a modificaciones en la pigmentación de hojas y tallos (Shikazono *et al.* 2003, citado por Hernández *et al.* 2019).

La variabilidad genética obtenida por la técnica de mutagénesis inducida y el CTV ha sido aprovechada para la obtención de genotipos tolerantes a diversos tipos de estrés, incluyendo la salinidad. A su vez, estos genotipos (arroz, cebada y algodón, entre otros) han contribuido a disminuir las pérdidas de rendimiento en los cultivos y a aumentar la economía debido al mejoramiento de rasgos de calidad y a la aceptación del consumidor (Urias *et al.* 2022).

La mutagénesis inducida al azar, una metodología que usa rayos gamma o compuestos mutágenos químicos que se irradian al tejido vegetal para generar una planta con otras características, como se hizo para obtener el pomelo rosado y menos amargo a partir del pomelo amarillo, que es ácido y amargo (Ramírez 2020).

## **Manipulación genética de las plantas.**

La innovación transgénica se enfoca en lograr el mejoramiento genético de las plantas, por medio de la biotecnología. El fin es tener una variedad de plantas más resistente a los desafíos de la producción agrícola. Es decir, especies más tolerantes a las condiciones de sequía, salinidad, inundaciones, enfermedades, plagas y malezas, además de optimizar el rendimiento al permitir ciclos de cultivos más cortos o en condiciones ambientales desfavorables (Jacto 2023).

La planta transgénica es una planta originaria que ha sido modificada genéticamente en cuanto a que tiene un gen o genes adicionales que le otorgan características que la planta antecesora no tenía, como resistencia a patógenos, sequía, mayor cantidad de vitaminas (Ramírez 2020).

## **Injerto.**

El injerto (por ejemplo, en árboles frutales, viñas, tomates)<sup>20</sup> es una forma de combinar el vigor u otros rasgos de interés de dos organismos en uno, sin tener que cruzarlos, por ejemplo, un patrón con resistencia a una enfermedad y una púa o yema con un determinado sabor del fruto. Aunque en combinación son una quimera (un organismo compuesto por células genéticamente distintas), el injerto y el patrón en sí mismos mantienen sus identidades genéticas propias en lo que se refiere a la secuencia básica de su ADN (Steinbrecher 2017).

### **1.5.3. Técnicas de mejoramiento genético utilizadas en el cultivo de maíz.**

#### **Utilización de la variación somaclonal**

La variación somaclonal, que implica cambios genéticos o epigenéticos inducidos durante la fase de callo de células vegetales cultivadas in vitro, se ha utilizado para la mejora genética de diversos rasgos agronómicos (García *et al.* 2021).

#### **Selección masal**

Implica seleccionar y propagar plantas individuales con rasgos deseables dentro de una población sin polinización controlada. Esta técnica se emplea en las etapas iniciales del mejoramiento genético para identificar rasgos deseables (Rimieri 2023).

#### **Viabilidad y calidad del polen.**

La evaluación de la viabilidad y calidad del polen es esencial en el proceso de selección de progenitores masculinos adecuados. La germinación in vitro es una técnica comúnmente empleada para evaluar la viabilidad del polen, mientras que los métodos de tinción son aconsejables cuando se trata de numerosos genotipos a evaluar, debido a su conveniencia (Carrodegua y Zúñiga 2022).

## **Endocruzamiento**

Es utilizado para generar híbridos de maíz a través de la cruce de líneas endocriadas. Esto puede conducir a la producción de híbridos dobles o híbridos simples, cuyo objetivo es amalgamar rasgos ventajosos de distintas líneas parentales (Rimieri 2023).

## **Selección de líneas endocriadas**

La estrategia consiste en el cruce selectivo de líneas endocriadas robustas para producir híbridos simples que exhiban un rendimiento potencial mayor y una mayor uniformidad en el cultivo (Rimieri 2023).

## **Utilización de la mutagénesis *in vitro* inducida**

Las estrategias mutagénicas que provocan modificaciones heredables en la configuración genética de una célula a través de la modificación de su ácido desoxirribonucleico (ADN) han demostrado ser una herramienta altamente efectiva en la optimización genética de plantas (García *et al.* 2021).

## **Receptividad estigmática**

Identificar la susceptibilidad estigmática resulta ser fundamental en el proceso de selección de progenitores del sexo femenino. La utilización de peróxido de hidrógeno surge como el método más eficaz para esta evaluación (Carrodegas y Zúñiga 2022).

## **Utilización de la transformación genética**

La introducción de ADN exógeno en las células vegetales mediante métodos de transformación genética representa una estrategia adicional de la biotecnología dirigida al fortalecimiento de la resistencia a hongos en cultivos de gran importancia económica, como es el caso del banano. Diversos genes han sido empleados en la lucha contra agentes patógenos (García *et al.* 2021).

## **Crecimiento del tubo polínico**

Examinar el crecimiento del tubo polínico puede facilitar la identificación de eventos de incompatibilidad y ofrecer posibles ventajas de ahorro de tiempo y recursos en un programa de mejora genética. (Carrodeguas y Zúñiga 2022).

## **Identificación de germoplasma**

El objetivo es identificar y seleccionar variedades locales de maíz que presenten características superiores para su utilización en programas de mejoramiento genético (Rimieri 2023).

## **Tecnologías avanzadas**

Actualmente, se están empleando tecnologías modernas como la biotecnología y la genómica para acelerar el proceso de mejoramiento genético, identificar genes de interés y cultivar variedades mejoradas de maíz (Rimieri 2023).

## **Selección temprana de resistencia**

La selección temprana de resistencia en plantas contra diversas cepas de patógenos ha sido un objetivo primordial en el mejoramiento genético tanto convencional como biotecnológico. Lo anterior se ha visto mejorado por los avances en los estudios de procesos de las plantas, la biología de los patógenos y la comprensión de las interacciones entre plantas y patógenos. La utilización de filtrados de cultivos de hongos y toxinas, e incluso cultivos duales, para este proceso es prometedora (García *et al.* 2021).

