



CULTIVO DE MAÍZ



Editores:

María Bernarda Ruilova Cueva
Fernando Javier Cobos Mora
Juan Carlos Gómez Villalva



ISBN: 978-9942-606-14-3



Manual Académico - Diagnóstico Parasitológico
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
ISBN: 978-9942-606-14-3 (eBook)

Editado por:
Universidad Técnica de Babahoyo
Avenida Universitaria Km 2.5 Vía a Montalvo
Teléfono: 052 570 368
© Reservados todos los derechos 2023

Babahoyo, Ecuador
www.utb.edu.ec
E-mail: editorial@utb.edu.ec

Este texto ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos.

Diseño y diagramación, montaje y producción editorial
Universidad Técnica de Babahoyo

Babahoyo – Los Ríos – Ecuador

Queda prohibida toda la reproducción de la obra o partes de la misma por cualquier medio, sin la preceptiva autorización previa.

PRESENTACIÓN

El libro "Cultivo de maíz" es una guía exhaustiva para aquellos que desean aprender sobre el manejo de este importante cultivo. El maíz es una de las principales fuentes de alimento en el mundo y es vital para la economía global. A lo largo de las páginas de este libro, se explican todos los aspectos necesarios para su cultivo, desde la selección de la semilla hasta la cosecha y el almacenamiento.

Se detallan las diferentes variedades de maíz y se explica cómo elegir la más adecuada para cada región y clima. Es importante tener en cuenta que el maíz es un cultivo que requiere mucha luminosidad y agua, por lo que es necesario elegir una variedad que se adapte a las condiciones climáticas y de suelo en la zona donde se vaya a cultivar. Además, es fundamental realizar una buena preparación del suelo antes de la siembra, ya que esto puede afectar significativamente el rendimiento de la cosecha.

Una vez que se haya sembrado el maíz, es necesario prestarle atención y cuidado durante todo su ciclo de crecimiento. Esto incluye el control de plagas y enfermedades y la eliminación de malezas que puedan competir con las plantas de maíz por el agua y los nutrientes del suelo. Es importante seguir las recomendaciones del libro para garantizar que se obtenga el mejor rendimiento posible.

Cuando llegue el momento de la cosecha, el libro proporciona instrucciones sobre cómo recolectar el maíz de manera efectiva y cómo almacenarlo correctamente para prolongar su vida útil. También se brinda información sobre cómo utilizar el maíz en la alimentación humana y animal, así como su uso en la industria.

En resumen, el libro "Cultivo de maíz" es una herramienta esencial para cualquier persona interesada en aprender más sobre este importante cultivo y cómo aprovechar al máximo sus beneficios. Si estás interesado en el cultivo de maíz o simplemente quieres saber más sobre este importante alimento, este libro es una lectura obligada. Proporciona una comprensión completa del proceso de cultivo y ofrece consejos valiosos para maximizar el rendimiento y obtener una cosecha exitosa.

Ph.D. Fernando Javier Cobos Mora.

Docente- Investigador de la Universidad Técnica de Babahoyo.

CONTENIDO

Capítulo I. Origen e historia	9
1.1. Introducción	9
1.2. El origen del maíz	10
<i>Teosinte</i>	10
<i>Tripsacum</i>	12
1.3. Tipos, usos y clasificación	13
<i>Clasificación basada en taxonomía de plantas</i>	13
<i>Clasificación basada en entornos de cultivo o adaptación</i>	13
<i>Clasificación basada en altura de planta y tipos de hojas</i>	14
<i>Clasificación basada en usos</i>	15
1.4. Sistemas de cultivo.....	16
<i>Monocultivo</i>	16
<i>Cultivo intercalado</i>	17
<i>Rotaciones de cultivos a base de maíz</i>	17
1.5. Clasificación botánica del maíz.....	18
1.6. Morfología del maíz	18
<i>Sistema Radicular</i>	18
<i>Tallo</i>	18
<i>Hojas</i>	19
<i>Flores</i>	19
<i>Grano</i>	20
1.7. Etapas de crecimiento del maíz	20
1.8. Factores que controlan el desarrollo.....	23
<i>Temperatura</i>	23
<i>Influencia del fotoperiodo</i>	25
1.9. Componentes del rendimiento y determinantes del rendimiento	26
1.10. Conclusiones.....	27
1.11. Bibliografía.....	27
Capítulo II. Situación mundial, regional y nacional en la producción de maíz.	33
2.1. Introducción.	33
2.2. Situación mundial, regional y nacional en la producción de maíz.....	34
2.3. Importancia del cultivo.....	35

2.4.	Variedades de maíz	37
2.5.	Mejoramiento genético de híbridos de maíz en el litoral ecuatoriano.	37
2.6.	Sectores de producción agrícola en Ecuador, su dinámica	38
	<i>Zonificación Agroecológica</i>	38
2.7.	Época de siembra	41
2.8.	Sistemas de producción	41
2.9.	Condiciones agroecológicas del maíz	42
	<i>Suelos</i>	42
	<i>Luz y fotoperiodo</i>	42
	<i>Temperatura</i>	43
	<i>Agua</i>	43
	<i>Altitud</i>	44
2.10.	Manejo agronómico	45
	<i>Semillas</i>	45
	<i>Fertilización</i>	45
	<i>Adopción de semillas híbridas</i>	46
2.11.	Preparación de suelos y métodos de siembra	46
	<i>Preparación del suelo</i>	46
	<i>Métodos de siembra</i>	47
	<i>Siembra</i>	48
	<i>Riego</i>	50
	<i>Cosecha</i>	51
2.12.	Dificultades que enfrentan los productores de maíz	52
2.13.	Características de la producción de los productores	53
2.14.	Sustentabilidad en el cultivo de maíz	54
2.15.	Conclusiones	55
2.16.	Bibliografía	57
Capítulo III. Nutrición en maíz.		64
3.1.	Introducción	64
3.2.	Nutrientes esenciales para plantas	65
3.3.	Nutrientes en Maíz.	68
3.4.	Absorción de nutrientes	69
3.5.	Gestión de nutrientes	71

<i>Nitrógeno</i>	72
<i>Fósforo</i>	74
<i>Potasio</i>	76
<i>Calcio</i>	77
<i>Magnesio</i>	77
<i>Azufre</i>	78
<i>Micronutrientes</i>	79
3.6. Problemas ambientales.....	80
3.7. Manejo Integrado de Nutrientes Vegetales.....	81
3.8. Conclusiones	83
3.9. Bibliografía.....	83
Capítulo IV. Manejo integrado de plagas y enfermedades.....	90
4.1. Introducción	90
4.2. Manejo integrado de plagas.....	91
4.3. Tipos de plagas.....	92
4.4. Estrategias y tácticas para el manejo de plagas.....	93
<i>Estrategia sin acción</i>	94
<i>Reducir el número de plagas</i>	94
<i>Reducir la susceptibilidad del huésped a las plagas</i>	95
4.5. Ejemplos de implementación exitosa de MIP en maíz.	95
4.6. Resistencia a plaguicidas.....	97
<i>Características de resistencia</i>	97
<i>¿Prevención o cura?</i>	98
4.7. Sustentabilidad en el manejo integrado de plagas.....	99
<i>Potencial para mejorar la sostenibilidad</i>	100
<i>Manejo de plagas y sostenibilidad</i>	101
4.8. Conclusiones	106
4.9. Bibliografía.....	107
Capítulo V. Manejo integral de arvenses.....	114
5.1. Introducción	114
5.2. Malezas de importancia en arroz.....	114
5.3. Componentes de competencia.....	115
5.4. Pérdidas de rendimiento por malezas.....	116

5.5.	Métodos de control.....	117
	<i>Medidas Preventivas</i>	117
	<i>Medidas Culturales</i>	117
	<i>Control físico</i>	123
	<i>Control químico</i>	123
	<i>Control biológico</i>	133
5.6.	Manejo integrado de malezas	134
5.7.	Arroz tolerante a herbicidas	135
5.8.	Conclusiones	136
5.9.	Bibliografía.....	136
Capítulo VI. La quema de los residuos de cosecha y su impacto en la fertilidad de los suelos.		147
6.1.	Introducción	147
6.2.	Rastrojos.....	149
6.3.	Características de los residuos de cultivos	150
6.4.	Quema de rastrojos.....	152
6.5.	Efectos de la quema en las propiedades físicas del suelo	153
6.6.	Efectos de la quema en las propiedades químicas del suelo	156
6.7.	Residuos de cultivos para la mejorar el suelo	160
6.8.	Residuos de cultivos para la remediación de suelos	165
6.9.	Conclusiones	167
6.10.	Bibliografía.....	168
Capítulo VII. Industrialización del maíz.		179
7.1.	Introducción	179
7.2.	Importancia del maíz.....	182
7.3.	El maíz como materia prima	182
7.4.	Composición del grano de maíz	183
7.5.	Calidad Nutricional del Maíz	184
	<i>Calidad de la proteína</i>	185
	<i>Carbohidratos</i>	186
	<i>Composición del aceite</i>	188
	<i>Pigmentos naturales</i>	190
	<i>Composición mineral</i>	190
7.6.	Biofortificación del Maíz	192

7.7.	Valor añadido	193
7.8.	Alimentos de maíz fermentado	193
7.9.	Maíz Especial	194
7.10.	Industrialización del grano de maíz	194
	<i>Industria procesadora</i>	195
	<i>Procesamiento por vía húmeda</i>	196
	<i>Procesamiento por vía seca</i>	198
7.11.	Conclusiones.....	199
7.12.	Bibliografía.....	199
Capítulo VIII. Maíz Forrajero.....		208
8.1.	Introducción	208
8.2.	Origen del maíz	209
8.3.	Clasificación taxonómica del maíz	210
8.4.	Plantas con metabolismo C4	211
8.5.	Fenología del cultivo de maíz	212
8.6.	Maíz como forraje	214
8.7.	Forrajes Verdes	215
8.8.	Calidad del forraje	215
8.9.	Calidad forrajera del maíz	216
8.10.	Ensilado de Maíz	216
8.11.	Valor nutricional.....	217
8.12.	Uso de maíz forrajero en Ecuador	219
8.13.	Metodología de Ensilaje	221
8.14.	Calidad del ensilaje.....	223
8.15.	Costo de producción de maíz ensilado	224
8.16.	Clima y suelo	225
8.17.	Exigencias hídricas	226
8.18.	Ecofisiología del maíz	227
8.19.	Densidad de siembra.....	229
8.20.	Conclusiones.....	230
8.21.	Bibliografía.....	230

Capítulo I. Origen e historia

Fernando Javier Cobos Mora

Universidad Técnica de Babahoyo
<https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

Walter Oswaldo Reyes Borja

Universidad Técnica de Babahoyo
<https://orcid.org/0000-0002-1706-0793>

Jackson Alejandro Cornejo Ortiz

División Semillas, Agripac S.A
<https://orcid.org/0000-0001-7934-3089>

Marlon Yoel González Chica

Universidad Técnica de Babahoyo
<https://orcid.org/0000-0001-6945-5175>

1.1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los principales cultivos a nivel mundial. Se cultiva en la mayoría de las regiones templadas y tropicales del mundo y es una fuente importante de alimentación humana, alimentación animal y procesos industriales (FAOSTAT, 2018). Es una planta originaria de México y un importante cultivo alimentario. Cuando los europeos llegaron a América del Norte y del Sur a finales del siglo XV y principios del XVI, se llevaron el maíz a casa y lo esparcieron por todo el mundo durante el resto de sus conquistas. El maíz es uno de los cultivos más comunes cultivados en la actualidad, se cultiva en altitudes de hasta unos 50 grados al norte y al sur del ecuador y sobre el nivel del mar hasta 3000 m sobre el nivel del mar (Morris, 2002). Aunque el maíz es de naturaleza cosmopolita, es un alimento básico en varios países de América del Sur y Central, África Oriental, América Central y el Sudeste Asiático, incluida China. En los Estados Unidos, el maíz se cultiva como alimento, forraje y cultivos (Christensen, 2002).

El maíz es uno de los cultivos que jugó un papel importante en el desarrollo de la cultura estadounidense. Ortiz (1994) señala correctamente que desde los Andes hasta Mesoamérica, y desde el Caribe hasta el sureste de Bosque, el maíz desarrolló cultivos en grandes concentraciones de población, lo que les permitió asentarse y prosperar.

1.2. El origen del maíz

Una gran controversia siempre ha girado en torno a si el maíz nativo se deriva del maíz silvestre o del Teosinte, que nunca se ha encontrado en estado silvestre, ni en Mesoamérica ni en América del Sur. Mangelsdorf (1974) estaba convencido de que algunas características distinguen al maíz silvestre del Teocinte y el *Tripsacum*. Esta hipótesis, se basaba en su convicción de que el maíz arqueológico hallado en los estratos más antiguos de Tehuacán, en México, es silvestre.

No hay consenso sobre dónde pudo haber evolucionado el maíz silvestre. Wilkes (1989), por otro lado, postuló que el maíz silvestre era una planta de tierras altas, a pesar de haber sido encontrado en lo más profundo de un sitio arqueológico mexicano, y los estudiosos han intentado reconstruir sus propiedades. Wilkes (1989) cree que este maíz tenía una espiga central masiva con pocas o ninguna rama en la espiga (en la inflorescencia masculina de los estambres) y varias mazorcas laterales pequeñas, una en cada uno de los nudos superiores a lo largo de los múltiples macollos. La selección humana ha producido plantas con una sola mazorca gigante del tamaño de un puño y múltiples panículas ramificadas en un solo tallo. Al mismo tiempo, ha disminuido el papel de la gluma inferior que protege los granos, la raquilla se ha acortado y perdido la abscisión, de modo que la mazorca no se rompe.

Hoy en día, el maíz depende de los humanos para su propagación, pero el maíz primitivo puede liberar semillas muy fácilmente al fragmentar el frágil eje y desplazar semillas duras, pequeñas, rojas o marrones, por lo que pudo propagarse. Atractivo para las aves migratorias. El maíz "probablemente silvestre" original, como el del Valle de Tehuacán, puede haber tenido de 48 a 56 semillas, mientras que el maíz híbrido moderno puede tener de 500 a 700 semillas por mazorca (Grobman *et al.*, 2012).

Teosinte

El teosinte es el pariente más cercano del maíz, con el mismo número de cromosomas (20) y similar en longitud y posición del centrómero. El teosinte se hibrida fácilmente con el maíz y los híbridos de primera generación son vigorosos y fértiles cuando se autopolinizan o se retrocruzan con el progenitor (Mangelsdorf, 1974).

El primer nombre en latín que se le dio al teosinte fue el proporcionado por Schröder (1833), que solo se refería a la forma anual – *Euchlaena mexicana* Schröder. En 1910 AS Hitchcock (1922) descubrió la forma perenne del teosinte, a la que llamó *Euchlaena perennis*

Hitchcock. Kuntze (1904) y Reeves y Mangelsdorf (1942) posteriormente lo atribuyeron al género *Zea* y lo rebautizaron como *Z. mexicana* (Schröder) Kuntze y *Z. perennis* (Hitchcock).

Las diferencias esenciales entre el teocintle y el maíz son las siguientes: (Nobogame, Meseta Central, Chalco y Balsas) y dos en Guatemala (Huehuetenango y Guatemala). Pero también se clasifica como dos subespecies de *Z. mays* L.: ssp. *mexicana* (que incluye las razas Chalco, Meseta Central y Nobogame), ssp. *parviglumis* var. *parviglumis* (que corresponde a la raza Balsas), y ssp. *parviglumis* var. *huehuetenangensis* (la raza Huehuetenango), así como la especie *Z. luxurians* (Doebley, 1984).

Las diferencias esenciales entre el teocinte y el maíz son las siguientes:

1. Las mazorcas de teosinte son quebradizas y se rompen en la mazorca.
2. El teosinte tiene dos filas de mazorcas, mientras que el maíz tiene cuatro o más.
3. En el teosinte solo una de las dos espiguillas femeninas es fértil, la otra está reducida.
4. En teosinte las glumas exteriores son muy duras, mientras que en maíz son blandas.
5. En el teosinte las glumas cubren las semillas, mientras que en el maíz los granos son (normalmente) expuestos.
6. En el teocinte, los granos están incrustados en las cúpulas profundas del raquis, mientras que en el maíz, los granos se mantienen en su lugar mediante cúpulas que no son demasiado profundas.
7. En el teocinte los granos son frágiles, pero no lo son en el maíz.
8. Las semillas de teosinte son pequeñas; las de maíz pueden ser pequeñas, pero por lo general tienen el doble del tamaño de las razas silvestres.
9. En el teosinte la inflorescencia lateral primaria suele ser masculina, mientras que en el maíz la inflorescencia lateral primaria suele ser femenina.
10. En teosinte las ramas laterales primarias son largas, pero en maíz son más cortas

Otros rasgos, como el número de mazorcas por planta o la cantidad de hojas por mazorca, son presumiblemente efectos secundarios de la domesticación, a diferencia de los cambios

morfogenéticos primarios relacionados con la transformación del teosinte en maíz (Harlan, 1995).