## **Determinación del número cromosómico.**

La selección temprana de resistencia en plantas contra diversas cepas de patógenos ha sido un objetivo primordial en el mejoramiento genético tanto convencional como biotecnológico. Lo anterior se ha visto mejorado por los avances en los estudios de procesos de las plantas, la biología de los patógenos y

la comprensión de las interacciones entre plantas y patógenos. La utilización de filtrados de cultivos de hongos y toxinas, e incluso cultivos duales, para este proceso es prometedora (Carrodegua y Zúñiga 2022).

Las diversas técnicas de mejoramiento vegetal empleadas incluyen: 1) la utilización de progenitores introducidos y recombinantes, donde las líneas generadas por el programa se combinan con germoplasma introducido; 2) hibridación para lograr cruces simples y triples, y ocasionalmente retrocruzamientos en casos específicos; 3) la rotación de segregantes en diferentes ambientes; 4) selección de masa mediante el método gravimétrico, mediante flotación de semillas; 5) la evaluación de segregantes en lugares propicios para incidencias graves de enfermedades; y 6) la evaluación del desempeño a través de años y diversas ubicaciones bajo condiciones de temporal (Villaseñor *et al.* 2021).

La introducción de cultivares híbridos en el mercado de semillas, seguida de herramientas biotecnológicas y transgénesis, representó hitos importantes en el fitomejoramiento y el avance del progreso científico y tecnológico en el campo. En cuanto a las poblaciones fundacionales para el mejoramiento genético mediante métodos y herramientas biológicas, el proceso de adquisición involucró: 1) etapas encaminadas a potenciar la variabilidad genética, estabilizarla e integrarla, y 2) la aplicación de técnicas para agilizar el proceso de mejoramiento genético (Rimieri 2021).

La aplicación de la biología molecular en el maíz se ha empleado principalmente para realizar caracterizaciones moleculares de variedades de maíz, con el fin de evaluar la diversidad genética de poblaciones nativas y mejoradas. El INIAP cuenta con un banco de germoplasma que contiene accesiones de maíz caracterizadas molecularmente mediante marcadores RAPD y SSR (Yáñez *et al.* 2003).

La utilización de la biotecnología en procesos de mejoramiento genético en la Sierra ha sido bastante limitada. El Programa de Maíz ha empleado métodos de mejoramiento genético convencionales, lo que subraya la necesidad de introducir innovaciones en este ámbito. Por ejemplo, la utilización de dobles haploides en el

establecimiento de líneas endogámicas presenta una vía prometedora para su aplicación en las variedades de maíz autóctono más buscadas en la región de la Sierra. Este enfoque podría facilitar la producción de híbridos de alto rendimiento y sentar las bases para el avance de la industria de semillas de maíz en la zona (Zambrano *et al.* 2023)

Para mejorar la variabilidad genética, se emplearon mutaciones espontáneas y mutagénesis para generarlos, junto con el desarrollo y explotación de poliploides e híbridos interespecíficos e intergenéricos. Estos fenómenos y métodos se utilizaron en diversos grados, dependiendo de la especie, sus sistemas reproductivos y estructuras genéticas, para inducir variación o crear nuevas especies. Asimismo, se ha observado que dichos enfoques han sido utilizados en numerosas ocasiones para abordar cuestiones agronómicas relacionadas con especies cultivadas, tales como portainjertos en la fruticultura, nuevas mutaciones en plantas ornamentales y en cereales con propiedades variadas, como la adaptación a las prácticas agronómicas a través de modificaciones en la estructura, la calidad y pigmentación de los cultivos, así como en cuanto a atributos nutraceuticos y la conservación de los productos recolectados (Rimieri 2021).

El método de mejoramiento genético para la resistencia a la sequía en maíz se basa en un enfoque genotécnico. Se ha demostrado que este método mejora la productividad del grano en condiciones de sequía hasta en un 40% durante un período de cuatro ciclos de selección. "La información proporcionada indica que las variedades con resistencia a la sequía exhibieron el mejor desempeño, lo que implica la eficacia de este enfoque para desarrollar variedades con un rendimiento superior" (Márquez *et al.* 2019).

Los altos rendimientos resultantes de la heterosis en la producción de maíz híbrido han sido identificados como uno de los avances más significativos en el campo del mejoramiento fitogenético. Las diversas combinaciones híbridas tienen el potencial de adaptarse a diferentes ambientes tropicales donde se cultiva maíz (MAG 2020).

La transferencia de genes a través de la hibridación interespecífica, la hibridación somática y la transgénesis también mejora la variabilidad genética, aborda cuestiones agronómicas y ayuda a reemplazar moléculas sintéticas, contribuyendo aún más a la sostenibilidad del cultivo al que se aplica cualquiera de estas tecnologías, contribuyendo así a la sostenibilidad del cultivo al que se aplica cualquiera de estas tecnologías. mejorando su aptitud agronómica (Rimieri 2021).

La utilización de la biotecnología en procesos de mejoramiento genético en la región de la Sierra ha sido notablemente limitada. Los métodos de mejoramiento genético empleados por el Programa de Maíz han sido tradicionales, lo que resalta el imperativo de la innovación. Por ejemplo, el empleo de dobles haploides para establecer líneas homocigotas presenta una vía prometedora que puede implementarse fácilmente en las muy buscadas variedades de maíz de la región de la Sierra. Este enfoque facilitaría la producción de híbridos de alto rendimiento y crearía un entorno propicio para el avance de la industria de semillas de maíz en la zona (Chávez *et al.* 2022).

Para acelerar el proceso de selección, la haplodiploidización, la multiplicación vegetativa *in vitro* y la genómica representan los principales métodos empleados en cultivos agrícolas clave. La haplodiploidización se emplea en maíz, arroz, papa, tabaco, canola, espárragos, pimiento morrón, trigo y cebada (Rimieri 2021).

Además, las diversas técnicas de propagación vegetativa se utilizan predominantemente en plantas hortícolas y florícolas. En el ámbito de la genómica, la biología molecular presenta una variedad de enfoques para abordar e implementar esta tecnología complementaria junto con la selección mendeliana y biométrica, lo que resulta en el desarrollo de nuevos cultivares adaptados a las fluctuantes condiciones ambientales y de producción, tanto en dimensiones temporales como espaciales. (Rimieri 2021).

La significativa mejora en los rendimientos derivada de la heterosis en la producción de maíz híbrido constituye una de las innovaciones más notables en el campo del mejoramiento genético de plantas. Las diversas combinaciones híbridas

se pueden personalizar para adaptarse a diversos entornos tropicales donde se cultiva maíz. (Chávez *et al.* 2022).

Además, se enfatiza la importancia de tener en cuenta la interacción genotipo-ambiente en el proceso de mejoramiento genético para la resistencia a la sequía en maíz. Esto implica considerar tanto los efectos genéticos como los ambientales en la selección de variedades (Márquez *et al.* 2019).

Mediante el proceso de selección de plantas, la humanidad ha logrado transformar la producción alimentaria al desarrollar semillas mejoradas que exhiben un incremento en el rendimiento de los granos, una mayor resistencia a plagas y enfermedades, así como una mayor tolerancia al estrés hídrico, entre otras cualidades destacadas. No obstante, a lo largo de los años, las semillas mejoradas no han logrado ofrecer soluciones significativas en los entornos marginales habitados por la mayoría de los agricultores de pequeña escala. En este contexto, diversos expertos han comenzado a sugerir el empleo del mejoramiento genético participativo como un enfoque innovador en la investigación, el cual implica la participación activa del agricultor en distintas fases del proceso de mejoramiento genético (Pierre 2021).

En el caso específico de la enfermedad de la mancha asfáltica, se han llevado a cabo programas de investigación y mejoramiento genético para desarrollar variedades de maíz con mayor tolerancia a esta enfermedad. Un caso ilustrativo es la aplicación de técnicas como la Selección Masal Moderna Estratificada con el propósito de conferir tolerancia a enfermedades y reducir la estatura de las plantas (Estrada 2017).

La selección recíproca no recurrente es un método de mejoramiento genético donde se cruzan dos líneas puras o poblaciones heteróticas para generar híbridos F1. Estos híbridos F1 se evalúan en comparación con sus padres para identificar combinaciones que exhiban mayor heterosis o vigor híbrido en rasgos de interés, como rendimiento, resistencia a enfermedades, calidad del grano, entre otros (Melendres *et al.* 2018).

Además, se ha demostrado que la selección recurrente es un método eficaz para mejorar los niveles de resistencia a enfermedades en el maíz. Además, se han descubierto cepas y cruces de maíz que poseen resistencia a la enfermedad de la mancha de asfalto y exhiben un elevado potencial en términos de producción y calidad del grano, lo cual constituye una alternativa eficaz y económica para los agricultores que se ven perjudicados por esta patología. (Estrada 2017).

A diferencia del proceso de selección recíproca recurrente, la selección recíproca no recurrente se caracteriza por no seguir un ciclo continuo de retrocruzamientos y selección de líneas, sino que se centra en la evaluación de los híbridos directamente generados a partir de los cruzamientos entre líneas puras o poblaciones heteróticas. Este enfoque puede ofrecer una alternativa más rápida y rentable a la selección recíproca recurrente, aunque puede limitar la capacidad de mejorar genéticamente las poblaciones a largo plazo (Melendres *et al.* 2018).

#### **1.5.4. Tecnologías para aumentar la productividad del cultivo de maíz.**

Los desafíos que surgen del cambio climático, particularmente en relación con las alteraciones en los patrones de lluvia, la sequía, el exceso de humedad y la redistribución geográfica de plagas de insectos y enfermedades, tienen implicaciones para la producción y la productividad agrícolas, lo que requiere el desarrollo de técnicas innovadoras para el cultivo de maíz. Esto requiere la aplicación de tecnologías destinadas a mejorar el rendimiento de los cultivos, promover la adaptabilidad a diversos entornos y fomentar la tolerancia y/o resistencia a diversos estreses bióticos y abióticos que afectan al cultivo (Caviedes *et al.* 2020).

En Ecuador, la práctica de la agricultura transgénica está prohibida. No obstante, la adquisición de maíz y productos alimenticios derivados de maíz de naciones que emplean organismos genéticamente modificados implica la introducción de productos transgénicos en el país, lo que plantea la necesidad de identificar claramente los alimentos que superen el umbral del 0.9% de contenido transgénico (Orbe *et al.* 2017).

Además de la genética, la agronomía desempeña un papel crucial en la mejora del rendimiento de los cultivos de maíz. Se observa en Ecuador una notable presencia de estudios centrados en la nutrición vegetal, la fitopatología y la entomología, en contraste con el desarrollo incipiente del empleo de la biotecnología y sus diversas aplicaciones destinadas a mejorar la productividad agrícola (Caviedes *et al.* 2020).

Un grupo de investigadores ha llevado a cabo la vigilancia de cultivos y semillas de maíz en diferentes regiones de Ecuador con el fin de identificar la existencia de proteínas transgénicas. Los resultados obtenidos indican la ausencia de cultivos de maíz modificados genéticamente en Ecuador. No obstante, según Santos y sus colegas, se ha confirmado la presencia de proteínas de organismos genéticamente modificados en diversos productos alimenticios elaborados a partir de maíz. Esta situación tiene el potencial de cambiar, particularmente en la región amazónica, como resultado del influjo de semillas no autorizadas a través de la frontera norte. Esto está influenciado por la disponibilidad de semillas de maíz genéticamente modificadas en circulación comercial en Colombia (Orbe *et al.* 2017).

Tecnologías empleadas para potenciar la eficiencia en la producción de maíz. Se destacan algunas tecnologías, entre ellas:

### **Mejoramiento Genético.**

Es importante señalar que la capacidad de producción esperada de las variedades de maíz no ha experimentado una reducción en los últimos años, lo que indica que los esfuerzos de mejoramiento genético llevados a cabo por los investigadores son efectivos y continuarán siendo un factor clave para la productividad en el futuro. "Se hace referencia al hecho de que el desempeño experimental es el doble del rendimiento logrado por los agricultores en el terreno, esta disparidad puede ser resultado, en parte, de la influencia del clima y de insuficiencias en la gestión agronómica del cultivo" (García *et al.* 2020)

Se han llevado a cabo iniciativas de mejora genética en el maíz orientadas a satisfacer las demandas de los agricultores y consumidores, a través de la identificación de genotipos destacados que poseen características de interés para favorecer la productividad de los productores. Uno de los aspectos clave de importancia económica reside en la identificación de materiales de maduración temprana que presenten altos rendimientos. En el contexto de la producción agrícola mecanizada, se observa una prevalencia significativa en la utilización de materiales mejorados, tales como los híbridos convencionales y transgénicos, los cuales ocupan las extensiones de siembra más amplias en el cultivo de maíz (Tapia *et al.* 2022).