Tripsacum

Hay 16 especies en este género, 12 de las cuales son nativas de México y Guatemala, 1 de Florida y Cuba, y 3 de América del Sur. Los expertos señalan que existen otras especies, aún no descritas, en este último continente. Su rango de origen estimado es México y América Central, con un centro de variación en el centro-oeste de México (Wilkes, 1989; Eubanks, 2001).

La más parecida al maíz es *T. maizar* (Mangelsdorf, 1974;). Sin embargo, Galinat (1977) considera que este género relacionado con el maíz es más diverso que teosinte y distante de este último.

La distribución de *Tripsacum australe* en Sudamérica es la siguiente. Se encuentra en la sabana venezolana y en la vertiente sur de la meseta de Amanbay. En Bolivia, se presenta en tierras bajas hasta los 1.500 metros sobre el nivel del mar. En Brasil, *Tripsacum* se encuentra en áreas por debajo de los 800 metros sobre el nivel del mar. En Ecuador se encuentra a altitudes superiores a los 1200 m y en Paraguay al sur del paralelo 26. En Perú, *Tripsacum* ocurre cerca de Tingo María (Grobman y Col, 1961)

La diferencia entre el maíz y sus parientes Teocintle y *Tripsacum* es la esclerosación de los tejidos, especialmente el eje, la cúpula y la infraglia. Tanto en la teosina como en el *tripsacum*, la cariósida está rodeada por una caja rígida y consta del entrenudo axial, la cúpula y la gluma inferior.

Estas estructuras se vuelven fuertemente lignificadas a medida que la fruta madura, los experimentos con híbridos de maíz y teocinte han demostrado que los genes responsables de la lignificación están presentes en muchos, si no en todos, los cromosomas del teocinte. Por lo tanto, en generaciones posteriores de híbridos maíz- teocinte, es difícil encontrar incluso los individuos más parecidos al maíz que carezcan de algún grado de lignificación del raquis, la cúpula o la gluma inferior (Galinat, 1977).

1.3. Tipos, usos y clasificación

Botánicamente, el maíz es una planta monocotiledónea con flores masculinas (panículas) en la parte superior del tallo e inflorescencias femeninas (tallos) en el centro del nudo del tallo de la misma planta. La disposición espacial de las flores promueve tanto la autopolinización como la hibridación (Morris, 2002). Durante la floración (antesis), una gran cantidad de granos de polen se desprenden de la espiga de la flor y son capturados por estigmas receptivos (o cerdas).

Las inflorescencias masculinas (espigas) del maíz pueden producir muchos más granos de polen de los que se necesitan para polinizar una sola planta (Schoper *et al.*, 1987). Goss (1968) estimó que una planta típica de maíz produce de 2 a 5 millones de granos de polen. El desprendimiento de polen comienza antes de que la panícula esté completamente fuera del verticilo y puede durar una semana o más (Ritchie *et al.*, 1993).

Según Danforth, (2009), hay muchas formas o tipos de maíz, y se clasifican según la descripción botánica, la utilización, los entornos de crecimiento, los tipos de madurez, etc. Algunas de las clasificaciones del maíz se describen brevemente a continuación:

Clasificación basada en taxonomía de plantas

- Harina de maíz — *Zea mays* var. *amylacea*
- Palomitas de maíz — *Zea mays* var. *everta*
- Maíz dentado — *Zea mays* var. *indentata*
- Maíz pedernal— *Zea mays* var. *indurata*
- Maíz dulce — *Zea mays* var. *saccharata* y *Zea mays* var. *rugosa*
- Maíz ceroso — *Zea mays* var. *Ceratina*

Clasificación basada en entornos de cultivo o adaptación

Aunque no existe un sistema universalmente aceptado para clasificar los ambientes de producción de maíz, el Centro Internacional de Investigaciones sobre Maíz y Trigo (CIMMYT) reconoce cuatro mega ambientes para la producción de maíz:

- Tierras bajas tropicales

- Transición subtropical y de altitud media
- Tierras altas tropicales
- Templadas

Maíz tropical y subtropical estos cultivares están adaptados a ambientes tropicales, se caracterizan por plantas altas y espigas grandes, tienen una gran capacidad para almacenar la fotosíntesis como monosacáridos en el tallo en la madurez de cosecha (Hay y Gilbert, 2001).

Los cultivares de tierras altas tropicales y templadas han evolucionado para ser más cortos y tener cabezas más pequeñas, con menos azúcar retenida en el tallo cuando están maduros para la cosecha.

Variedades templadas son las que se adaptan a las regiones templadas más frías del mundo, como América y Europa.

Clasificación basada en altura de planta y tipos de hojas

Maíz forrajero: Estos genotipos son aquellos que tienen un número extra de hojas por encima del nudo de la mazorca (Shaver, 1983). En la mayoría de los híbridos (cultivares) de maíz de clima templado, la planta madura tiene unas cinco hojas por encima del nudo principal de la panícula. El gen *Lfy* hace que las plantas tengan un número adicional de hojas (>6 a 11) en la panícula en comparación con los híbridos normales de la misma madurez.

Los forrajes híbridos han ganado popularidad recientemente como maíz para ensilaje (Roth, 2003). Esto probablemente se deba al mayor período potencial de cosecha del ensilaje y al mayor contenido de materia seca del ensilaje (Ma *et al.*, 2006b). Estos híbridos tienen mayor número de hojas, más altos y áreas de hojas más grandes que sus contrapartes tradicionales (Subedi y Ma, 2005a, 2005b). Debido al follaje denso y mayor biomasa (Subedi *et al.*, 2009).

Maíz de hoja erecta: Maíz de hoja vertical: Ciertos fenotipos de maíz se desarrollan con una orientación de hoja vertical más que los cultivares de maíz convencionales. Se cree que el tipo vertical es más eficiente para bloquear la luz del dosel (Danforth, 2009).

Maíz de nervadura central marrón (BMR): Las plantas de nervadura central marrón (*bmr*) se caracterizan por una pigmentación marrón o marrón rojiza en la nervadura central, la corteza y la médula de las hojas. Este maíz contiene un gen (*bm3*) que reduce el nivel de

lignina producido durante el desarrollo de la planta. Como resultado, el maíz para ensilaje BMR contiene más fibra digerible que el maíz para ensilaje convencional (Gehman *et al.*, 2008).

Maíz verde (SG): Se ha informado la expresión del rasgo Staying Green (SG) en el maíz (Rajcan y Tollenaar, 1999a, 199b). Estos fenotipos exhiben una senescencia retrasada, con mayor contenido de clorofila y agua en las hojas en la madurez que los fenotipos de maíz convencionales.

Nuestra comprensión de los procesos fisiológicos que subyacen a este rasgo es limitada. Rajcan y Tollenaar (1999b) encontraron que la senescencia de las hojas en los híbridos de maíz recientes se retrasó debido a una relación mejorada entre la oferta de asimilados (es decir, las fuentes) y la demanda de asimilados (es decir, el producto) durante el período de llenado del grano.

También encontraron que la absorción total de N en las porciones aéreas fue un 10 y un 18 % mayor en el híbrido SG que en un híbrido más viejo en condiciones bajas y altas de N en el suelo, respectivamente.

Maíz de altura reducida (Rht): El maíz de bajo crecimiento (Rht) está diseñado genéticamente para reducir la altura de la planta. Al acortar la longitud del entrenudo, hemos reducido significativamente la altura total del tronco. Estos tipos tienen números de hojas o números de hojas regulares (Danforth, 2009).

Clasificación basada en usos

Maíz en grano: Los cereales se refieren principalmente a granos utilizados para consumo humano, alimentación animal y fines industriales, como harina de maíz, almidón y etanol.

Palomitas de maíz: Las palomitas de maíz consisten en mazorcas de maíz con pequeños gránulos que revientan cuando se tuestan. Las palomitas de maíz se utilizan como uno de los bocadillos más comunes.

Maíz dulce: El maíz se cultiva para el mercado fresco o para fines de procesamiento (por ejemplo, enlatado). Los granos de maíz contienen más azúcar que otros granos. Algunas variedades de maíz dulce tienen un mayor contenido de azúcar, también llamadas variedades dulces (ricas en azúcar) y superdulces, según el tipo de genes que contengan. El consumo de maíz dulce ha aumentado significativamente a nivel mundial. El maíz dulce es más

beneficioso en comparación con otros derivados del maíz debido a su grano suave, cáscara delgada, alta concentración de azúcar y sabor. La masa hecha de granos de maíz dulce secos se usa en alimentos para bebés, papas fritas, pasta, fideos y pasteles. El maíz puede ser una excelente fuente de varios minerales (Danforth, 2009).

Maíz baby: Las mazorcas se cosechan temprano, pero las mazorcas son muy pequeñas e inmaduras de plantas de maíz especializadas. El maíz tierno en la mazorca generalmente se procesa y se enlata antes de la venta.

Maíz para ensilaje: Maíz cosechado para pienso o ensilaje antes de que la planta alcance la madurez fisiológica. La producción de ensilaje de maíz es una parte integral de muchas operaciones de carne y productos lácteos. Todos los tipos de maíz se pueden usar como maíz para ensilaje, pero ciertas variedades tienen características más deseables que otras son híbridos más específicos para ensilaje. Tradicionalmente, los híbridos de maíz y grano se han utilizado con dos propósitos en la producción de ensilaje. Sin embargo, los criterios de selección que favorecen la producción de grano, como alta densidad, granos duros, cañas fuertes y secado rápido del grano, pueden no ser deseables para la cosecha, fermentación y digestibilidad del ensilaje (Ma *et al.*, 2006b). Los cultivares de ensilaje deben tener una madurez tardía, gránulos de almidón blandos, secado lento del tallo, alta digestibilidad de la FDN y baja fibra detergente neutra (FDN) (Dwyer *et al.*, 1999a).

1.4. Sistemas de cultivo

Un sistema de cultivo se refiere a una sucesión de cultivos en la tierra o una unidad agrícola cultivada dentro de un período de tiempo. En realidad, existen diferentes sistemas de cultivo basados en el maíz en todo el mundo. Los más importantes se describen a continuación:

Monocultivo

El monocultivo se refiere a plantar un solo cultivo en el mismo campo durante la temporada de crecimiento. En los sistemas intensivos de producción de maíz de los Estados Unidos y algunos países de la Unión Europea, históricamente ha sido una práctica común cultivar solo maíz y la rotación de cultivos se está volviendo cada vez más popular (Danforth, 2009).

Cultivo intercalado

En los ambientes tropicales o subtropicales, los pequeños propietarios cultivan maíz para la subsistencia, y principalmente en condiciones de secano (secano). Cultivos mixtos a base de maíz, en agricultura de subsistencia de América Latina, Asia y África, donde generalmente se intercalan leguminosas (cultivo mixto, en hileras o en relevo) con maíz. Se intercalan leguminosas como la soya, el caupí (*Vigna unguiculata* L.), el frejol de campo (*Phaseolus vulgaris* L.), el frejol mungo (*V. radiate* L.), el maní (*Arachis hypogaeae*), el frejol terciopelo (*Mucuna pruriens* L.) y otras. También existen algunos sistemas de cultivo en los que el maíz se intercala con cultivos de cereales como el mijo africano (*Eleusine corocana* L.) (Subedi, 2002) o el arroz de secano (*Oryza sativa* L.) (Subedi *et al.*, 1993) o el algodón (*Gossypium hirsutum* L.).

Rotaciones de cultivos a base de maíz

Se pueden rotar diferentes especies de cultivos en el mismo terreno uno tras otro en el mismo año o en años diferentes. Las rotaciones comunes a base de maíz en diferentes partes del mundo son las siguientes:

- Maíz seguido de un cultivo de leguminosas (por ejemplo, maíz-soja, maíz-alfalfa (*Medicago sativa* L.).
- Maíz-leguminosa-cereal de grano pequeño (p. ej., maíz-trigo (*Triticum aestivum* L.)-soja, maíz-avena (*Avena sativa* L.)-soja, maíz-arroz-lenteja (*Lens culinaris*), etc.
- Maíz- cereal de grano pequeño- cereal de grano pequeño o maíz- cereal de grano pequeño (sistema anual): En las regiones tropicales y subtropicales como partes de India y China, Nepal y otros países, el maíz se rota con otros cereales como el trigo y el arroz en un sistema de cultivo de arroz-trigo-maíz o arroz-barbecho-maíz (Danforth, 2009).

Basado en la disponibilidad de agua

- Producción de maíz de secano (la mayor parte de la zona tropical y subtropical): Donde el cultivo depende totalmente de la precipitación estacional.
- Maíz de regadío: Donde la producción de maíz se complementa con agua de riego. Este sistema es dominante en América y en ciertas áreas de Asia tropical y subtropical, como India, China y Tailandia.

1.5. Clasificación botánica del maíz

Taxonómicamente el maíz está clasificado de la siguiente manera (Ortigoza *et al.*, 2019):

- **Reino:** Plantae
- **División:** Magnoliophyta
- **Clase:** Liliopsida
- **Subclase:** Commelinidae
- **Orden:** Poales
- **Familia:** Gramineas.
- **Género:** Zea
- **Especie:** mays
- **Nombre Científico:** *Zea mays* L.

1.6. Morfología del maíz

El maíz es una planta anual, herbácea, monoica, sus células poseen $2n$ cromosomas; presenta gran desarrollo vegetativo, que puede alcanzar hasta 5 m de altura (lo normal son 2 a 2,5 metros), su tallo es nudoso y macizo y lleva de 15 a 30 hojas alargadas y abrazadoras, con 4 a 10 cm de anchas y 35 a 50 de longitud (Deras, 2010).

Sistema Radicular

De raíces fibrosas se presenta en tres tipos: de anclaje, adventicias y seminales. Generalmente, se extiende en un radio de 1 m aproximadamente a los laterales y 2,20 m en profundidad. Las raíces de las semillas sirven para nutrir a la planta en sus primeras etapas, pero se desarrollan raíces adventicias subterráneas permanentes desde la corona (nudo basal) (Corcuera, 2012).

Al culminar el estadio de panojamiento, a partir de los primeros nudos situados por encima de la superficie del suelo sobresalen verticilos radicales que se anclan en el suelo y conforman el sistema radicular de anclaje (Corcuera, 2012).

Tallo

Puede haber pocas o muchas ramas alrededor del tallo, pero la producción siempre tiene lugar en el tallo principal. Es cilíndrica y leñosa, compuesta de nudos y entrenudos

longitudinales, con un promedio de 14, con hojas por nudo y brote basal de cada entrenudo (Adrián, 2017). En cuanto a la altura, este órgano alcanza una media de 55 cm y una máxima de 4,20 m, y también tiene forma enana (Corcuera, 2012).

Hojas

La mayoría tienen bordes lisos y suelen ser alargados y anchos, las hojas generalmente tienden a tener una vaina foliar muy dividida, son cilíndricas en la parte inferior y su función es cubrir los entrenudos del tallo y envolver la aurícula, pero no los extremos. Su color es generalmente verde, pero existen genotipos con hojas verde-moradas y blanco-verdes que también están presentes en los entrenudos (Adrián, 2017).

Las hojas presentan varias modificaciones: cotiledón, coleóptilo, hojas de follaje, prófilos, chalas y brácteas de las inflorescencias (Corcuera, 2012); y estas a su vez, están constituidas por: vaina, cuello y lámina, esta última es una banda delgada y angosta de hasta 0,1 m de ancho y 1,5 m de largo, que termina en un ápice agudo. La nervadura central se encuentra bastante desarrollada, se muestra prominente en el envés de la hoja y cóncavo en el haz (De la Cruz, 2016).

Flores

Las flores femeninas del maíz producen de 1 a 3 mazorcas en la base de los entrenudos desarrollados en el tallo y con un ovario del cual se desarrolla el grano después de la polinización. Cada ovario posee un largo estilo predispuesto a manera de cabellos, mismos que se asoman a través de las hojas que recubren la mazorca, el polen que resbalan hacia estos pelos, producen la germinación y el crecimiento a través de los estilos hasta alcanzar los ovarios y se genera la fecundación. La flor masculina (panoja) se desarrollan en el tallo principal, estos generan polen únicamente, y el cual es arrastrado por el viento hasta las plantas cercanas (Deras, 2010).

Las masculinas se aglomeran en una panícula terminal y las femeninas se agrupan en varias espigas (mazorcas o panojas) que sobresalen de las axilas foliares a partir del tercio medio del tallo. Las flores macho tienen una dimensión promedio de 7 mm, salen por parejas a lo largo y ancha de ramas finas ubicadas en la parte superior del tallo. Las flores masculinas tienen cada una tres estambres filamentosos y las flores femeninas se agrupan en ramas cubiertas de brácteas. El estilo sobresale de la bráctea, alcanza los 12-20 cm de longitud y

forma numerosos pelos que sobresalen del borde del espádice (Adrián, 2017), (De la Cruz, 2016).

Grano

Los granos, también llamados cariósipide, se distribuyen en cantidades que van desde las 600 hasta las 1000 unidades por mazorca, dispuestos en hileras alcanzando un promedio de 14 hileras. Estas son opacas o cristalinas, según la tonalidad, dentadas, medio dentadas y más amarillentas. El maíz blanco caliente más solicitado en la industria (Adrián, 2017).

Es importante recalcar que la semilla (Figura 1) consta de tres partes bien diferenciadas: la pared, el embrión y el endospermo. Tiene la forma, tamaño y color característicos de la variedad cultivada (De la Cruz, 2016).



Figura 1: Semilla Maíz
Fuente: De la Cruz, 2016

1.7. Etapas de crecimiento del maíz

El maíz pasa por varias etapas de desarrollo diferentes para completar su ciclo de vida, se han utilizado varias escalas de medición del crecimiento, pero la escala más conveniente y comúnmente utilizada es la propuesta por Ritchie *et al.*, (1993), describe el crecimiento del maíz en dos etapas distintas de crecimiento: 'vegetativa' y 'reproductiva'. Dentro de cada fase, las diferentes etapas de crecimiento están etiquetadas a diferentes escalas (Tabla 1).

Tabla 1. Etapas de crecimiento del maíz

Etapas	Días	Características
VE	5	El coleóptilo emerge de la superficie del suelo
V1	9	Es visible el cuello de la primera hoja.
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja.

Etapas	Días	Características
Vn		Es visible el cuello de la hoja número “n” (“n” es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta; “n” generalmente fluctúa entre 16 y 22, pero para la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo).
VT	55	Es completamente visible la última rama de la panoja.
RO	57	Antesis o floración masculina, el polen se comienza a arrojar.
R1	59	Son visibles los estigmas.
R2	71	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede ver el embrión.
R3	80	Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.
R4	90	Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca. El embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano.
R5	102	Etapa dentada. La parte superior de los granos se llena con almidón sólido y, cuando el genotipo es dentado, los granos adquieren la forma dentada. En los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una “línea de leche” cuando se observa el grano desde el costado.
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.

Fuente: Ritchie *et al.*, (1993)

La división numérica del trofozoíto corresponde al número de hojas completamente desplegadas (lígulas visibles). La etapa reproductiva se inicia con la aparición de cicatrices (R1) y finaliza con la maduración fisiológica (R6).

Revelo, (2006) Indica que el ciclo vegetativo del maíz comprende:

Nascencia: es el periodo que transcurre desde la siembra hasta la aparición del coleóptilo, cuya duración aproximada es de 6 a 8 días

Crecimiento: Una vez que nace el maíz, aparecerán hojas nuevas cada tres días si las condiciones son normales. Después de 15-20 días de nascencia, las plantas ya deberían tener 5-6 hojas y deberían tener todas las hojas en las primeras 4-5 semanas.

Floración: Veinticinco a treinta días después de la siembra, la panícula comienza en el interior y en la base del tallo. El desprendimiento de polen comienza de 4 a 6 semanas

después de este punto y dura de 5 a 8 días. Pueden surgir problemas cuando las temperaturas son altas o cuando las plantas experimentan sequía debido a la falta de agua o lluvia.

Fructificación: La formación de frutos comienza cuando el óvulo es fertilizado por el polen. Una vez que se completa la fertilización, el estilo de la mazorca, comúnmente llamado pelo de maíz, se decolora y se vuelve marrón. Tres semanas después de la polinización, la mazorca alcanza su tamaño final, se forma un grano y en su interior emerge un embrión. Los granos están llenos de sustancias leñosas ricas en azúcar que se convierten en almidón al final de la quinta semana.

Maduración y secado: Hacia el final de las 8 semanas después de la polinización, el grano alcanza el máximo de materia seca y puede considerarse fisiológicamente maduro. Así que la humedad suele rondar los 35°. La pérdida de humedad hace que los cultivos se acerquen a la madurez comercial y está influenciada por las condiciones ambientales, la temperatura, la humedad ambiental, etc., más que por las características.

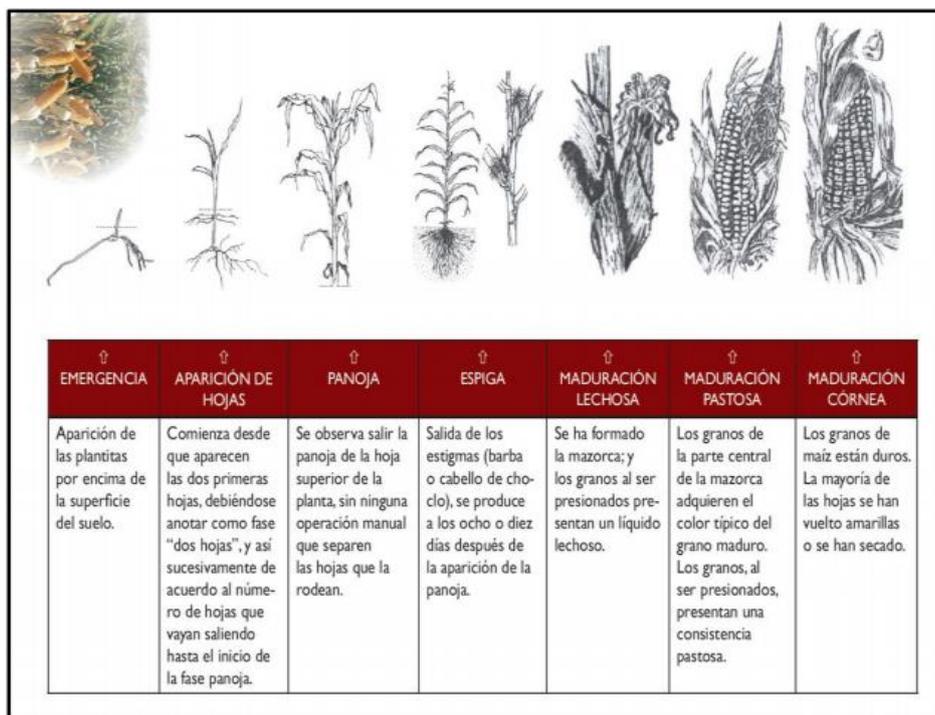


Figura 1: Fases Fenológicas del Maíz

Fuente: SENAMHI, 2016

1.8. Factores que controlan el desarrollo

Las etapas mencionadas pueden presentar una gran variabilidad, principalmente entre genotipos, fechas y lugares de siembra, debido a respuestas a factores ambientales como la temperatura y el fotoperíodo.

Temperatura

La relación entre temperatura y desarrollo nos permitió calcular el tiempo de calor para predecir la fenología de la planta con base en la acumulación de temperatura-día (Ritchie & NeSmith, 1991).

Tiempo térmico (TT) = $\sum (T_x - T_b)$

Donde T_x es la temperatura media diaria del aire, T_b es la temperatura para el periodo considerado. El resultado se expresa en unidades térmicas conocidas como grados días ($^{\circ}\text{Cd}$).

De esta forma, nos hemos independizado de la temperatura diaria, aunque el tiempo real para alcanzar una etapa de desarrollo en particular no es constante y las etapas generalmente se logran más rápido a medida que aumenta la temperatura, la tasa de respuesta del desarrollo (días de duración de la etapa a la inversa) es aproximadamente lineal dentro del rango de temperatura entre la temperatura de referencia (6°C a 10°C según el genotipo, siendo de aproximadamente 8°C para los cultivares para los cultivares que están muy extendidos en nuestro país (Cirilo, 1994)), por debajo del cual la tasa de crecimiento es cero y la temperatura óptima para la tasa de crecimiento máxima ($30\text{-}34^{\circ}\text{C}$). Por encima de la temperatura óptima, el crecimiento disminuye gradualmente hasta que se detiene en una temperatura crítica ($40\text{-}44^{\circ}\text{C}$) (Kiniry & Bonhomme, 1991).

Por lo tanto, la diferenciación vegetativa de la hoja responde de manera lineal y positiva a la temperatura dentro de un rango térmico entre su línea de base y los valores óptimos. Muestra valores de demanda de calor por primordio foliar entre 19 y 21°C . El día 1, para una temperatura basal de unos 8°C con diferencias entre genotipos (Kiniry & Bonhomme, 1991). Este requisito se llama plastocrono.

En la mayoría de los ambientes templados, se requieren $36\text{-}40^{\circ}\text{C}$ (8°C por encima de la temperatura base) el primer día desde la segunda hoja para que aparezcan las puntas de las hojas visibles (Tollenaar *et al.*, 1979; Kiniry & Ritchie, 1981). La diferencia es del 16 al

30% del tiempo de calentamiento requerido por hoja (Kiniry & Bonhomme, 1991). Este requisito se llama filocrono. De ello se deduce que la tasa de diferenciación de los primordios foliares es mucho mayor que la tasa de emergencia o expansión de las hojas.

El período de tiempo desde el cambio en la condición de la punta hasta la emergencia de las mazorcas de maíz está determinado por el número de hojas que se desarrollan y la tasa de emergencia de las hojas. Cuanto mayor sea el número de hojas, más unidades de calor se requieren para completar la fase. Cuanto mayor sea la temperatura con el tiempo, más rápido se expandirán las hojas. Así, el efecto de la temperatura sobre la duración de la fase de inducción de la floración se ejerce por dos procesos independientes, efectos sobre el número final de hojas, efectos sobre la producción de primordios foliares en el ápice y efectos sobre la tasa de emergencia de las hojas. El fotoperíodo tiene poco efecto sobre el desarrollo del maíz y la emergencia de las hojas después de la diferenciación de la panícula (Warrington & Kanemasu, 1983; Manrique & Hodgers, 1991), por lo que la temperatura es el principal factor que regula el desarrollo en esta etapa.

El maíz de ciclo más largo tiene un mayor número total de hojas y por lo tanto, una mayor demanda de calor para completar el tiempo de cambio de estado del ápice. Como resultado, dichos genotipos también tienen mayores requerimientos totales de calor para el desarrollo de las hojas, lo que aumenta la acumulación de grados-día necesarios para lograr la floración.

Otegui y Melón (1997) calcularon la temperatura requerida para la diferenciación de las espiguillas en 7,7 °C. El día 1, que se agrega una nueva espiguilla por fila de espigas. Las diferencias genotípicas durante este período alteran el número de espiguillas diferenciadas, lo que da como resultado espiguillas de diferentes longitudes.

Dependiendo del genotipo, el requerimiento de calor para la floración varía entre unos 600 y 900 °C por día y se acumula por encima de una temperatura de referencia de 8 °C (Kiniry & Bonhomme, 1991). Durante las primeras etapas de llenado de grano (la etapa de división celular activa), el requerimiento de temperatura es de aproximadamente 170 grados día a una temperatura de referencia de 8 °C (Kiniry & Bonhomme, 1991), sin diferencias significativas entre cultivares (Cross, 1975). En segundo lugar, la tasa de acumulación de materia seca en los granos está fuertemente controlada por la temperatura durante la fase lineal del empaque efectivo (Tollenaar & Bruulsema, 1988).

Influencia del fotoperiodo

El maíz es una especie cuantitativa de día corto, lo que significa que cuando la duración del día excede el fotoperíodo crítico (o umbral de fotoperíodo) de generalmente 12,5 h, su período se alarga (Ellis *et al.*, 1992). Sin embargo, en general, esta reacción está enmascarada por los efectos de la temperatura. Este tipo de respuesta evita que el ciclo de cosecha se acorte en exceso por el aumento de las temperaturas asociado al retraso de la fecha de siembra en determinados ambientes. El maíz exhibe una etapa juvenil temprana en la que el tejido meristemático apical diferencia los primordios foliares a un ritmo que no se ve afectado por el fotoperíodo y regulado solo por la temperatura. La duración de esta etapa depende del genotipo.

En la siguiente etapa, llamada inducibilidad, el meristema continúa la diferenciación de la hoja, pero puede volverse sensible a los estímulos fotoperiódicos e iniciar la etapa de diferenciación de las estructuras reproductivas. En condiciones de fotoperíodo corto (altamente inductivo), esta etapa tiene la duración más corta, comenzando de 4 a 8 días antes del inicio de la panícula (Kiniry *et al.*, 1983). El tiempo de inicio de la floración del ápice aumenta con el aumento de la duración del día por encima del fotoperíodo crítico o el umbral del fotoperíodo (Ellis *et al.*, 1992).

Existe una gran variabilidad genotípica tanto en los valores de umbral fotoperiódico como en las sensibilidades de respuesta fotoperiódica (Ellis *et al.*, 1992; Bonhomme *et al.*, 1994). Los cultivares tropicales de maduración tardía son más susceptibles que los cultivares adaptados a ambientes templados (Bonhomme *et al.*, 1991).

Dado que el inicio de la formación de panículas en el meristema apical marca el final de la producción de hojas, el número total de hojas iniciadas es el resultado del tiempo transcurrido antes de la inducción de la flor y la tasa de formación de hojas durante ese tiempo (Bonhomme *et al.*, 1991). Dado que la respuesta de fotolongitud se manifiesta al retrasar el inicio de la floración, los fotoperíodos más largos durante la etapa de inducción producen más yemas foliares en cultivares sensibles, lo que da como resultado hojas que necesitan germinar antes de que aumente la formación de panículas, lo que puede retrasar la floración y aumentar las horas de calor hasta la floración (Warrington & Kanemus, 1983). Sin embargo, la respuesta con respecto al aumento del número de hojas a los fotoperíodos por encima del umbral depende de la temperatura en cultivares sensibles.

Un día largo con bajas temperaturas no necesariamente aumenta el número de hojas. De manera similar, el número de hojas de un genotipo determinado sembrado en el mismo lugar en la misma época del año puede variar de un año a otro dependiendo de la temperatura durante el período de inducción (Andrade *et al.*, 1996).

1.9. Componentes del rendimiento y determinantes del rendimiento

El rendimiento de un cultivo se refiere a la cantidad total de una porción de un cultivo cosechado en un área de tierra determinada con fines económicos. Para el maíz, el rendimiento puede referirse al rendimiento de grano (maíz central), rendimiento de alimento (cosecha de forraje o ensilaje), rendimiento de mazorcas vendibles (maíz dulce), peso de mazorcas (maíz para semilla), etc. Los componentes de desempeño son partes, cada una de las cuales contribuye al desempeño general. Los componentes del rendimiento del maíz son (Danforth, 2009):

Maíz en grano: Rendimiento de grano (Mg ha^{-1}) = Plantas u mazorcas ha^{-1} x granos mazorca $^{-1}$ x peso medio del grano El rendimiento de grano se expresa generalmente sobre una base de agua de 155 g kg^{-1} .

Maíz ensilado: Rendimiento de ensilaje ($\text{Mg materia seca ha}^{-1}$) = Plantas ha^{-1} x peso de planta individual. El maíz para ensilaje generalmente se cosecha cuando la humedad de toda la planta está dentro del rango de 62 a 70%. El rendimiento del ensilaje a menudo se informa sobre una base de agua de 650 g kg^{-1} .

Maíz dulce: El rendimiento se informa comúnmente como el número o peso de panículas vendibles por hectárea. Es el producto del número de plantas por unidad de superficie multiplicado por el número de panículas comercializables por planta. Las mazorcas comercializadas son aquellas con más de 80 granos intactos y una longitud mínima de 12 cm (Ma *et al.*, 2007).

Está claro que la densidad de población de plantas (PDP; número de plantas por unidad de área) es un determinante clave del rendimiento para todos los cultivares de maíz. La densidad de población de plantas afecta en última instancia al rendimiento al alterar todos los componentes del rendimiento. A PDP alto, la competencia entre plantas por asimilados durante la floración provoca el aborto de panículas y nueces (Tollenaar, 1977), lo que reduce el tamaño de las panículas y en última instancia, reduce el número de granos por mazorca y el número de granos individuales. Andrade y otros (1999) PDP propuso que la cantidad de

recursos disponibles para plantas individuales también tiene un impacto significativo en la partición de materia seca (MS) durante el desarrollo vegetativo y reproductivo y la formación de granos. El rendimiento de grano por unidad de superficie aumenta con el PDP hasta que el aumento del rendimiento atribuido a la planta no supera la disminución del rendimiento medio por planta (Tollenaar y Wu, 1999). El PDP hiperóptimo redujo el número de granos por mazorca, el peso medio del grano y la longitud de la mazorca (Bavec y Bavec, 2002). Una combinación de alto PDP y bajo suministro de N a menudo conduce a altas tasas de aborto en los cultivos y una mayor esterilidad de las plantas (Subedi *et al.*, 2006). Por otro lado, un PDP subóptimo da como resultado un cierre tardío del dosel, lo que resulta en una menor intercepción de la radiación solar incidente estacional (Westgate *et al.*, 1997) y más granos por planta, pero el rendimiento de grano por unidad se reduce. rango. (Subedi y Ma, 2009).