### **Tecnologías de Producción.**

Se destaca la importancia de la adopción de tecnologías innovadoras derivadas de investigaciones en el ámbito agrícola, en colaboración con los agricultores, como estrategia para abordar los desafíos asociados a la producción de maíz. Se hace hincapié en la importancia de la implementación de políticas gubernamentales que promuevan la adopción de tecnologías avanzadas en el sector agrícola (García *et al.* 2020)

### **Manejo Agronómico.**

El mejoramiento de las técnicas agronómicas en la agricultura de maíz se resalta como crucial para incrementar la eficiencia productiva. Esto abarca la aplicación adecuada de fertilizantes, riego eficiente, control de plagas y enfermedades, así como el manejo poscosecha (García *et al.* 2020)

Es esencial garantizar la protección de la semilla durante el proceso de germinación y en las etapas iniciales de crecimiento de la plántula con el fin de lograr una emergencia uniforme y establecimiento óptimo del cultivo. La aplicación de sustancias químicas o biológicas mejora el potencial de germinación, mejora el vigor de las semillas y puede prevenir daños causados por insectos, hongos y nematodos en ciertos casos. El tratamiento debe incluir insecticida, fungicida, bactericida, nematicida o una combinación de estos agentes. Normalmente, las

semillas comerciales se tratan previamente con insecticidas y fungicidas (Cruiser, Poncho, Captán, Thiram, Raxil, Acelerón, etc.), aunque puede ser necesario un tratamiento suplementario si se encuentra un organismo no objetivo como se especifica en la etiqueta. Otro aspecto importante es que la aplicación de productos que contengan NPK como iniciador del vigor inicial potenciará aún más el crecimiento inicial de la plántula (Intagri 2024).

Además, la misma fuente indica que globalmente, el manejo de plagas y enfermedades puede originar considerables pérdidas económicas desde el período de plántula hasta la fase de llenado del grano, por lo tanto, es de vital importancia prestar especial atención a la prevención de daños en las primeras 6 semanas para las malezas y de manera continua durante todo el ciclo de cultivo para mitigar los efectos perjudiciales de las plagas. Es recomendable emplear tecnologías de control desarrolladas localmente en cuanto a tiempos de aplicación, productos y dosis en las medidas correctivas (Intagri 2024).

Entre las limitaciones fitosanitarias más frecuentes que influyen en el cultivo de maíz se encuentra el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith)). Smith es una plaga de amplia distribución en las regiones de cultivo de maíz a nivel nacional e internacional, ya que cuenta con numerosos hospederos alternativos que incrementan significativamente su capacidad de ocasionar daños. Los métodos de control químico representan aproximadamente el 10% de los costos totales de producción del cultivo. Una de las opciones disponibles para su manejo incluye la utilización de genotipos transgénicos desarrollados por corporaciones privadas. Otro método para controlar esta plaga es mediante el uso de productos biológicos, principalmente a base de *Bacillus thuringiensis*. Sin embargo, su utilización ha sido mínimamente aceptada por los productores (Tapia *et al.* 2022).

Se ha demostrado que la aplicación de estrobilurina tiene un impacto en el manejo de una amplia gama de enfermedades en el maíz, al mismo tiempo que funciona como un regulador del crecimiento que extiende la coloración verde de las hojas. La aplicación debe repetirse una o dos veces después del periodo de floración. Esta tecnología también se está aplicando en variedades de maíz de alto

rendimiento (Intagri 2024).

Los fertilizantes son cruciales para la productividad del maíz, ya que proporcionan los nutrientes necesarios para el crecimiento óptimo de las plantas. Estos nutrientes incluyen fósforo (P), esencial para los procesos metabólicos de las plantas como la fotosíntesis, la transferencia de energía y la biosíntesis de macromoléculas; Nitrógeno (N), importante para el crecimiento y desarrollo de las plantas, particularmente en cultivos de cereales como el maíz; y el zinc (Zn) y el hierro (Fe), aunque están presentes de forma natural en el suelo, a menudo no están fácilmente disponibles en formas asimilables para las plantas, por lo que puede ser necesaria la suplementación (Sánchez *et al.* 2021)

La adecuada nutrición desempeña un papel fundamental en el logro de un rendimiento óptimo. Para rendimientos que oscilan entre 18 y 20 toneladas por hectárea, los insumos necesarios son: 398 kg de nitrógeno, 156 kg de fósforo, 280 kg de potasio, 36 kg de azufre, 691 g de zinc y 115 g de boro. Para un ambiente temporalmente adecuado con niveles de humedad adecuados, se recomienda aplicar durante la siembra la totalidad del fósforo (P) y la mitad del nitrógeno (N), potasio (K) y micronutrientes, depositándolos 5 x 5 cm por debajo y al lado de la semilla. La otra mitad de N y micropartículas en la etapa V6-V7." se puede reformular como "La porción restante de N y micropartículas durante la fase V6-V7. En el riego por gravedad el 75% del fósforo se aplica durante la siembra y el 25% restante se distribuye durante el primer riego suplementario. Los nutrientes N, K y micronutrientes deben ser divididos de acuerdo con las necesidades de la planta, priorizando una dosis mayor en el periodo de floración (V7-VT). Durante el riego por aspersión y por goteo, se recomienda aplicar una fertilización básica como iniciador, seguida de aplicaciones de fertilizante soluble en riegos posteriores, cuidando de evitar daños foliares por el nitrógeno aplicado durante el riego por aspersión (Intagri 2024).