1.10. Conclusiones

Comprender cuándo y cómo los humanos domesticaron los cultivos de sus antepasados silvestres podría proporcionar más que una retrospectiva. Aprender sobre la dinámica de la domesticación de cultivos puede proporcionar lecciones importantes para el futuro. Este conocimiento beneficiará a los programas de mejoramiento y proporcionará una comprensión única de las variedades de maíz que se cultivan en todo el mundo.

1.11. Bibliografía

- Adrián J. (2017). Evaluación del efecto de dos dosis de fertilizantes foliares en dos distancias de siembra en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) [Internet]. Universidad de Guayaquil. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/15587>.
- Andrade F.H., Cirilo A.G., Uhart S.A. & Otegui M.E. (1996). Crecimiento del cultivo. En: Ecofisiología del cultivo de maíz. EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Editorial La Barrosa. Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp.
- Andrade, F.H.; Vega, C.; Uhart, S.; Cirilo, A.; Cantarero, M. and Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39, 453-459.
- Bavec, F. and Bavec, M. (2002). Effect of plant population on leaf area index, cob characteristics and grain yield of early maturing maize cultivar (FAO-100-400). *European Journal of Agronomy*, 16, 151-159.

- Bonhomme R., Derieux M. & Edmeades G.O. (1994). Flowering of diverse maize cultivars in relation to temperature and photoperiod in multilocation trails. *Crop Science* 34:156-164.
- Bonhomme R., Derieux M., Kiniry J.R., Edmeades G.O. & Ozier Lafontaine H. (1991). Maize leaf number sensitivity in relation to photoperiod in multilocation field trials. *Agronomy Journal* 83:153-157.
- Christensen, L.A. (2002). Soil, nutrient and water management systems used in US corn production. Agriculture Information Bulletin No. 774, United States Department of Agriculture (USAID), USA.
- Cirilo A.G. (1994). Desarrollo, crecimiento y partición de materia seca en cultivos de maíz sembrados en diferentes fechas. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata. 86 pp.
- Corcuera V. (2012). Desarrollo y evaluación de nuevo germoplasma de maíz (*Zea mays* L.) para uso especial en argentina [Internet]. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=73125>
- Cross H.Z. (1975). Diallel analysis of duration and rate of grain filling of seven inbred lines of corn. *Crop Science* 15:532-535.
- Danforth, A. (2009). Corn Crop Production Growth, Fertilization and Yield. Editor: ISBN 978-1-60741-955-6- Nova Science Publishers, Inc.
- De la Cruz J. (2016). Fraccionamiento de nitrógeno en dos densidades de siembra de maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en la localidad de La Molina [Internet]. Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/unalm/1961>.
- Deras, H. (2010). Guía técnica del cultivo de maíz. Recuperado de <http://passthrough.fw-notify.net/download/329987/http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>.
- Doebley, J., Major M., Goodman, C y Stuber, W.(1984). Isoenzymatic variation in *Zea* (Gramineae). *Systematic Botany*, 9: 203–218.

- Dwyer, L.M.; Stewart, D.W.; Carrigan, B.L.; Ma, B.L.; and Neave, A.P. (1999a). Guidelines for comparisons among different corn maturity rating systems. *Agronomy Journal*, 91, 946-949.
- Ellis R.H., Summerfield, R.J., Edmeades, G.O. & Roberts, E.H. (1992). Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science* 32:1225-1232.
- Eubanks, M. (2001). The mysterious origin of maize. *Economic Botany*, 55: 492–514.
- FAOSTAT (2018) FAOSTAT Data. In: Food Agric. Organ. United Nations, Rome. <http://faostat.fao.org>. Accessed 22 Mar 2018.
- Galinat, W. (1977). The origin of corn. In: *Corn and Corn Improvement*, edited by G. F. Sprague. *Agronomy* 18. American Society of Agronomy. Madison. pp. 1–47.
- Gehman, A.M.; Kononoff, P.J.; Mullins, C.R. and Janicek, B.N. (2008). Evaluation of nitrogen utilization and the effects of monensin in dairy cows fed brown mid rib corn silage. *Journal of Dairy Science*, 91, 288-300.
- Goss, J.A. (1968). Development, physiology and biochemistry of corn and wheat pollen. *Botanical Review*, 34, 333-358.
- Grobman A., Bonavia, D. Dillehay, T., Piperno, D., Iriarte, I y Holst I. (2012). Preceramic maize from Paredones and Huaca Prieta, Peru. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109 (5): 1755–1759.
- Grobman T., Wilfredo, A. (1961). *Races of Maize in Peru*. National Academy of Sciences. National Research Council. Publication 915. Washington, D.C.
- Harlan, J. (1995). *The Living Fields: Our Agricultural Heritage*. Cambridge University Press. Cambridge.
- Hay, R.K.M. and Gilbert, R.A. (2001). Variation in the harvest index of tropical maize: evaluation of recent evidence from Mexico and Malawi. *Annals of Applied Biology*, 138, 103-109.
- Kiniry J.R. & Bonhomme R. (1991). Predicting maize phenology. En: *Predicting crop phenology*. T. Hodges (Ed.). pp. 115-131.

- Kiniry J.R. & Ritchie J.T., (1985). Shade-sensitive interval of kernel number of maize. *Agronomy Journal* 77:711-715.
- Kiniry, J.R. Ritchie J.T., Musser R.L., Flint E.P. & Iwig W.C. (1983). The photoperiod sensitive interval in maize. *Agronomy Journal* 75:687-690.
- Ma, B.L.; Subedi, K.D. and Zhang, T.Q. (2007). Pre-sidedress nitrate test and other crop-based indicators for fresh market and processing sweet corn. *Agronomy Journal*, 99, 174-183.
- Ma, B.L.; Subedi, K.D.; Stewart, D.W. and Dwyer, L.M. (2006b). Dry matter accumulation and silage moisture changes after silking in Leafy and dual-purpose corn hybrids. *Agronomy Journal*, 98, 922-929.
- Mangelsdorf, P (1974). Review of Corn: Its Origin, Evolution and Improvement. *Science*, 185 (4152): 687–688.
- Manrique L.A. & Hodges T. (1991). Development and Growth of Tropical Maize at Two Elevations in Hawaii. *Agronomy Journal* 83:305-310.
- Morris, M. L. (2002). Impacts of International Maize Breeding Research in Developing Countries, 1966-1998. Mexico, D.F.:CIMMYT.
- Ortigoza, J., Carlos, G., López, A., Jorge, T., y Gonzalez, D. (2019). Guía técnica de cultivo de maíz. Recuperado de https://www.jica.go.jp/paraguay/espanol/office/others/c8h0vm0000ad5gke-att/gt_04.pdf
- Ortiz, A .(1994). Some cultural meanings of corn in aboriginal North America. In: *Corn and Culture in the Prehistoric New World*, edited by Sissel Johannesen and Christine A. Hastorf. Westview Press. Boulder. pp. 527–544.
- Otegui M.E. & Melón S. (1997). Kernel set and flower synchrony within the ear of maize. ISowing date effects. *Crop Science* 37:441-447.
- Rajcan, I. and Tollenaar, M. (1999a). Source: sink ratio and leaf senescence in maize. I. Dry matter accumulation and partitioning during kernel filling. *Field Crops Research*, 60, 245-253.

- Rajcan, I. and Tollenaar, M. (1999b). Source: sink ratio and leaf senescence in maize. II. Nitrogen metabolism during kernel filling. *Field Crops Research*, 60, 255-265.
- Revelo, M. (2006). Proyecto de prefactibilidad para la comercialización de maíz (En línea). Disponible en: http://repositorio.ute.edu.ec/bitstream/123456789/6982/1/27776_1.pdf.
- Ritchie J.T. & NeSmith D.S. (1991). Temperature and crop development. En: Modeling plant and soil systems. J. Hanks & J.T. Ritchie (Eds.). *Agronomy Monograph* 31:5-29.
- Ritchie S.W.; Hanway, J.J. and Benon, G.O. (1993). How a maize plant develops. Sp. Rpt. No. 48. Iowa State University of Science and Technology. Co-operative Extension Services. Ames. IA.
- Ritchie, H.; Hanway, R. (1982). Jornada de manejo sustentable del cultivo del maíz. (En línea). Disponible en: <http://www.fps.org.mx/divulgacion/attachments/article/842/Jornada%20de%20manejo%20sustentable%20del%20cultivo%20del%20maiz.pdf>.
- Schooper, J.B.; Lambert, R.J. and Vasilas, B.L. (1987). Pollen viability, pollen shedding, and combining ability for tassel heat tolerance in maize. *Crop Science*, 27, 27-31.
- Servicio Nacional de Meteorología E Hidrología. (2016). Fenología del Maíz. Lima, Perú: [SENAMHI].
- Shaver, D.L. (1983). Genetics and breeding of maize with extra leaves above the ear. Proceedings of the 38th Annual Corn and Sorghum Research Conference, American Seed Trade Association, Washington D.C.
- Subedi, K.D. (2002). Maize and finger millet relay intercropping system in the hills of Nepal: issues for sustainability. Pp. 170-174. In: N. R. Rajbhandary, J.K. Ransom, K. Adhikari and A. F. E. Palmer (eds.) *Sustainable Maize Production Systems for Nepal*. Proceedings of a Maize Symposium held December 3-5, 2001, Kathmandu, Nepal.
- Subedi, K.D. and Ma, B.L. (2009). Assessment of some major yield-limiting factors on maize production in a humid temperate environment. *Field Crops Research*, 110, 21-26.

- Subedi, K.D. and Ma, B.L. (2005a). Nitrogen uptake and partitioning in stay-green and leafy maize hybrids. *Crop Science*, 45, 740-747.
- Subedi, K.D. and Ma, B.L. (2005b). Effect of N-deficiency and timing of N supply on the recovery and distribution of labelled ¹⁵N in contrasting maize hybrids. *Plant and Soil*, 273, 189-202.
- Subedi, K.D.; Ma, B.L. and Smith, D.L. (2006). Response of leafy and non-leafy maize hybrid to plant population densities and fertilizer nitrogen levels. *Crop Science*, 46, 1860-1869.
- Subedi, K.D.; Sthapit, B.R.; Joshi, K.D.; Floyd, C.N.; Pandey, R.R. and Rana, R.B. (1993). Indigenous upland rice culture in the western hills of Nepal: Contribution of farmers' knowledge in rainfed farming. *Proceedings of the Third International Symposium on Sustainable Agriculture, CEICAPAR, Mexico, December 1-4, 1993.*
- Tollenaar M. & Bruulsema T.W. (1988). Efficiency of maize dry matter production during periods of complete leaf-area expansion. *Agronomy Journal* 80:580-585
- Tollenaar M., Daynard T.B., & Hunter R.B (1979). Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date in maize. *Crop Science* 19:363-366.
- Tollenaar, M. (1977). Sink source relationships during reproductive development in maize: A review. *Maydica*, 22, 49-75.
- Tollenaar, M. and Wu, J. (1999). Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Science*, 39, 1597-1604.
- Warrington I.J. & Kanemasu E.T. (1983). Corn growth response to temperature and photoperiod. II Leaf initiation and leaf-appearance rates. *Agronomy Journal* 75: 755-761.
- Westgate, M.E.; Forcella, F.; Reicosky, D.C. and Somsen, J. (1997). Rapid canopy closure for maize production in the northern US Corn Belt: Radiation use efficiency and grain yield. *Field Crops Research*, 49, 249-258.
- Wilkes, H. (1989). Maize: Domestication, racial evolution, and spread. In: *Foraging and Farming: The Evolution of Plant Exploitation*, edited by D. R. Harris and G. C. Hillman. Unwin Hyman. London. pp. 441-455.

Capítulo II. Situación mundial, regional y nacional en la producción de maíz.

Reina Concepción Medina Litardo

Universidad de Guayaquil

<https://orcid.org/0000-0002-3305-3112>

Emma Lombeida García

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-2798-9045>

Iris Betzaida Pérez Almeida

Universidad ECOTEC

<http://orcid.org/0000-0001-5929-892X>

Fernando Javier Cobos Mora

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

2.1. Introducción.

El maíz es un cultivo de importancia económica a nivel mundial, debido a su utilidad como alimento para humanos y ganado; este cultivo es fuente de un gran número de productos industriales (FIRA, 2016). Es uno de los cereales más importantes para la alimentación de los ecuatorianos ya que su producción provee materia prima para la agroindustria y la alimentación humana. Además, es un cultivo de suma importancia en Ecuador debido al significativo rol que cumple en seguridad alimentaria de la población (Zambrano et al., 2019). Este cultivo representa el cuatro por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola y genera alrededor de 140.000 puestos de trabajo; en los últimos cinco años se generaron 49 millones de dólares de ingresos por divisas, siendo Colombia el principal destino de la gramínea (BCE, 2018). La producción de maíz en Ecuador en el año 2021 obtuvo buenos resultados, con 1,6 millones Tm en 373.587 ha (ESPAC, 2021).

El maíz es un cereal de consumo directo. En la Sierra Ecuatoriana lo aprovechan en grano tierno (choclo) o duro; se presenta en diferentes tipos, colores y texturas, pero su rendimiento apenas llega a 1,63 ton ha⁻¹ en grano seco. En cambio, en la Costa se cultiva el maíz amarillo en grano duro que se emplea en la industria de balanceados. Cabe mencionar que en esta región y en la Amazonía la superficie de siembra de maíz se ha incrementado en los últimos años, generando su cosecha una reducción de las importaciones de este cereal, básico para el alimento en el sector avícola cubriendo su demanda en un 90 %.

En Ecuador, tienen un rol importante las investigaciones relacionadas con el mejoramiento genético, la nutrición vegetal, la fitopatología y la entomología; mientras que es incipiente el uso de la biotecnología y sus aplicaciones para incrementar la productividad del cultivo. Los avances en el mejoramiento genético han sido uno de los factores más importantes para mejorar la productividad del cultivo en las regiones de la Costa y Sierra (Caviedes et al., 2022).

2.2. Situación mundial, regional y nacional en la producción de maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos básicos más importantes y productivos, y se emplea como alimento, piensos para ganado y biocombustible en todo el mundo. Se puede procesar en una variedad de alimentos y productos industriales, incluidos almidón, edulcorantes, aceite, bebidas, pegamento, alcohol industrial y etanol combustible (Ranum et al., 2014).

El maíz se cultiva en todo el mundo; ocupa el segundo lugar en producción agrícola a escala mundial, después de la caña de azúcar, seguido por trigo y arroz. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estima que, en 2020, la producción mundial total de maíz fue de 11.662.352.997 toneladas, cubriendo un área de 201.983.645 ha, con Estados Unidos, China, Brasil, Argentina y Ucrania cosechando aproximadamente el 94 % de la producción total mundial de maíz. En el continente americano cubre una superficie de 73.507.717 ha con una producción de 582.094.270 ton (FAOSTAT, 2022).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia en el Ecuador, tanto por ser uno de los componentes básicos en la dieta de la población como por la gran cantidad de terreno destinado a su producción. Según la encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC) (INEC, 2021), en 2020 se sembraron unas 927.537 ha con cultivos transitorios, de los cuales el 46% fue sembrado con maíz, con una superficie de 430.606 ha. De esta superficie, el 85% corresponde a la superficie sembrada de maíz duro en seco y en choclo con 364.674 ha; y apenas el 15% fue destinado para la superficie sembrada de maíz suave en choclo y seco con 65.932 ha.

El maíz duro seco ocupa un 32,91% de la superficie sembrada total, mientras que el maíz suave seco alcanza un 6,11% de la misma. La producción de maíz duro se siembra en ciertas

zonas hasta dos ciclos en el año; en la provincia de Los Ríos se concentra el 49,26% de la producción nacional (INEC, 2021).