Además de N, P, Zn y He, es fundamental tener en cuenta la aplicación de otros elementos como potasio, calcio, magnesio y diversos micronutrientes de acuerdo con los requerimientos específicos del suelo y del cultivo de maíz. La combinación adecuada de fertilizantes tiene el potencial de mejorar la

productividad, la calidad y el rendimiento de los cultivos de maíz (Sánchez *et al.* 2021)

La eficacia de las innovaciones progresivas se puede atribuir a la utilización de prácticas agrícolas que se adaptan mejor a los entornos en los que los productores de maíz plantan sus cultivos. Además, son más intensivos al establecer complementariedades y sinergias entre los recursos involucrados en la gestión. Entre estas prácticas, la conservación de suelos y agua, realizada por el 23% de los productores, previene la pérdida de nutrientes y agua esenciales para la nutrición de las plantas (Damián *et al.* 2013).

La asociación de cultivos, utilizada por el 97% de los productores de maíz, integra varios componentes del agroecosistema (cultivos, suelos, plantas, animales), resultando en sinergias que mejoran el rendimiento de los recursos naturales. Además, estas sinergias generan importantes ahorros de costos para los productores, ya que capitalizan los recursos naturalmente disponibles con insumos financieros mínimos (como energía solar, aire, nitrógeno, carbono). Por ejemplo, la integración de plantas (maíz, legumbres y calabazas) con diferentes eficiencias energéticas y sistemas de raíces optimiza el uso de la energía solar, los nutrientes y el agua. Esta integración mejora la relación suelo-planta-fauna-ambiente, ya que las leguminosas fijan el nitrógeno atmosférico utilizado por el maíz. También fomenta la biodiversidad, fomentando cadenas y redes alimentarias que regulan el crecimiento de la población de plagas (Damián *et al.* 2013).

"La rotación de cultivos es una estrategia efectiva para lograr rendimientos constantemente elevados, dado que contribuye a mitigar los efectos negativos de plagas e enfermedades al interrumpir su ciclo de reproducción". En regiones con capacidad de doble cultivo anual, la siembra de soja, alfalfa u otras leguminosas contribuye a la fijación de nitrógeno en el suelo. Se pueden establecer otros cultivos o mezclas de cultivos antes del maíz para utilizarlos como abonos verdes para aumentar el contenido de materia orgánica y también como supresores de malezas (Intagri 2024).

La práctica de rotación de cultivos, implementada por el 37% de los agricultores encuestados, mitiga los problemas asociados con plagas, enfermedades y erosión del suelo, al tiempo que incrementa el contenido de nitrógeno disponible en la tierra (Damián *et al.* 2013).

Según la misma fuente, la interacción entre la agricultura y la ganadería se traduce en la aportación de estiércol, el cual contribuye al mejoramiento de la estructura, la textura, y la fertilidad física, química y biológica del suelo. Esta práctica favorece la aireación, permeabilidad y capacidad de retención de agua del sustrato, promueve la proliferación de microorganismos benéficos para las plantas, y facilita la captación de carbono. Se registró una aplicación promedio de 1644 kg de estiércol por hectárea. (Damián *et al.* 2013).

### **Uso de Semillas de Calidad**

Se hace hincapié en la relevancia de disponer de semillas de alta calidad para alcanzar niveles óptimos de rendimiento en el cultivo de maíz. "Se analiza la importancia de abordar la escasez de semillas de alta calidad en las explotaciones agrícolas de pequeña escala mediante la certificación de semillas producidas a partir de variedades locales específicas" (García *et al.* 2020)

Se hace hincapié en la relevancia de disponer de semillas de alta calidad para alcanzar niveles óptimos de rendimiento en el cultivo de maíz. "Se analiza la importancia de abordar la escasez de semillas de alta calidad en las explotaciones agrícolas de pequeña escala mediante la certificación de semillas producidas a partir de variedades locales específicas" (Intagri 2024).

### **1.6. Hipótesis**

Ho= Las tecnología y técnicas de mejora genética no son importantes en la producción del cultivo del maíz.

Ha= Las tecnología y técnicas de mejora genética son importantes en la producción del cultivo del maíz.

## **1.7. Metodología de la investigación**

Para crear el documento se recopiló información de documentos, revistas, bibliotecas virtuales y los últimos artículos científicos que contribuyen al desarrollo de este documento y sirvieron como componente práctico del posgrado.

La información obtenida se interpretó, resumió y analizó para obtener información relevante sobre el tema en estudio.

## CAPÍTULO II

### RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1. Desarrollo del caso

El presente documento detalla sobre la integración de tecnología y técnicas de mejora genética en el cultivo del maíz"

Una combinación de tecnología y técnicas de mejoramiento genético, como la selección artificial de plantas, la mutagénesis inducida y la manipulación genética, han llevado al desarrollo de cultivos de maíz que pueden resistir condiciones adversas como la sequía. Estas técnicas tienen un gran potencial para mejorar la productividad y la sostenibilidad agrícolas, siempre que se y cuando se aborden consideraciones de seguridad, regulatorias y de impacto ambiental y social.

Los cultivos actuales presentan variaciones con respecto a sus ancestros silvestres debido a la intervención humana, que ha conducido a la modificación y selección de características a lo largo de un periodo que abarca más de diez mil años, con el propósito de satisfacer las demandas del ser humano. La civilización contemporánea depende de los agroecosistemas, que son ecosistemas transformados significativamente por las actividades humanas para sustentar la producción agrícola.

En estos sistemas, la biodiversidad se reduce para mejorar los rendimientos y aumentar la producción de alimentos para satisfacer las necesidades humanas. Muchas especies (animales, plantas, microorganismos) que prevalecen en estos sistemas han sido moldeadas por prácticas de selección artificial asociadas con el manejo agrícola. Un sistema agrícola, conocido como agroecosistema, es gestionado con la finalidad específica de generar alimentos.