Los rendimientos por hectárea durante el 2021 fueron mayores, obteniendo $6,0 \text{ t ha}^{-1}$, cifra superior a las $5,6 \text{ t. ha}^{-1}$, alcanzadas en similar ciclo del año 2020. En consecuencia, la producción se incrementó en 18,9%, pues se cosecharon 319,8 (miles) toneladas, volumen superior a las 248.000 ton obtenidas en 2020 (BCE, 2022). Para el año 2018 el rendimiento nacional promedio del cultivo de maíz fue de $5,81 \text{ t. ha}^{-1}$, la provincia que obtuvo un mejor rendimiento fue Loja con $7,10 \text{ t. ha}^{-1}$ y la menor productividad se dio en Guayas con $4,37 \text{ t. ha}^{-1}$ (MAG, 2018). Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería del Ecuador, durante el 2020 se sembraron 74018 ha de maíz en la Sierra, con un rendimiento promedio de $3,68 \text{ ton.ha}^{-1}$ de choclo y $1,63 \text{ ton.ha}^{-1}$ de grano seco (SIPA, 2021).

El cultivo de maíz en la Sierra del Ecuador es de fundamental importancia por el rol que cumple el grano en la seguridad alimentaria de la población. Según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), durante el 2020 se sembraron 74.018 ha de este cereal, que representa casi el doble de la superficie sembrada con otros cultivos de importancia socioeconómica como la papa, cebada, fréjol, trigo, quinua, entre otros (BCE, 2022).

Aproximadamente el 60% de los productores agropecuarios del país siembra maíz en 404 873 Unidades Productivas Agropecuarias (MAG, 2018). Entre los principales cultivos transitorios con mayor producción en el Ecuador se encuentran, el maíz duro seco (1.436 tm), el arroz (1.067 tm) y la papa (377 tm) (INEC, 2021).

2.3. Importancia del cultivo

La forma en que se procesa y consume el maíz varía mucho de un país a otro, siendo la harina y la sémola de maíz dos de los productos más populares. En Ecuador el maíz es parte constitutiva e imprescindible de la identidad de la población, con consumo per cápita de maíz suave en Ecuador de alrededor de 14,5 kg al año (Zambrano et al., 2021).

El maíz, a diferencia de otros cereales, se puede cultivar en diferentes climas, tanto cálidos como templados, en regiones de poca y mucha humedad; el manejo se realiza en situaciones de bajos insumos y tecnificadas; y se emplean en diferentes contextos de uso, como autoconsumo, comercio o industrial. Desde el punto de vista alimentario, político, económico y social, el maíz es un cultivo importante, forma de vida y parte integral de la

identidad cultural. Se entiende que el maíz debe su diversificación y distribución prácticamente a los procesos socioculturales y de manejo.

La importancia del maíz en el mundo no solo se limita al volumen de producción y al papel que desempeña en la alimentación humana y animal, al ser la materia prima para la fabricación de harinas precocidas, aceites, hojuelas para desayunos y de alimentos balanceados para la alimentación animal, sino también por ser componente importante en la confección de una gran variedad de productos alimenticios e industriales, que van desde la fabricación de edulcorantes, golosinas, bebidas refrescantes y atoles, bebidas alcohólicas, hasta la producción de etanol como combustible de vehículos y componentes importantes de las industrias automovilística, farmacéutica, cosmetológica, diseño de ropas y calzados, fuente de furfural para la manufactura de fibras de nylon y fenol- formaldehidos plásticos, fabricación de lubricantes del petróleo y purificante de butadine en la producción de caucho sintético, ingrediente en la producción de fertilizantes orgánicos de algas marinas, entre otros (Pérez y García, 2020; Ranum, et al., 2014). Además, el hecho de tener el más alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día hace que se constituya en un recurso para la seguridad alimentaria de comunidades pobres en regiones tropicales y subtropicales.

La producción de maíces criollos es sobre todo para autoconsumo a cargo de pequeños productores que en su mayoría utilizan variedades nativas. Éstas, además de adaptadas a las condiciones edafoclimáticas locales, son más estables, de bajos requerimientos agrícolas y tienen la preferencia de los campesinos para la elaboración de preparaciones culinarias tradicionales como diversas sopas, tortillas, sal prieta, etc.

Existe una clasificación del maíz en función del tamaño y la composición del endospermo, lo que da como resultado una definición artificial por tipo de grano de la siguiente manera: maíz dentado, duro, ceroso, harinoso, dulce, pop, indio y en vaina. Se cultivan diferentes tipos de maíz en todo el mundo, con una diferencia importante que es el color. Los granos de maíz pueden ser de diferentes colores que van desde el blanco al amarillo, al rojo y al negro. Otra diferencia o criterio de clasificación es el dulzor o cantidad de azúcar. La cantidad de azúcar residual depende de la variedad de maíz y de cuándo se cosecha del campo. El maíz dulce se almacena mal y debe comerse fresco, enlatado o congelado antes de que los granos envejecan y se vuelvan pequeños, duros y feculentos. Las variedades dulces no se pueden fortificar.

El maíz contiene abundante diversidad fenotípica y genotípica y por lo tanto es capaz de adaptarse a nuevos entornos, incluyendo la gran migración de zonas tropicales a regiones templadas (Yang *et al.*, 2019). Bajo condiciones climáticas adecuadas o mediante el aporte del riego, el maíz es el más productivo de los cereales y la rentabilidad aumenta cuando se utilizan cultivares mejorados en condiciones favorables y manejo adecuado.

2.4. Variedades de maíz

Entre los materiales liberados por el INIAP para la producción de maíz en el Litoral ecuatoriano, están el híbrido simple INIAP H-603 desarrollado para expresar su potencial de rendimiento bajo condiciones de riego, lluvia o humedad remanente, y la variedad sintética de libre polinización de maíz blanco INIAP-543 QPM para la producción de choclo (Zambrano, 2021); maíz forrajero INIAP-180 (Velásquez y Araujo, 2021)

Entre las principales variedades de maíz criollo o nativas que se cultivan en la Sierra del Ecuador se tienen: chazo, blanco de leche, cuzco ecuatoriano, canguil ecuatoriano, racimo de uva, chillos, huandango, morochón, patillo, tusilla, chaucho, chulpi, entre otras (Zambrano et al., 2021). Muchas de estas razas todavía se encuentran en varias provincias de la Sierra, por lo que reciben el nombre de razas cosmopolitas. Como variedades mejoradas se encuentran el INIAP-122 “Chaucho mejorado”, INIAP-124 “Mishca mejorado”, INIAP-102 “Blanco blandito mejorado”, INIAP-111 “Guagal mejorado”, INIAP-153 “Zhima mejorado”, INIAP-180, INIAP-182, INIAP-103 “Mishqui sara” e INIAP-199 “Racimo de uva”, otras (Zambrano et al., 2021). No existen híbridos nacionales de maíz para la Sierra, aunque existen empresas transnacionales de semillas en el país.

2.5. Mejoramiento genético de híbridos de maíz en el litoral ecuatoriano.

Los altos rendimientos generados por la heterosis en la generación de los maíces híbridos ha sido una de las más importantes innovaciones en el ámbito del mejoramiento genético de plantas. Las distintas combinaciones híbridas pueden ser adaptadas para diversos ambientes tropicales en los que se cultiva maíz. Actualmente en la costa se comercializan varios híbridos de maíz de grano amarillo duro introducidos por las transnacionales. En la tabla 1, se observa que los mejores rendimientos promedio en las seis provincias se obtuvieron con los híbridos “Emblema 777”, “Dekalb 7088” y “Triunfo” con 4,57, 4,38, y 4,33 t.ha⁻¹, respectivamente (MAGAP, 2020).

Tabla 1. Rendimientos de híbridos de maíz amarillo duro comercializados por las empresas privadas en seis provincias de la Costa del Ecuador. Época lluviosa, 2020.

Provincias	Híbrido	Rendimiento (t ha ⁻¹)
El Oro	Dekalb 7088	4,55
	Triunfo	5,21
	Trueno 4,08	4,08
Guayas	Emblema 777	4,44
	Advanta 9313	4,01
	Dekalb 7088	3,80
Loja	Dekalb 7088	4,80
	Triunfo	4,93
Los Ríos	Emblema 777	4,78
	Advanta 9313	4,64
	Somma	3,95
Manabí	Emblema 777	4,50
	Advanta 9313	3,75
	Triunfo	2,86
	Trueno	3,86
Santa Elena	Advanta 9313	3,99
	Trueno	3,64
	Das3383	2,99

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, (2020).

2.6. Sectores de producción agrícola en Ecuador, su dinámica

Zonificación Agroecológica

Según el MAGAP (2014), menciona la zonificación agroecológica económica del cultivo de maíz en Ecuador son:

Potencialidad Alta: La zonificación agroecológica económica, presenta que las zonas potencialmente aptas para la producción y comercialización del cultivo de maíz duro se encuentran concentradas en las provincias de: Guayas, en los cantones Urbina Jado, Colimes, Balzar, Naranjal, El Empalme y Milagro. En la provincia de Los Ríos, principalmente en los cantones: Ventanas, Mocache, Vinces, Babahoyo, Palenque. En Manabí, principalmente dentro de los cantones: Paján, Chone, 24 de Mayo, Santa Ana, Flavio Alfaro; en la provincia de Santa Elena en el cantón del mismo nombre; en los cantones de Arenillas, El Guabo, Machala y Santa Rosa en la provincia de El Oro y en la Provincia de Loja, en los cantones Paltas, Zapotillo, Gonzanamá y Macará.

Potencialidad Media: Las zonas de potencial medio para la producción y comercialización del cultivo de maíz duro se encuentran en las provincias de: Los Ríos, en los cantones Babahoyo, Ventanas, Quinsaloma, Mocache, Quevedo. En Guayas dentro de los cantones El Empalme, El Triunfo, Balzar, Naranjal. En la provincia de Manabí, principalmente en los cantones: Chone, Pedernales, Paján, Flavio Alfaro, 24 de Mayo. En Esmeraldas, dentro de los cantones: Quinindé, Muisne, Río Verde, Esmeraldas y Atacames.

Potencialidad Baja: Las zonas de bajo potencial para la producción y comercialización del cultivo de maíz duro se encuentran en las provincias de: Manabí, dentro de los cantones El Carmen, Flavio Alfaro, Chone, Pedernales. En la provincia de Esmeraldas, cantones: Quinindé, Esmeraldas, Río Verde. En los Ríos dentro de los cantones: Buena Fe, Palenque, Valencia y Babahoyo. En la provincia de Guayas, principalmente en los cantones: Balzar, El Empalme, Naranjito, Cnel. Marcelino Maridueña y Gral. Antonio Elizalde.

Sin Potencialidad: Corresponde a las unidades donde existen limitaciones biofísicas y económicas muy severas para el establecimiento del cultivo.

La producción nacional de maíz desde el punto de vista socioeconómico sirve, fundamentalmente, como materia prima para la industria de alimentos balanceados. Con las Políticas Agropecuarias busca alcanzar el autoabastecimiento sostenible y competitivo de maíz duro para elaborar balanceados y alimentos de proteína animal (MAGAP-CGSIN, 2016).

Las zonas óptimas para el cultivo de maíz en la cuenca baja del río Guayas, representan 103 992 ha (15 % del total de la superficie de los catorce cantones) (Figura 1). Los suelos

dominantes de estas zonas corresponden a los órdenes Mollisoles, Inceptisoles y Entisoles, los cuales se encuentran en unidades geomorfológicas como dique o banco aluvial, nivel ligeramente ondulado, nivel ondulado con presencia de agua, relieve colinado bajo, relieve ondulado colinado muy bajo, superficie de cono de esparcimiento, superficie disectada y superficie poco disectada, con pendientes que van desde 0 a 25 % (Moreno *et al.*, 2018)

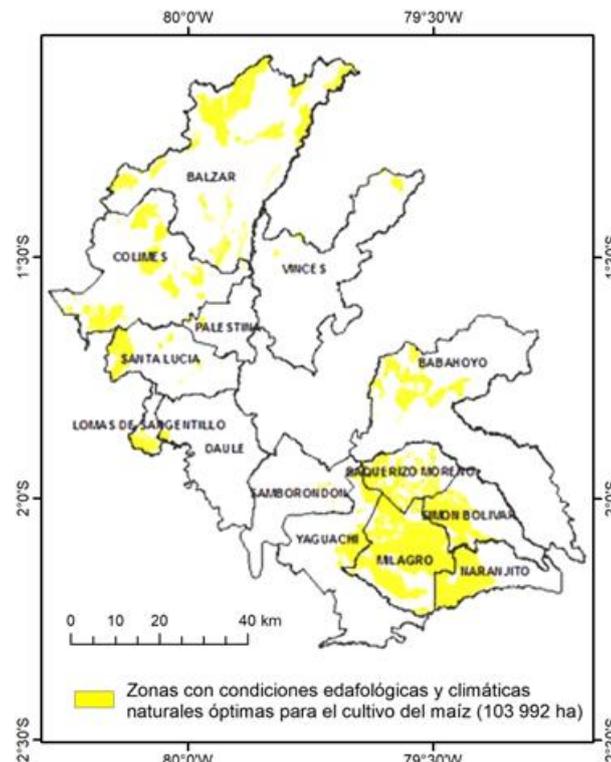


Figura 1. Zonificación del cultivo de maíz

Fuente: (Moreno *et al.*, 2018)

El cultivo de maíz ha venido constituyendo parte de la producción agrícola del país. En la sierra del Ecuador el maíz es un cultivo fundamental, debido a la superficie sembrada y al papel que cumple en la seguridad y soberanía alimentaria, al ser un componente básico en la dieta de la población rural. El maíz necesita bastante luz solar y en aquellos climas húmedos su rendimiento es más bajo, se adapta muy bien a todo tipo de suelo, requiere suelos profundos, ricos en materia orgánica, con buena circulación del drenaje para no producir encharques que ocasionen asfixia radicular (Tabla 1). Los requerimientos hídricos van variando en el desarrollo del cultivo y cuando las plantas comienzan a nacer se requiere menos cantidad de agua, pero sí mantener una humedad constante. En la fase del crecimiento vegetativo es cuando más agua requiere el cultivo (INIAP, 2014).

Tabla 1. Condiciones agroecológicas del cultivo de maíz

Cultivo	Textura	N	P	K	PH	P	Temp	Pendiente	Altitud
			Kg ha ⁻¹		Ppm		°C	%	msnm
Maíz	Franco	150 a	200 a	150 a	5.5 a	600 -	25 a	20	2200-
		200	250	200	7.5	1400	30		3000

Fuente: (INIAP 2014)

2.7. Época de siembra

Como se mencionó anteriormente, en ciertas zonas el maíz duro se cultiva hasta dos ciclos en el año. Durante la época lluviosa, el periodo de siembra parte del 15 de enero al 15 de febrero; después de las dos o tres primeras lluvias; una vez establecido el invierno, se localiza en terreno húmedo no encharcado para evitar pérdida de la semilla. Durante la época seca, para aprovechar la humedad remanente de las lluvias, el mejor rango de siembra se ubica entre el 15 de mayo al 15 de junio. Hay que tomar en cuenta que la falta de humedad en el suelo y otros factores, ocasionan problemas de germinación de la semilla y de plagas y enfermedades dando como resultado la reducción en el rendimiento (INIAP, 2014).

2.8. Sistemas de producción

A nivel nacional la producción de maíz se fracciona en aquellas que se generan de manera tecnificada por parte de los grandes productores (agricultura convencional) y de forma manual, conformada por los pequeños productores (agricultura tradicional), los cuales han alcanzado un rendimiento promedio de 7,1 y 4,8 t ha⁻¹ respectivamente (Monteros & Salvador, 2014). La desventaja por parte de los pequeños productores es que no disponen en su gran mayoría de la información necesaria, que les proporcione características representativas del cultivo, así como adaptación a la zona, niveles de producción, resistencia a plagas y enfermedades, exigencias agroclimáticas, e incluso requerimientos nutricionales, considerando la calidad de los suelos de la zona, que son particularidades esenciales al momento de elegir el material genético que va a implantar en sus predios en busca de alcanzar una producción elite, y sencillamente se guían por la semilla que se encuentra en la casa comercial de su confianza (Guamán *et al.*, 2020).

2.9. Condiciones agroecológicas del maíz

Suelos

Los suelos más aptos para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención para el agua. El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5,5 y 7,8. Fuera de estos límites suele aumentar o disminuir la disponibilidad de ciertos elementos y se produce toxicidad o carencia. Cuando el pH es inferior a 5,5 a menudo hay problemas de toxicidad por aluminio y manganeso, además de carencia de fósforo y magnesio; con un pH superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos), tiende a presentarse carencia de hierro, manganeso y zinc. Los síntomas en el campo, de un pH inadecuado, en general se asemejan a los problemas de micro nutrientes (Tapia, 2015).

El manejo convencional del suelo que realiza los productores de maíz de la Sierra ecuatoriana es remueve excesivamente el suelo y promoviendo la degradación de la textura, estructura y oxidar la MO. Diversas son las razones por los productores para mover el suelo, entre otras, control de malezas, aireación del suelo, mejor condición para la germinación de las semillas, se puede mencionar que los efectos a largo plazo del constante movimiento del suelo causan un incrementó la población de malezas, destruyen la agregación del suelo e impiden la circulación de aire, agua y nutrientes y reducen drásticamente el contenido de MO. Causando la reducción en cuanto a la fertilidad del suelo y promueven la erosión (Boada & Espinosa, 2016).

Luz y fotoperiodo

El maíz requiere un mínimo de 2,2 horas de luz (heliofanía) diariamente. El fotoperiodo también puede afectar el tiempo requerido por la floración. El maíz es clasificado como una planta cuantitativa de día corto. Después de un período juvenil insensitivo al fotoperíodo, la floración es demorada por fotoperiodos largos de más de 12,5 horas. Hay variabilidad genética para la duración crítica del fotoperíodo por debajo de la cual la fecha de floración no es afectada. La mayoría de los cultivares tropicales son sensibles al fotoperíodo pero la extensión de esta sensibilidad variará de uno a 12 días de atraso en la antesis por cada hora de extensión de la duración del día. Los cultivares para las zonas templadas tienden a ser más tempranos y también menos sensibles al fotoperíodo (Lafitte, 2001).

Temperatura

Los diferentes genotipos de maíz adaptados a las condiciones climáticas tropicales y subtropicales principalmente requieren temperaturas que oscilen entre 25 y 30 °C para su normal desarrollo, así como una abundante exposición a los rayos solares y climas que se ajusten a sus necesidades, siendo aquellos climas húmedos perjudiciales para los parámetros en rendimiento. Para que la tasa de emergencia sea la óptima, se requieren temperaturas que oscilen entre 15 y 20°C. Como contrapunto, si las temperaturas llegan a registrar mínimos de hasta 8° C y máximos que superen los 30°C pueden generar incidencias en la absorción de recursos hídricos y nutricionales en el suelo. Para la fructificación las temperaturas idóneas deben rondar los 20 a 32 °C (Sandal, 2014)

La temperatura óptima para el desarrollo de maíz está alrededor de 21 °C. La diversidad de maíz en las zonas altas es sensible al frío y sufre daños a temperaturas de 0° y 10 °C si está expuesto a la luz normal, y a temperaturas entre 10 y 15 °C cuando está expuesto a la luz intensa, dependiendo de los cultivares estudiados. Los efectos de las bajas temperaturas se manifiestan tanto sobre las funciones enzimáticas como sobre las propiedades de las membranas y se ponen en evidencia por la reducción de la fotosíntesis, del crecimiento, de la extensión de las hojas y por la absorción de agua y nutrimentos. Las temperaturas entre 0° y 10° pueden resultar en un desarrollo radical anormal y en la pérdida de turgencia (Tapia, 2015).

Agua

El agua es el factor más limitante en la producción de maíz en las zonas tropicales. Cuando hay estrés hídrico durante las primeras etapas (15 a 30 días) de establecido del cultivo puede ocasionar pérdidas de plantas jóvenes, reduciendo así la densidad poblacional o estancar su crecimiento. Sin embargo, el cultivo puede recuperarse sin afectar seriamente el rendimiento. Cerca de la floración (desde unas dos semanas antes de la emisión de estigmas, hasta dos semanas después de ésta) el maíz es muy sensible al estrés hídrico, y el rendimiento de grano puede ser seriamente afectado si se produce sequía durante este período. En general, el maíz necesita por lo menos de 500 a 700 mm de precipitación bien distribuida durante el ciclo del cultivo. El maíz es muy sensible al encharcamiento; es decir, a los suelos saturados y sobresaturados. Desde la siembra, hasta aproximadamente los 15-20 días, el aniego por más de 24 horas puede dañar el cultivo (especialmente si las temperaturas son

altas) porque el meristemo está debajo de la superficie del suelo en esos momentos (Tapia, 2015).

Altitud

De todos los ambientes de importancia para el cultivo de maíz, los más cálidos, entre la línea ecuatorial y los 30° de latitud sur y los 30° de latitud norte son denominados tropicales, mientras que los climas más fríos, más allá de los 34° de latitud sur y norte son llamados zonas templada; los maíces en zonas subtropicales crecen entre las latitudes de 30 ° y 34° de ambos hemisferios. En estas zonas caracterizadas por ambientes que van desde altitudes de 1600 a 4000 msnm, el maíz se siembra en suelos muy variados; necesita al menos 500 mm de lluvia bien distribuida a lo largo de todo el ciclo de cultivo; en la práctica el cultivo se realiza, por lo general, en áreas que reciben de 750 a 1750 mm anuales (Tapia, 2015) (Tabla 2).

Tabla 2. Requerimientos agroecológicos para el cultivo de Maíz duro (*Zea mays* L.) el Ecuador continental.

Factor	Variable	Aptitud Agroecológica				
		Óptima apta	Moderada	Marginal	No apta	
Suelo	Pendiente	0 a 25%	25 a 50%	50-70%	> 70%	
	Franco arcilloso (< 35% de arcilla), limoso, Franco arcillo limoso	Franco arcilloso (< 35% de arcilla), Franco arcillo limoso, Franco arcillo limoso	Franco arenoso, limoso, arcilloso (> a 35% de arcilla), Arcilloso, arenoso	limoso, arcillo Franco (fino a Franco Franco arcilloso (> a 35% de arcilla), Arcillo	Arenoso franco	Arenosa (fina, media, gruesa), Arcilloso (> 60% arcilla)
	Profundidad	Profundo	Moderadamente profundo	Poco profundo	Superficial	
	Pedregosidad	Sin	Pocas	Frecuentes	Abundantes, Pedregoso a rocoso	
	Drenaje	Bueno	Moderado	(-)*	Mal drenado, Excesivo	
	Nivel freático	Profundo	Medianamente profundo	Poco profundo	Superficial	
	pH	Ligeramente ácido, Neutro	Acido, Moderadamente Alcalino	Muy ácido	Alcalino	

Factor	Variable	Aptitud Agroecológica			
		Óptima apta	Moderada	Marginal	No apta
	Toxicidad	Sin o nula	Ligera	Media	Alta
	Materia Orgánica	Muy alto, Alto/Medio	Bajo	Muy bajo	(-)*
	Salinidad	Sin, Ligera	Media	Alta	Muy Alta
	Fertilidad	Alta	Mediana	Baja, Muy baja	(-)*
Clima	Precipitación (mm/año)	500 - 2000	2000-2500	2500-3000	0-500, >3000
	Temperatura (°C)	19-26	17-19	15-17	< 15
	Altitud (m.s.n.m.)	0 – 1600	1700-2000	2000-2200	>2200

Fuente: MAG, 2014.

2.10. Manejo agronómico

Semillas

El maíz es considerado una planta alógama, su polinización es anemófila (viento) y siempre se cruzará con otros maíces, desperdiciando así su pureza genética y proteica, por lo tanto, debe proveerse de semilla certificada para cada siembra. En caso de originar su propia semilla, tendrá que separarse el lote de multiplicación por lo menos 500 m de otros cultivos de maíz, o también sembrar adelantado para evitar cruzamientos, por ello es muy importante conocer los días que transcurren desde la siembra hasta la floración masculina (cuando el 50 por ciento de las plantas liberen el polen) y la floración femenina (cuando el 50 % de las plantas presentan estigmas (Iglesias, 2018).

Fertilización

La fertilización como componente importante para el desarrollo del cultivo y factor de enorme incidencia sobre los parámetros productivos del cultivo de maíz, es el encargado de suministrar macronutrientes como el N, P, K, los cuales se aportan tomando en cuenta las necesidades del cultivo y los nutrientes disponibles en el suelo, esto para aplicar las cantidades específicas de elementos requeridos (Lozano, 2017).

El nitrógeno es el nutriente más importante para alcanzar altos rendimientos del cultivo de maíz. Los agricultores maiceros reconocen que son necesarias, las dosis adecuadas de fertilizante en la planta para obtener un mejor rendimiento, sin embargo, el dilema está en reconocer qué cantidades aplicar para lograr estas concentraciones ya que el fertilizante no son aprovechados por la planta produciendo perjuicios económicos y daño ambiental (Álvarez *et al*, 2017).

Adopción de semillas híbridas

La estrategia de la adopción de semillas híbridas subvencionada de parte de los productores se obtuvieron mejores resultados que los que adoptaron por cuenta propia. Por tanto, es importante la diferencia en los efectos entre los dos tipos de adopción. Los resultados expuestos en esta investigación confirman la importancia de los activos complementarios y la capacitación para garantizar el uso eficiente de las tecnologías. La semilla híbrida de maíz presenta mayores productividades cuando se la utiliza junto al fertilizante y al pesticida; no obstante, es preciso el aprendizaje sobre el buen uso de las tecnologías. En consecuencia, los procesos de capacitación, que garanticen la calidad de la información sobre la tecnología, son necesarios para conseguir mejores experiencias en el uso de las nuevas tecnologías (Sánchez, 2020).

2.11. Preparación de suelos y métodos de siembra

Preparación del suelo

La preparación del suelo depende de la topografía, estructura, textura y compactación del suelo. Una adecuada preparación del suelo brindará al cultivo un buen soporte, las raíces pueden profundizar más. Entre más densas, abundantes y profundas sean las raíces es mucho mejor, debido a que explorarán más superficie del suelo y a mayor profundidad.

El método de preparación de suelo convencional se debe realizar con tractor o con yunta, una labor de arado, una de rastra y la surcada. Si el suelo es plano, o con pendientes moderadas (menor a 25%), o se encuentra compactado, se recomienda preparar el suelo con dos meses de anticipación, esto permitirá que el terreno quede suelto y sea capaz de captar agua sin que se produzcan encharcamientos. Además, ayudará a la descomposición de residuos de la cosecha, el control de las malezas e insectos (Zambrano *et al.*, 2021)

Métodos de siembra

La siembra puede efectuarse en dos métodos o formas:

Manual. Se efectúa especialmente en terrenos con pendientes mayores al 20%, utilizando para ello el chuzo o espeque para hacer un hueco en el suelo y depositar la semilla. El distanciamiento entre surco oscila entre 0,80 a 0,90 cm y; entre posturas, 0,40 a 0,50 m, depositando 2 semillas en cada una de ellas, para obtener una densidad de 50,000 plantas por hectárea. La población óptima para una producción satisfactoria es 65 000 plantas ha⁻¹ que se obtiene con un distanciamiento entre surco de 0.8 m a 0.40 cm entre postura y dos plantas por postura (Deras, s.f).

Mecanizada. Este método se utiliza en terrenos de topografía plana a semiplana, donde tanto la preparación del suelo como la siembra pueden ser mecanizadas. Se puede también realizar la preparación de suelo (arado, rastra) con maquinaria; luego, surcar y sembrar en forma manual, dejando un distanciamiento entre surco de 0,80 a 0,90 cm, y 0,40 a 0,50 cm entre postura, depositando 2 semillas en cada una. Cuando las áreas son más grandes, la siembra se efectúa con maquinaria, con un distanciamiento entre surco igual que el anterior, la sembradora deposita de 10 a 12 semillas por metro lineal, efectuando posteriormente un raleo para dejar un distanciamiento entre plantas de 0,20 a 0,25 cm. En ambos sistemas, la densidad puede variar entre 50,000 a 60,000 plantas por hectárea (Deras, s.f & Basantes, 2015). Cuando se emplea máquina sembradora en grandes extensiones se debe utilizar semilla certificada de 40 a 50 kg ha⁻¹ (Basantes, 2015).

Labranza convencional

Los sistemas de labranza ejercen efectos diferenciales en el rendimiento de los cultivos, en las características físicas, químicas e hidráulicas de los suelos. Con el sistema de labranza convencional, el uso del arado y rastra modifica la estructura de la capa superficial del suelo, la continuidad del espacio poroso y reduce el contenido de materia orgánica. Los residuos de cosecha se mezclan y se exponen a los ciclos acelerados de aireación, humedecimiento, secado y enfriamiento, que sumados favorecen la descomposición de la materia orgánica, guardando estrecha relación con la porosidad y humedad; componentes que influyen directamente en la recuperación de la estructura y estabilidad cuando los suelos se exponen a diferentes tipos de manejo (Báez y Aguirre, 2011).

Labranza reducida o mínima

Es la mínima manipulación realizada al suelo para la siembra de un cultivo, utilizando máquinas para siembra directa (sembradoras-fertilizadoras). Otra opción es la apertura de pequeños surcos de siembra con cincel, arado de madera o azadón (INIAP, 2004). Además la labranza mínima se trata de una preparación del terreno en la que no existe labor profunda, sino uno o dos pasadas de implementos sobre la superficie y la posterior siembra. Esta técnica mezcla los residuos del cultivo anterior con la tierra. Las ventajas de la labranza mínima son: un mejor uso del agua, mayor materia orgánica, reducción de la erosión y degradación del suelo, aumento de la actividad microbiana del suelo y mejora en la estructura del mismo (Perrachón, 2004).

Labranza cero o siembra directa

Es la siembra directa en suelos sin preparar; es decir, no existe remoción del suelo previa a la siembra. Los implementos usados son: matraca, espeque, pala o azadón (INIAP, 2004). La siembra directa (SD), cero labranza o labranza cero es una técnica de manejo del suelo en la que se prescinde de la roturación. El origen de este método está en la agricultura conservacionista. En su forma más elemental, consiste en la utilización de los rastrojos del cultivo anterior como base de materia orgánica para el cultivo siguiente. En ellos se colocan las semillas sin mayor remoción del suelo. Además, esta técnica puede contribuir a su conservación siempre que se realice en conjunto con otras prácticas conservacionistas como la rotación de cultivos y la cobertura permanente del suelo (Varrotti, 2020).

Siembra

Efecto de la profundidad de siembra en el cultivo del maíz

La profundidad de la semilla para la mayoría de las condiciones se recomienda una profundidad de 3 a 5 cm, pero la siembra puede realizarse aún más profunda (6,5 a 7,5 cm), si es donde encontramos la humedad uniforme (INTAGRI, 2017). Esto asegura un buen contacto con el suelo húmedo que previene la desecación y asegura que el coleóptilo no tenga dificultades para llegar a la superficie. Una siembra profunda es importante en áreas con temperaturas del suelo muy altas, sobre todo si el suelo no tiene cobertura. La siembra más superficial en los suelos con humedad marginal debe ser evitada ya que no solo pone en peligro la germinación, sino que también causa un nacimiento desuniforme de las plántulas, con las que nacen por último compitiendo en forma desventajosa con las plantas que germinaron antes.

Los suelos con terrones grandes no permiten un buen contacto entre el suelo y la semilla y son responsables de la germinación pobre y desuniforme. Los suelos que son propicios al encostramiento deberían ser manejados bajo un sistema de labranza cero con una buena cobertura; si se siembra bajo labranza convencional, las costras deben ser rotas inmediatamente antes de la emergencia de las plantas por medio de una carpida superficial.

Recomendaciones para obtener uniformidad en profundidad de siembra

- Comprobar la profundidad de siembra en campo, para lo cual se debe corroborar el buen funcionamiento y operación de la sembradora. Lo anterior se logra examinando 10 metros lineales con la sembradora calibrada a la profundidad deseada y a la velocidad de operación normal.
- Verificar que existan condiciones óptimas del suelo que envolverán la semilla. Si el suelo es más seco se puede plantar a mayor profundidad, ajustar aplanadores y/o presión, o plantar de manera normal y esperar la lluvia.
- Depositar la semilla a una profundidad de entre 3.8 y 5 centímetros para el óptimo desarrollo de raíces. En la Tabla 3 se puede observar el efecto que tiene la profundidad de siembra sobre el porcentaje y tiempo de emergencia, así como la longitud de la raíz.
- Tomar en cuenta la topografía (características especiales del terreno). Se recomienda realizar la nivelación para evitar desajustes de la sembradora por irregularidades (El-Abady, 2015).

Tabla 3. Efecto de la profundidad de siembra en factores de crecimiento de la planta.

Profundidad (cm)	Emergencia (%)	Tiempo medio de emergencia (días)	Longitud de raíz (cm)
2	96,6	4,33	13,70
4	94,4	5,08	11,33
6	88,8	5,85	9,25

Fuente: El-Abady, 2015.