A diferencia de un ecosistema natural, como aquel presente en áreas protegidas, el agroecosistema es un sistema creado por el ser humano y se halla en un estado perpetuo de desarrollo y refinamiento de las técnicas agrícolas. La gran mayoría de los cultivos utilizados por los agricultores hoy en día han sido desarrollados por humanos mediante diversas metodologías. Actualmente, la ingeniería genética complementa las técnicas tradicionales al ofrecer una herramienta adicional para la mejora o alteración de los cultivos vegetales.

## **2.2. Situaciones detectadas (hallazgo)**

La ingeniería genética puede potenciar los efectos negativos de la agricultura, equipararse en términos de impacto con la agricultura convencional, o propiciar enfoques agrícolas más sostenibles y la preservación de los recursos naturales, incluida la biodiversidad.

Los desafíos que plantea el cambio climático incluyen la disminución de las fuentes de agua, el aumento de la erosión y degradación de los suelos, la contaminación de los cuerpos de agua y la lluvia ácida derivada de las actividades mineras, entre otras cuestiones. Otro aspecto significativo es la pérdida de biodiversidad, que resulta en la disminución de genes importantes para las generaciones futuras que necesitan ser preservados.

El cultivo y producción de maíz enfrenta múltiples desafíos derivados del impacto del cambio climático, prácticas de monocultivo, desplazamiento de agricultores y la introducción de variedades genéticamente modificadas en sustitución de las autóctonas, lo que pone en peligro su continuidad.

## **2.3. Soluciones planteadas**

El aumento de la productividad agrícola puede lograrse mediante la expansión de la superficie cultivada, el incremento de la productividad por unidad de superficie y la aplicación de técnicas de biotecnología.

Actualmente, se ha enfatizado la promoción de la diversidad genética con el objetivo de conservar los recursos genéticos para garantizar la sostenibilidad agrícola. Además, se ha recurrido a las estrategias de mejora mediante la utilización de la biotecnología enfocada en la ingeniería genética para la creación de plantas transgénicas.

La semilla de una agricultura eficiente es indispensable en cualquier proceso de desarrollo, particularmente si se considera que, en los países en desarrollo, más del 50% de la población depende de la agricultura para su sustento. Una agricultura eficiente necesita insumos que sean fácilmente aplicados y fácilmente accesibles para los agricultores en términos de precio, cantidad y oportunidad, de acuerdo con las condiciones locales de la región.

#### **2.4. Conclusiones**

La incorporación de tecnologías y técnicas de mejoramiento genético en el maíz puede mejorar la productividad y la resiliencia ambiental, pero su implementación requiere una evaluación cuidadosa de las implicaciones éticas y ambientales para garantizar la sostenibilidad a largo plazo.

La mejora de la genética de las plantas puede aumentar su capacidad para adaptarse a las condiciones cambiantes y a las demandas de los consumidores, lo que requiere repensar las prioridades y los métodos de mejoramiento para aprovechar las variaciones genéticas disponibles. Este enfoque refleja la evolución biológica impulsada por el hombre hacia una mejor adecuación de las características de las plantas a las necesidades actuales de la agricultura.

Las técnicas de mejoramiento genético como selección artificial, mutagénesis, manipulación genética de plantas, así como cruzamiento para crear híbridos simples y triples, rotación de individuos segregantes en diferentes ambientes, selección masiva por método de gravedad y evaluación de individuos segregantes en un ambiente favorable. Esto es necesario para optimizar la producción de maíz y controlar los casos graves de enfermedades. Estos métodos permiten el desarrollo de variedades más resistentes a enfermedades adaptadas a

diferentes condiciones, contribuyendo significativamente a la seguridad alimentaria y la estabilidad económica de los agricultores.

La identificación de las tecnologías utilizadas para mejorar el rendimiento del maíz resalta la importancia de adoptar prácticas agrícolas modernas. Desde sistemas de riego eficientes hasta herramientas de monitoreo y análisis de datos, estas tecnologías brindan oportunidades para optimizar el manejo de cultivos, maximizar el uso de recursos y mitigar riesgos externos, promoviendo una producción de maíz más sostenible y rentable.

## **2.5.Recomendaciones**

- Realizar una investigación exhaustiva de la literatura científica y colaborar con expertos en genética vegetal para identificar métodos de mejoramiento genético aplicables al maíz local.
- Organizar demostraciones prácticas tecnologías agrícolas innovadoras en campos de maíz para que los agricultores experimenten directamente sus beneficios.
- Crear grupos de discusión interdisciplinarios entre científicos, agricultores y autoridades locales para evaluar la viabilidad y aceptación de nuevas tecnologías en el cultivo del maíz.

## BIBLIOGRAFÍA

- Albán, M.G., Zambrano, J. L., Caviedes, G. M., Carvajal, F. (Ed.) 2023. Memorias del II Simposio Ecuatoriano del Maíz Ciencia, Tecnología e Innovación. Archivos Académicos USFQ, 49, 1–63. Disponible en <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/archivosacademicos/article/view/3109/3460>
- Álzate Perales, S. 2023. Estudio comparativo de nuevas tecnologías en el cultivo del maíz (*Zea mays*). Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales. Disponible en <https://repository.udca.edu.co/handle/11158/5434>
- Barrios, J. 2015. Natural Selection. Universidad Complutense de Madrid :14. <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-56185/26d-Gen%C3%A9tica%20Evolutiva.-Seleccion%20Natural.pdf>.
- Carrodegua-Gonzalez, A., & Zúñiga-Orozco, A. 2022. Métodos utilizados para la selección de parentales en pre-mejoramiento genético de plantas. *Cultivos Tropicales*, 43(2), e15-e15. Disponible en <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/1666/pdf>
- Caviedes, M., Carvajal-Larenas, F. E., & Zambrano, J. L. 2020. Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, (1). Disponible en <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/download/2588/3111?inline=1>
- Chávez, A., León, L. A. N., Calvo, T. W. J., León, T. P. N., Hoyos, A. E. M., Ruiz, I. C., ... & Valencia, F. E. 2022. Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1). Disponible en <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/2507>
- Damián-Huato, Miguel A., Cruz-Leon, Artemio, Ramirez-Valverde, Benito, Romero-Arenas, Omar, Moreno-Limón, Sergio, & Reyes-Muro, Luis. 2013. Maíz, alimentación y productividad: modelo tecnológico para productores de

temporal de México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 10(2), 157-176. Recuperado en 02 de marzo de 2024, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-54722013000200002&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-54722013000200002&lng=es&tlng=es).