Densidad de siembra en maíz

La densidad de siembra en el cultivo de maíz es una de las decisiones más complejas que tiene que tomar el productor, ya que involucra calcular la cantidad de semilla a comprar. Por lo tanto, es importante determinar la cantidad óptima de plantas que permitan su adecuado desarrollo y garanticen un alto rendimiento. Existen varios estudios sobre los efectos de la

fertilización y las densidades de siembra en los dos principales tipos de maíz que se producen en Ecuador. En la provincia de Tungurahua se evaluó el efecto de la fertilización y densidades de siembra en el maíz blanco harinoso “chazo”, reportando que la fertilización con 125 kg de N, 30 kg P₂O₅ y 100 kg K tuvo la mayor respuesta en el rendimiento con 2,26 t ha⁻¹; y no hubo respuesta al factor densidades de (Dobronski, et al., 2021). En otro estudio se evaluó el comportamiento de la variedad de maíz “INIAP 122” bajo dos densidades de siembra (35.700 y 79.300 plantas ha⁻¹) y cuatro niveles de nitrógeno (N) en siembra directa, reportaron las mejores respuestas con aplicaciones de 160 kg de N (4,33 t ha⁻¹ de rendimiento en grano), mientras que no se encontraron diferencias para las densidades de siembra evaluadas (Montesdeoca y Palomeque, 2020) .

Estudios realizados con maíz duro en la Costa se han orientado a determinar las densidades de siembra y los niveles de fertilización adecuados para incrementar el rendimiento del maíz. Estudio realizado por Cuenca (2019), quien determinó el efecto de la alta densidad de siembra en el comportamiento de cuatro híbridos de maíz; sus resultados determinaron que la mejor densidad fue la de 1,50 x 0,15 m con el híbrido “Das 3383” que rindió 14,78 t ha⁻¹. En otro estudio, se determinó el efecto de la humedad del suelo con cuatro densidades de planta y dos híbridos de maíz duro en la época seca; la mejor respuesta para rendimiento de grano se obtuvo con el híbrido “Tropi-101”, con 3,93 t ha⁻¹ con la densidad de 83.333 plantas ha⁻¹ (Zamora, 2016).

Para un cultivar dado, la densidad de siembra recomendada es normalmente de 20 a 30%, o a veces menos, de la densidad óptima identificada cuando el cultivar crece bajo las condiciones experimentales ideales. Como los cultivares difieren en precocidad, respuesta a las fechas de siembra, prolificidad, tamaño de la planta, resistencia al vuelco y arquitectura y como que las condiciones de crecimiento varían de acuerdo a la fertilidad de los suelos, la humedad y la presencia de factores bióticos, la densidad de las plantas y su espaciamiento deben ser determinados para cada caso y cada recomendación particular.

Riego

La mayor cantidad de superficie cultivada de maíz se realiza durante la época lluviosa (a temporal), que no siempre provee de la humedad necesaria para un óptimo desarrollo de las plantas. Según León et al., (2018) menciona que el 10% de la superficie sembrada de maíz en el Ecuador tiene acceso a riego. Quienes disponen de agua para riego, por lo general,

hacen un manejo inadecuado de la cantidad y frecuencias de las láminas de agua (Zambrano, 2021).

Según estudios realizados por León et al., (2021) en el Centro Experimental del Riego, ubicado en Tunshi (suelo franco arenoso), Riobamba, se evaluaron los tres métodos de riego más comunes: gravedad, aspersión y goteo. Los resultados determinaron que la lámina total de agua ($L m^{-2}$) necesaria para todo el ciclo de cultivo de maíz en Tunshi (ciclo del cultivo de nueve meses) fueron: $1.015 L m^{-2}$ para gravedad, con una eficiencia de aplicación de 46%; $533 L m^{-2}$ para aspersión, con una eficiencia de 84%; y $327 L m^{-2}$ para goteo, con una eficiencia de 93%, se demostró que el riego por goteo es el más eficiente para producir maíz y produce un mayor ahorro de agua y una menor huella ecológica (León et al., 2021). Se ha demostrado que aplicando riego por goteo se han obtenido rendimientos de hasta $18 t ha^{-1}$ de grano, utilizando densidades de 133 mil plantas ha^{-1} (León et al., 2021). La combinación del riego por goteo y fertilizantes da lugar a la fertirrigación. La fertirrigación es el proceso de aplicar los fertilizantes disueltos en agua directamente a la zona radicular de las plantas, con un ahorro de fertilizantes y mayores rendimientos.

El riego por goteo continuo y automatizado, con el 50% de la dosis de fertilizantes recomendada, permitió incrementar en 116% el rendimiento de una variedad de maíz suave (harinoso) de libre polinización (Ortíz et al., 2021). Esto demuestra que es posible alcanzar incrementos de rendimiento y reducir la cantidad de fertilizante que requiere el cultivo de maíz si se utilizan las tecnologías apropiadas.

Cosecha

La época de cosecha varía de acuerdo con la variedad, temperatura y altitud. Dependiendo del objetivo del cultivo, se puede realizar la cosecha en choclo y en seco. La cosecha se puede realizar en choclo y en seco.

Choclo

La cosecha en choclo se debe realizar cuando el grano está en estado lechoso (estado reproductivo). Para conocer el momento adecuado se debe apretar la mazorca con la mano y sentir que los granos están llenos desde la base hasta la punta de la mazorca. Se puede abrir un poco las hojas que cubren la mazorca y verificar el grado de desarrollo de los granos.

Una guía visual indirecta es el color del “pelo” del choclo, cuando este pasa de tierno a seco el maíz está cerca para ser cosechado (Zambrano *et al.*, 2021).

Seco

Se debe realizar cuando el grano está en madurez fisiológica (cuando en la base del grano se observa una capa negra), o dejando secar la mazorca en la planta hasta que este lo suficientemente seca, siempre y cuando no exista presencia de lluvia. Si se cosecha con un alto contenido de humedad, es necesario poner a secar las mazorcas debido a que los granos con mucha humedad son susceptibles a pudriciones, lo que evita se produzca un recalentamiento por alta temperatura (Zambrano *et al.*, 2021). Según Granados (2001) menciona que el maíz se recoje del campo con un contenido de 20-25% de humedad, el cual es excesivamente alto para un almacenamiento correcto. Para reducir la humedad del grano se puede emplear el secado natural solar o el secado artificial.

2.12. Dificultades que enfrentan los productores de maíz

Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), los retos más importantes que el sector agropecuario deberá enfrentar en las zonas rurales son la inequidad en el acceso, distribución y gestión de riego; las barreras en el acceso a los canales de comercialización e información de precios por parte de los agricultores; la insuficiencia de recursos económicos asignados a la investigación, desarrollo tecnológico, e innovación; el limitado desarrollo de los mercados de productos e insumos para la producción agropecuaria; la débil institucionalidad pública y privada; y la falta de asignación de prioridad fiscal al sector agrícola (Caviedes, 2018; MAGAP, 2016).

Según Caviedes *et al.*, (2022) en el Ecuador se han implementado tecnologías que han permitido un aumento de la producción de maíz en los últimos años. Este incremento es más evidente en la costa ecuatoriana, donde el desarrollo tecnológico es acelerado por el impulso de las transnacionales y empresas privadas. En la Sierra, en cambio, el desarrollo es más lento y existen brechas productivas enormes en temas de mejoramiento genético y agronómico que deben ser considerados en los procesos de I+D+I. El caso más evidente es la falta de semilla híbrida de alto rendimiento que permita aumentar la producción de los maíces amiláceos.

Según Analuisa *et al.*, (2020) los principales problemas que enfrenta la organización de productores de maíz se presentan en el proceso producción, la tecnificación de la siembra,

ausencia de maquinaria y equipo que suele ser costoso en la cadena además del almacenamiento, siendo la mercadotecnia y comercialización puntos críticos que este tipo de empresas deben enfrentar para salir adelante.

Los múltiples ambientes en que se desarrolla un cultivo agrícola han recibido los efectos del cambio climático incidiendo en la producción y productividad como es el caso de la planta de maíz, modificaciones en los regímenes y volumen de lluvia y sequías. También en estos cambios aparece la redistribución geográfica de plagas y enfermedades. Esta situación a veces permanente otra cíclica demanda nuevas técnicas de producción que generen adaptabilidad de nuevas variedades de maíz en que se consiga resistencia a estreses abióticos y bióticos (Caviedes, 2022).

Los agricultores manifestaron que el principal problema que enfrentan los agricultores es el bajo precio de venta que no compensa la inversión realizada; motivo por el cual los agricultores se encuentran desmotivados para continuar en la siembra de este tipo de bienes de ciclo corto (Ban Ecuador, 2021).

2.13. Características de la producción de los productores

Según el MAG (2019) las características de los productores maiceros son las siguientes: la edad promedio es de 46 años y en su mayoría tienen formación primaria. Se autodenominan montubios (51%), mestizos (46%) y otros (3%). Solo el 46% ha recibido capacitación técnica en maíz (En este porcentaje el MAG lo ha realizado en un 91%). Sin embargo, los agricultores no hacen controles en costos de producción. En cuanto a la tenencia de la tierra, el 44% de agricultores tienen título de propiedad. El 30% carecen de título en sus tierras. Un 20% son arrendatarios y el 6% tienen en posesión tierras comunales. Como promedio de superficie de cultivo son 4,57 ha. En la venta del maíz cosechado, el 58% de agricultores lo hace al intermediario. Un 36% lo entrega a los Centros de Acopio y el 6% lo vende a otros. Los mejores rendimientos se obtienen en Loja con 7,64 t. ha⁻¹; le siguen las provincias: Los Ríos con 6,97 y Guayas con 6,59 ton. ha⁻¹ (MAG, 2019).

En una entrevista realizada a los agricultores, Ban Ecuador dio a conocer que las provincias de Manabí, Guayas, Los Ríos, Loja, El Oro y Cañar presentan las siguientes características: los rendimientos por hectárea serían mayores al 20% de los entrevistados. Los principales factores que afectaron la siembra de maíz duro (época de invierno), se mencionaron la falta de vías de comunicación (24%), clima desfavorable (21%), falta de asistencia técnica (19%),

escasez de mano de obra (18%), alto costo de mano de obra (11%), falta de financiamiento (6%) y altas tasas de interés (1%). Los entrevistados señalaron otros inconvenientes como: la oferta y demanda del producto en los mercados locales lo que incide en la caída del precio de comercialización, la presencia de plagas en el cultivo debido al exceso de agua, la pandemia ha incidido para la escasez de mano de obra la cual se ha incrementado y la falta de vías de acceso a las chacras (recintos) dificulta la movilización de productos agroquímicos, los mismos que por abastecimiento (escasez) sus costos son elevados (Ban Ecuador, 2021).

2.14. Sustentabilidad en el cultivo de maíz

Según Hasang *et al.*, (2021), de acuerdo con los resultados obtenidos en los indicadores económico, ecológico y sociocultural, evaluados bajo la metodología de Sarandón, el sistema productivo de maíz en la provincia de Los Ríos no se considera sustentable en vista que las familias de los productores maiceros presentan índices ecológicos y económicos por debajo del índice mínimo 2. En el análisis en las dimensiones económicas, ecológicas y socioculturales realizadas a productores de maíz señaló que el bajo índice económico es consecuencia de la poca diversificación de productos, bajos rendimientos del cultivo, pequeñas propiedades, canales de comercialización, que disminuyen ingresos ; mientras que los índices ecológicos bajos son provocados por mantener un sistema de monocultivo, suelos compactados y mal manejo de la fertilización nitrogenada, que afectan la sustentabilidad. La mayoría de los productores dependen solo del maíz para la subsistencia y al existir pérdida o daño de éste, no podrán compensarlo. La gran mayoría de los productores encuestados, tienen una única vía de comercialización, con dependencia y falta de poder de negociación (Hasang *et al.*, 2021). Otro de los factores críticos, es la falta de fuentes de financiamiento.

La sustentabilidad ambiental en la producción de maíz (González *et al.*, 2021) mostró tener un nivel medio, debido a la falta de diversidad biológica y de la rotación de las tierras, sumado al uso excesivo de agroquímicos lo cual está mermando la calidad de las tierras, las características del suelo siempre han dificultado la agricultura, situación que se agravó en los últimos años, con falta de acceso de la tecnología para pequeños productores, falta de la educación de los productores agrícolas, siendo esencial para mejorar sus técnicas de producción e implementar prácticas agroecológicas además de guiarlos a una integración de los mercados (Amador y García, 2015).

Según menciona Gonzales *et al.*, (2021) que la evaluación de la sustentabilidad del cultivo de maíz es baja en el agroecosistema. Sin embargo, en el ámbito económico el sistema productivo reflejó un nivel sustentable fortalecido en las categorías de beneficio económico y eficiencia económica, siendo vulnerable y frágil en la dimensión social y ambiental, por presentar indicadores bajos en la participación social equitativa, cambio e innovación, organización social, vulnerabilidad biológica y conservación y protección de los recursos naturales. Para mitigar el impacto de la agricultura en el ambiente, se requiere de la aplicación de técnicas agroecológicas que desarrollen una explotación amigable para el ambiente y donde el proceso de producción del maíz sea estable y no ser opuesto al desarrollo sustentable de la producción agrícola.

La evaluación de la sustentabilidad con base agroecológica en dos sistemas de producción de forma tradicional y agroindustrial en el cultivo de maíz, para producir alimento, dando como resultado al comparar los indicadores, el del sistema de forma agroindustria resultó con valores más altos en dos indicadores ambientales, en tres económicos y en tres sociales (ocho en total), mientras que en el sistema de forma tradicional, se obtuvieron valores mayores en dos indicadores ambientales, un económico y cinco sociales (también ocho en total). En dos indicadores ambos grupos tienen valores iguales: prácticas de conservación de recursos naturales y balance de oferta y demanda. Al considerar el área de sustentabilidad a todo el espacio dentro del perímetro que delimitan los valores calculados, resultó que el área del polígono del sistema de referencia es mayor al área del sistema alternativo. Lo anterior indica que el sistema de producción de manera tradicional es más sustentable que el sistema agroindustrial desde una visión integral tridimensional desde los ámbitos: social, económico y ambiental (Sánchez *et al.*, 2014).

2.15. Conclusiones

- El maíz es uno de los cultivos de mayor importancia en el Ecuador. Desde el punto de vista alimentario, político, económico y social, forma parte integral de la identidad cultural, lo cual se refleja en su diversificación y distribución, prácticamente producto de los procesos socioculturales y de manejo.
- El INIAP en sus investigaciones ha obtenido híbridos de maíz adaptados para el litoral ecuatoriano como son INIAP H 603 para condiciones de lluvia, riego o humedad remanente. También han logrado obtener la variedad sintética de libre polinización en maíz blanco INIAP 543 QPM.

- Entre las principales variedades de maíz criollo o nativas que se cultivan en la Sierra del Ecuador se tienen: chazo, blanco de leche, cuzco ecuatoriano, canguil ecuatoriano, racimo de uva, chillos, huandango, morochón, patillo, tusilla, chaucho y chulpi.
- La producción de maíz a nivel nacional se cultiva de dos maneras: tecnificada por parte de los grandes productores (agricultura convencional) y de forma manual, conformada por los pequeños productores (agricultura tradicional), los cuales han alcanzado un rendimiento promedio de 7,1 y 4,8 t ha⁻¹ según el sistema.
- La siembra del cultivo de maíz en las diferentes regiones del país se realiza dos veces al año, que muchos de los casos dependen de la entrada al invierno, también se aprovecha la humedad remanente en las zonas bajas. El periodo de siembra parte de enero a febrero y en época seca de mayo a junio.
- Los suelos más aptos para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con elevada capacidad de retención para el agua. El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5.5 y 7.8.
- La mayoría de los agricultores realizan manejo convencional del suelo por varias razones: para mover el suelo, control de malezas, aireación del suelo, mejor condición para la germinación de las semillas.
- El maíz requiere un mínimo de 2,2 horas de luz (heliofanía) diariamente. Con respecto a la temperatura los diferentes genotipos de maíz adaptados a las condiciones climáticas tropicales y subtropicales principalmente requieren temperaturas que oscilen entre 25 y 30 °C para su normal desarrollo y con precipitación de por lo menos de 500 a 700 mm bien distribuida durante el ciclo del cultivo y una altitud de 1600 a 4000 msnm.
- Los métodos de siembra son manual que se realiza en terrenos con pendientes mayores al 20%, utilizando para ello el chuzo o espeque para hacer un hueco en el suelo y depositar la semilla y mecanizada se emplea en terrenos de topografía plana a semiplana.
- Existen diferentes sistemas de la labranza: convencional que ejerce efectos diferenciales en el rendimiento de los cultivos, en las características físicas, químicas e hidráulicas de los suelos. Labranza reducida o mínima donde se emplea la mínima manipulación realizada al suelo para la siembra de un cultivo, utilizando máquinas para siembra directa. Labranza cero o siembra directa que consiste en la siembra

directa en suelos sin preparar; es decir, no existe remoción del suelo previa a la siembra. Los implementos usados son: matraca, espeque, pala o azadón.