Espinosa, A., Sierra, M., Gómez, N. 2003. Producción y tecnología de semillas mejoradas de maíz por el INIFAP en el escenario sin la PRONASE Agronomía Mesoamericana, vol. 14, núm. 1, 2003, pp. 117-121 Universidad de Costa Rica Alajuela, Costa Rica. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/437/43714116.pdf>

Estrada, B. 2017. Mejoramiento genético de maíz ante el complejo mancha de asfalto en el sureste de México. Disponible en [https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/simposia/Simposio\\_Maiz\\_B\\_Coutino\\_Estrada.pdf](https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/simposia/Simposio_Maiz_B_Coutino_Estrada.pdf)

Flores, G; Vega, K; Aguirre, R; Valencia, S. 2016. Hibridación y poliploidía en plantas. *Revista Ciencias Sunam* :120-121. <https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/121/pdf/120A06.pdf>.

Gefaell, J; Megías, M; Rolan, E; Gijón, J. 2023. Evidencias: La selección artificial. *Evolución de la Universidad de Vigo* :13-15. <https://evolucion.webs7.uvigo.es/2-Evidencias/2-artificial.php?tema=>

García, P., Pérez, A., & Alezones, J. 2020. Mejoramiento genético y producción de semilla de maíz en Venezuela. *Producción de Semillas en Venezuela*, 85. Disponible en [https://www.researchgate.net/profile/Marco-Barona/publication/345959209\\_Produccion\\_de\\_Semillas\\_en\\_Venezuela\\_Produccion\\_de\\_Semillas\\_en\\_Venezuela/links/5fb3113745851518fdaca5dd/Produccion-de-Semillas-en-Venezuela-Produccion-de-Semillas-en-Venezuela.pdf#page=85](https://www.researchgate.net/profile/Marco-Barona/publication/345959209_Produccion_de_Semillas_en_Venezuela_Produccion_de_Semillas_en_Venezuela/links/5fb3113745851518fdaca5dd/Produccion-de-Semillas-en-Venezuela-Produccion-de-Semillas-en-Venezuela.pdf#page=85)

García-Velasco, Rómulo, Portal-González, Nayanci, Santos-Bermúdez, Ramón, Rodríguez-García, Armando, & Companioni-González, Barbarita. 2021. Mejoramiento genético para la resistencia a marchitez por *Fusarium* en

banano. *Revista mexicana de fitopatología*, 39(1), 122-146. Epub 07 de mayo de 2021. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2008-2>

Hasang Moran, E. S., Cobos Mora, F., Lombeida García, E., & Medina Litardo, R. 2020. Sustentabilidad del sistema de producción de maíz en la localidad de Ventanas, Ecuador. *Journal of Science and Research*, 5(CININGEC), 169–181. Disponible en <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/1005>

Hernández-Muñoz, S; Pedraza-Santos, ME; López, PA; Gómez-Sanabria, JM; Morales-García, JL. 2019. Mutagenesis in the improvement of ornamental plants. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* 25(3):151-167. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rcsh/v25n3/2007-4034-rcsh-25-03-151-es.pdf>.

Intagri. 2024. Los 10 Componentes Tecnológicos Más Importantes en la Producción de Maíz de Alto Rendimiento. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/cereales/los-10-componentes-tecnologicos-mas-importantes-en-la-produccion-de-maiz-de-alto-rendimiento?p=registro>

Jacto. 2023. Plantas transgénicas: ¿qué son? Blog Latam Jacto :1-8. DOI: <https://doi.org/https://bloglatam.jacto.com/plantas-transgenicas/>.

Márquez Sánchez, Fidel; Sahagún Castellanos, Luis; Barrera Gutiérrez, Erasmo. 2019. Nuevo método de mejoramiento genético para resistencia a sequía en maíz *Revista de Geografía Agrícola*, núm. 42, enero-junio, pp. 9-14 Universidad Autónoma Chapingo Texcoco, México. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/757/75712192002.pdf>

Melendres-Martínez, J. I., Valdivia-Bernal, R., Lemus-Flores, C., Medina Torres, R., García-López, M., Ortiz-Caton, M., ... & Tadeo-Robledo, M. (2018). Estimación de parámetros genéticos de maíz bajo mejoramiento por selección recíproca recurrente. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(7), 1327-1337. Disponible en <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v9n7/2007-0934-remexca-9-07-1327.pdf>

Mastretta, A; Acevedo, F. 2020. La diversidad genética y la domesticación. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

(CONABIO) :13-15. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/evolucion-bajo-domesticacion/divgenetica>

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) 2020. Informe de rendimiento de maíz amarillo invierno 2020. Coordinación General de Sistemas de Información-CGINA. Disponible en: <https://fliphtml5.com/ijia/dxed/basic/>

Narro León, L., Chávez Cabrera, A., Jara Calvo, T., Narro León, T., Medina Hoyos, A., Cieza Ruiz, I., Díaz Chuquisuta, P., Alvarado Rodríguez, R., Escobal Valencia, F. 2022. Tecnologías disponibles para incrementar la producción de maíz en Perú. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1). Disponible en <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/2507/2974>

Orbe, K., Escobar, J., Sánchez, V., Zambrano, J. 2017. Memorias del Taller: Métodos y Desarrollo de Protocolos para la Investigación en Organismos Genéticamente Modificados. INIAP, Ecuador. Revisado el 5 de noviembre de 2021, disponible en: <https://bit.ly/3HEWeGq>

Pierre, J. F. 2021. Mejoramiento genético participativo: herramientas para una producción sustentable de maíz criollo (*Zea mays* L.) en Yucatán. Disponible en <https://downloads.editoracientifica.org/articles/210303595.pdf>

Quiroga, J. A. J., & Piñeiro, M. 2020. Potencial de las técnicas de mejora genética de precisión en agroalimentación. *Phytoma España: La revista profesional de sanidad vegetal*, (315), 40-47. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7290566>

Ramírez, F. 2020. Mejoramiento genético de las plantas: ¿qué beneficios tiene para los seres humanos. Universidad de Chile :1-7. DOI: <https://doi.org/https://uchile.cl/noticias/163779/mejoramiento-genetico-de-las-plantas-que-beneficios-tiene>.

Ramos-Castellá, Alma Laura, & Iglesias-Andreu, Lourdes Georgina. 2022. Avances y tendencias en mejoramiento genético de vainilla. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2), e2339. Epub April 31, 2022. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:2339](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:2339)

- Rimieri, P. 2021. Aspectos agronómicos de relevancia en poblaciones utilizadas como base para el mejoramiento genético vegetal. *BAG. Journal of basic and applied genetics*, 32(2), 71-74. <https://dx.doi.org/10.35407/bag.2021.32.02.08>
- Rimieri, P. 2023. Historia y perspectivas del mejoramiento genético del maíz forrajero en la Argentina. *BAG. Journal of basic and applied genetics*, 34(1), 31-39. Disponible en [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-62332023000100031&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-62332023000100031&script=sci_arttext)
- Rosas, J. 2018. Conceptos, métodos y técnicas para el mejoramiento genético de plantas cultivadas. IICA :51. [https://apps.iica.int/pccmca/docs/Minicursos/2.%20Juan%20Carlos%20Rosas/J\\_C\\_Rosasmejoramiento%20gen%C3%A9tico%20de%20plantas%20cultivadas.pdf](https://apps.iica.int/pccmca/docs/Minicursos/2.%20Juan%20Carlos%20Rosas/J_C_Rosasmejoramiento%20gen%C3%A9tico%20de%20plantas%20cultivadas.pdf)
- Sánchez-Navarrete, E. T., Castañeda-Antonio, M. D., Baez, A., & Morales-García, Y. E. 2021. Rizobacterias para el mejoramiento del cultivo de maíz (*Zea mays*). Una tecnología prometedora para la producción de maíces criollos. Disponible en <https://repositorioinstitucional.buap.mx/server/api/core/bitstreams/45db2504-347a-49a6-8ede-ccbdbd773a94/content>
- Steinbrecher, R. 2017. Ingeniería Genética en Plantas y las “Nuevas Técnicas de Mejora (NBTs)” Riesgos inherentes y necesidad de regulación. :18. DOI: [https://doi.org/https://www.quericoes.org/wp-content/uploads/2017/03/20170420\\_Steinbrecher\\_esp.pdf](https://doi.org/https://www.quericoes.org/wp-content/uploads/2017/03/20170420_Steinbrecher_esp.pdf).
- Tapia Coronado, J. J., Atencio Solano, L. M., Ramírez Duran, J., Osorio Guerrero, K. V., Castillo Sierra, J., & Mejía Kerguelén, S. L. 2022. Situación actual y avances tecnológicos para mejorar la productividad del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 14(1), 1-12. Disponible en [https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/38785/Ver\\_Documento\\_38785.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/38785/Ver_Documento_38785.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Turrent Fernández, A., Cortés Flores, J., Espinosa Calderón, A., Mejía Andrade, H., Serratos Hernández, J. 2010. ¿Es ventajosa para México la tecnología actual de maíz transgénico?. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 1(4), 631-646. Recuperado en 22 de enero de 2024, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-09342010000400015&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000400015&lng=es&tlng=es).
- Urias, AA; Ayil, B; Delgado, R; Silva, J; Segura, M; Poot, W. 2022. Cultivo de tejidos vegetales y mutagénesis inducida: una estrategia para el desarrollo de plantas tolerantes a salinidad. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes* 30(85). DOI: <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/9179484.pdf>.
- Vargas, W. C., Flores, P. M., Mora, F. C., & Villalva, J. G. 2023. Historia del maíz desde tiempos ancestrales hasta la actualidad. *Journal of Science and Research*, 8(4), 115-130. Disponible en <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/2951/2602>
- Vera Aviles, D., Liuba Delfini, G., Godoy Montiel, L., Díaz Ocampo, E., Sabando Ávila, F., Garcés Fiallos, F., Meza Bone, G. 2013. Análisis de estabilidad para el rendimiento de híbridos de maíz (*Zea mays*) en la Región Central del Litoral Ecuatoriano *Scientia Agropecuaria*, vol. 4, núm. 3, pp. 211-218 Universidad Nacional de Trujillo Trujillo, Perú. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/3576/357633706007.pdf>
- Villaseñor-Mir, H. E., Huerta-Espin, J., Rodríguez-García, M. F., Santa-Rosa, R. H., Espitia-Rangel, E., & Martínez-Cruz, E. 2021. Mejoramiento genético de avena en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (25), 21-25. Disponible en <https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/2808/4544>
- Yáñez, C., Zambrano, J. L., Caicedo, M., Sánchez Arizo, V. H., y Heredia, J. 2003. Catálogo de recursos genéticos de maíces de altura ecuatorianos. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina, Programa de Maíz. Disponible en <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/43>

- Zambrano, J.L., Yáñez G., C., y Mora C., E. 2003. Evaluación de líneas S1 de maíces amarillos y blancos harinosos resistentes a *F.moniliforme*, bajo inoculación artificial en Ecuador. En D.L. Danial, Informe anual de subproyectos 2002 Quito, Ecuador: PREDUZA. pp. 9-11. Disponible en <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/3138>
- Zambrano, L. 2022. Híbrido de maíz para la región Costa del Ecuador. Disponible en <https://latam.maize.org/nuevo-hibrido-de-maiz-qpm-para-la-region-costa-del-ecuador/>
- Zamora, A. 2017. La hibridación de maíz altera más la composición del grano que la mejora biotecnológica. Disponible en <https://fundacion-antama.org/la-hibridacion-de-maiz-altera-mas-la-composicion-del-grano-que-la-mejora-biotecnologica/>

## ANEXOS



**Anexo 1.** Híbrido de maíz para la región Costa del Ecuador

**Fuente:** (Zambrano 2022).



**Anexo 2.** La hibridación de maíz altera más la composición del grano que la mejora biotecnológica.

**Fuente:** (Zamora 2017).