- La cosecha del maíz depende de la época de cosecha varía de acuerdo con la variedad, temperatura y altitud. Dependiendo del objetivo del cultivo, se puede realizar la cosecha en choclo y en seco. La cosecha se puede realizar en choclo y en seco.
- Las dificultades que enfrentan los agricultores consisten en la baja tecnificación de la siembra, ausencia de maquinaria y equipo, que suele ser costoso en la cadena, además del almacenamiento, siendo la mercadotecnia y comercialización puntos críticos que este tipo de empresas deben superar para salir adelante.
- En estudios sobre los diferentes sistemas agroecológicos del cultivo de maíz mediante los tres criterios de sustentabilidad, se encontró que no es sustentable debido a que en ciertas formas de producción se encuentran puntos críticos, sea en las condiciones ambientales, económicas y sociales.

2.16. Bibliografía

Álvarez, R., Chuquiya, J., Mendoza, C, Panizo, R & Sevillano, R. (2017). Fuentes y dosis de nitrógeno en la productividad del maíz amarillo duro bajo dos sistemas de siembra. *In Anales Científicos*; 78(2):232-240. <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v78i2.1061>

Analuisa, I., García, S., Rodríguez, O., & Paredes, M. (2020). Análisis primario de las cadenas de valor en el maíz Portoviejo, Ecuador. *Revista ECA Sinergia*. 11 (1), 44-57. https://doi.org/10.33936/eca_sinergia.v%vi%i.1692

Amador, G & García, J. 2015. La sustentabilidad ambiental de la producción del maíz y del chile de árbol de Yahualica de González Gallo. <http://ru.iiec.unam.mx/5102/1/2-163-Amador-Garcia.pdf>

BCE (Banco Central del Ecuador). (2018). Estadística de Comercio Exterior. Banco Central del Ecuador, Quito. Recuperado el 5 de julio del 2018, <https://www.bce.fin.ec/index.php/c-externior>.

BCE (Banco Central del Ecuador). (2021). Reporte de Coyuntura Sector Agropecuario Subgerencia de Programación y Regulación. Boletín de Análisis Agropecuario. N° 94 - I – 2021. ISSN N° 1390 – 0579.

<https://contenido.bce.fin.ec/documentos/PublicacionesNotas/Catalogo/Encuestas/Co yuntura/Integradas/etc202101.pdf>.

BCE (Banco Central del Ecuador). (2022). Boletín de Análisis Agropecuario. N° 94 - IV T – 2021.

Basante, E. (2015). Manejo de Cultivos Andinos del Ecuador. Universidad de las Fuerzas Armadas. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf>.

Báez, M.A., & Aguirre M.J. (2011). Efecto de la Labranza de Conservación sobre las propiedades del suelo. *Terra Latinoamericana*, 29 (2), 113-121.

Boada, R., & Espinosa, J. (2016). Factores que limitan el potencial de rendimiento del maíz de polinización abierta en campos de pequeños productores de la Sierra de Ecuador. *Siembra* 3 067–082. <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/siembra/v3n1/2477-8850-siembra-03-01-0007.pdf>.

Caviedes, M. (2018). Producción de semilla de maíz duro en el Ecuador: retos y oportunidades. ACI Avances en Ciencias e Ingenierías. Universidad San Francisco de Quito, Ecuador.

Caviedes, M., Carvajal, F., & Zambrano, J. (2022). Tecnologías para el cultivo de maíz (*Zea mays*. L) en el Ecuador. Cumbayá, Quito, Ecuador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*. 14 (1). <https://doi.org/10.18272/aci.v14i1.2588>.

Cuenca, S. (2019). Efecto de la alta densidad de siembra en el comportamiento agronómico de cuatro híbridos de maíz (Tesis de Ingeniería). Universidad Agraria del Ecuador, Guayaquil, Ecuador.

Deras, H. (s.f). Guía Técnica. El cultivo de maíz. IICA. p. 52.

Dobronski-Arcos, J., Barona, D., Bustillos, M., & Grefa-Yumbo, M. (2021). Respuesta del maíz blanco harinoso tipo “Chazo” a las condiciones agroclimáticas de Cevallos, Tungurahua, Ecuador. *Archivos Académicos USFQ* (38), 36.

ESPAC (Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua). (2021). Producción de maíz duro seco (miles de Tm). Rendimiento 2021.

https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2021/Principales%20resultados-ESPAC_2021.pdf.

El-Abady. (2015). Influence of Maize Seed Size/Shape, Planted at Different Depths and Temperatures on Seed Emergence and Seedling Vigor. *Research Journal of Science*, 8: 1-11.

FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). (2016). Panorama agroalimentario. México: Dirección de investigación y evaluación económica sectorial. Maíz 2016.

FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2022). Datos estadísticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (2022). Recuperado el 29 de octubre de 2022, de <https://www.fao.org/faostat/en/>.

Granados, G. (2001). Manejo postcosecha en **Paliwal, R. L., Granados, G. Lafitte, N. Violic, A.D.** *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. <https://www.fao.org/3/x7650s/x7650s00.htm>.

González, F., Guajardo, L., Almeraya, S., Perez, L., & Sangerman, D. (2021). Evaluación de la sustentabilidad del cultivo de maíz en Villafloresy La Trinitaria, Chiapas. *Ciencias agrícolas*. 11(7). <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2673>.

Guamán, R., Desiderio, T., Villavicencio, A., Ulloa, S., Romero, E., (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. OI: <https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>.

Hasang, E., García, S., Carrillo, M., Durango, W & Cobos, F. (2021). Sustentabilidad del sistema de producción del maíz, en la provincia de Los Ríos (Ecuador), bajo la metodología multicriterio de Sarandón. *Selva Andina Biosphere*. 9(1):26-40: <http://www.scielo.org/bo/pdf/jsab/v9n1/2308-3859-jsab-9-01-26.pdf>

INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). (2014). Maíz Duro. Siembra. <http://tecnologia.iniap.gob.ec/index.php/explore-2/mcereal/rmaidz>.

- INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). (2004). Estación Experimental Santa Catalina. Proyecto IQ-CV-096 INIAP-PROMSA Quito - Ecuador Plegable Divulgativo No. 251. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2529/1/iniapscpl2511.pdf>.
- INEC (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos). (2021). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua 2020. Recuperado de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Presentacion%20ESPAC%202020.pdf
- Iglesias, S. (2018). Aplicación de Biochar a partir de Biomasa Residual de Eucalipto para Evaluar la Productividad con Maíz en el Austro Ecuatoriano. Tesis para Optar El Grado De Doctor Doctoris Philosophiae en Ingeniería y Ciencias Ambientale. Lima-Perú. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3394/iglesias-abad-sergio-fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- INTAGRI. (2017). Homogeneidad en la Profundidad de Siembra en el Cultivo de Maíz. Serie Cereales. Núm. 36. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 3 p.
- Lafitte, HR. (2001). Fisiología del maíz tropical en Paliwal, R. L., Granados, G. Lafitte, N. Violic, A.D. *El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción*. <https://www.fao.org/3/x7650s/x7650s00.htm>.
- León, R., Torres, A., Ardisana, E., Fosado, O., Véliz, F., & Pin, W. (2018). Comportamiento productivo del maíz híbrido Agri-104 en diferentes sistemas, densidades de siembra y riego localizado. *Espamciencias*, 10(1):124-130.
- León-Ruíz, J. E., León-Terán, J.E., & Silva-Orozco, J.S. (2021). El riego en maíz de altura (*Zea mays* L.) para la Sierra ecuatoriana. *Archivos Académicos* (38), 14.
- León-Aguilar, R., Torres-García, A., & Sánchez-Mora, F. (2021). Efecto de la densidad de siembra y riego localizado por goteo en el comportamiento productivo del maíz. *Archivos Académicos* (38), 46.

- Lozano L. (2017). Evaluación del comportamiento del maíz blanco urubamba (*Zea mays*) bajo tres densidades y tres niveles de abonamiento en el Cipa Allpa Rumi-MarcaraCarhuaz- Ancash [Internet]. Universidad Nacional «Santiago Antúñez de Mayolo».
- Moreno, V., Lasso, L., Reyes, M., Haro, R., & Cruz, G. (2018). Aptitud agroecológica de tres cultivos estratégicos (maíz, arroz y caña de azúcar) en 14 cantones de la cuenca baja del río Guayas. *Ciencias e Investigación*. 2(13).
- Montesdeoca, F., & Palomeque, G. (2020). Evaluación del comportamiento de maíz (*Zea mays* L) variedad INIAP 122 bajo dos densidades poblacionales y cuatro niveles de Nitrógeno en siembra directa. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas – Carrera de Ingeniería en Agronomía. Trabajo de titulación. Ingeniero Agrónomo. 90.
- Monteros, A., & Salvador, S. (2014). Rendimiento de maíz duro seco en verano. Quito: Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información, Coordinación General del Sistema de Información Nacional, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería) (2014). Zonificación agroecológica económica del cultivo de maíz duro (*Zea mays* L.) en el Ecuador continental a escala 1:250 000 resumen ejecutivo. Quito – Ecuador. 12 p. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/zonificaciones/maiz_amarillo_duro_2014.pdf
- MAGAP – CGSIN (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - Coordinación General del Sistema de Información Nacional). (2016). Boletín situacional Maíz. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. Coordinación General del Sistema de Información Nacional. http://sipa.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/cultivo/2016/boletín_situacional_maiz_duro_seco_2015.pdf.
- MAGAP (Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca). (2016). El sector agropecuario ecuatoriano: análisis histórico y prospectiva a 2025. Quito, Ecuador: MAGAP.

- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2018). Rendimientos objetivos de maíz duro época de invierno 2018 (Enero - Junio). Quito, Ecuador. http://sipa.agricultura.gob.ec/descargas/estudios/rendimientos/maiz/rendimiento_mai_z_duro_invierno_2018.pdf
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2019). Prácticas agronómicas de maíz amarillo duro, invierno 2019. SIPA. <https://fliphtml5.com/ijia/ahbk/basic>.
- Ortíz, R., Quilanchamin, A., Chile, M., & Cartagena, Y. (2021). Efecto del fertiriego en el cultivo de maíz harinoso (*Zea mays* L. var. *amylacea*) variedad pepa. Archivos Académicos (38), 43.
- Perrachón J. (2004). Siembra Directa: ¿qué es? Revista del Plan Agropecuario. 54–57. https://www.planagropecuario.org.uy/publicaciones/revista/R110/R110_54.pdf.
- Pérez Almeida, I., & García Mendoza, P. (2020). Aportes de la biotecnología al mejoramiento del maíz. Revista Peruana De Innovación Agraria - ISSN: 2810-8876 (En Línea), 1(1), 130 - 150. Recuperado a partir de <http://200.123.25.14/index.php/REVINIA/article/view/10>.
- Ranum, P., Peña-Rosas, J., & García-Casal, M. (2014). Global maize production, utilization, and consumption. Annals of the New York Academy of Sciences, 1312, 105–112.
- Sandal, M. (2014). Comportamiento agronómico de tres híbridos de maíz (*Zea mays* l.) en el cantón pueblo viejo provincia de Los Ríos [Internet]. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. <http://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/478>.
- Sánchez, P., Ocampo, I., Parra, F., Sánchez, J., Ramírez, A., & Argumedo, A. (2014). Evaluación de la Sustentabilidad del Agroecosistema Maíz en la Región de Huamantla, Tlaxcala, México. *Agroecología*. 9(1). <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/300691/21611>.
- Sánchez, V. (2020). Efecto de la adopción de semilla híbrida sobre la productividad por hectárea del cultivo de maíz duro: evidencia desde Ecuador. Tesis para obtener el título de maestría de Investigación en Economía del Desarrollo. Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, FLACSO Ecuador.

- SIPA (Sistema de Información Pública Agropecuaria). (2021). Cifras Agroproductivas. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito, Ecuador. Consultado en Octubre de 2022. <http://sipa.agricultura.gob.ec/index.php/cifras-agroproductivas>.
- Tapia, C. (2015). Identificación de áreas prioritarias para la conservación de razas de maíz en la sierra del Ecuador. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. p 9-12
- Varrotti, A. (2020). Siembra directa (SD). Argentina, 1940-2020 en Salomón, A., Muzlera, J. *Diccionario del Agro Iberoamericano*. <https://www.researchgate.net/publication/344305317>.
- Velásquez C., J. S. & Araujo, M.A. (2021). Maíz forrajero INIAP- 180, fuente excepcional para ensilado e importante alternativa alimenticia para ganado lechero. Archivos Académicos USFQ, 38, 19.
- Yang, N., Liu, J., Gao, Q., Gui, S., Chen, L., Yang, L., Huang, J., Deng, T., Luo, J., He, L., Wang, Y., Xu, P., Peng, Y., Shi, Z., Lan, L., Ma, Z., Yang, X., Zhang, Q., Bai, M., Li, S., & Yan, J. (2019). Genome assembly of a tropical maize inbred line provides insights into structural variation and crop improvement. *Nature genetics*, 51(6), 1052–1059. <https://doi.org/10.1038/s41588-019-0427-6>.
- Zamora, F. (2016). Estudio del efecto de la humedad remanente del suelo y densidad poblacional de híbridos de maíz (*Zea mays* L) sembrados en la época seca en la zona de Quevedo (Tesis de Ingeniería). Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador.
- Zambrano, E. (2021). Avances en el desarrollo de híbridos y variedades de maíz (*Zea mays* L.) para el trópico seco del Litoral ecuatoriano. Archivos Académicos USFQ, 38, 13.
- Zambrano, J., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., Villacrés, E., Garcés, S., Ortíz, R., León, J., Campaña, D., López, V., Asaquibay, C., Nieto, M., Sanmartín G., Pintado, P., Yáñez, C., & Racines, M. (2021). Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana. INIAP, Manual No. 122. Quito, Ecuador. Recuperado 29 de octubre de 2022.

Capítulo III. Nutrición en maíz.

Marlon Darlin López Izurieta

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0003-3334-2317>

Adriana Magdalena Mejía Gonzales

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://ORCID.org/0000-0002-5577-0868>

Gabriela Electra Medina Pinoargote

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://ORCID.org/0000-0002-0440-8316>

Luigi Steeven López Salvatierra

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://ORCID.org/0000-0001-8028-4151>

3.1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es un cereal importante de la familia de las Poaceae (Gramineae), es muy versátil y puede cultivarse para consumo humano, alimentación animal y alimento para animales en una variedad de entornos y regiones geográficas. (Arvaidya *et al.*, 2012). El maíz es el grano más cultivado en el mundo en términos de producción global y ocupa el tercer lugar en consumo después del arroz y el trigo.

Conocido como la " Reina de los Cereales ", el maíz es un cultivo milagroso que se siembra en más de 130 países en diferentes continentes. A nivel mundial, el maíz se cultiva en una superficie de 168 millones de hectáreas con una producción de 945,8 millones de toneladas y una productividad de 5,7 t ha⁻¹ (Preetha y Stalin, 2014).

La eficiencia de la fertilización es un parámetro que debe tenerse en cuenta al calcular la tasa de fertilización, ya que afecta en gran medida la tasa de fertilización. Es bien sabido que existen varios factores limitantes y pérdidas cuando se aplican nutrientes al suelo.

Estas pérdidas han sido estimadas por varios investigadores y deberían ser compensadas y se basa en los parámetros de eficiencia del fertilizante y depende de los siguientes aspectos: propiedades de los nutrientes, propiedades del suelo, propiedades de la fuente del fertilizante, método y momento de aplicación, condiciones climáticas y propiedades de la planta (Gudelj *et al.*, 2017).

El cambio climático amenaza la seguridad alimentaria en todo el mundo (Raza *et al.*, 2019). El rendimiento de los cultivos debería aumentar entre un 25 % y un 70 % para 2050 sin forzar el funcionamiento del ecosistema (Wang *et al.*, 2019). Las tasas de crecimiento del rendimiento de los principales cultivos alimentarios (arroz, trigo y maíz) se han ralentizado desde la década de 1960 (Long y Ort, 2010), y las tendencias actuales de rendimiento son insuficientes para satisfacer la demanda futura (Bajželj *et al.*, 2014). Además, debe poder lograrse una mayor productividad de los cultivos incluso en climas muy inestables. En el futuro, se espera que el clima extremo (sequías, olas de calor, heladas, fuertes lluvias, tormentas, etc.) sea aún más intenso (Ummenhofer y Meehl, 2017).

3.2. Nutrientes esenciales para plantas

Se requieren al menos 17 nutrientes para que las plantas crezcan y completen su ciclo de vida, estos elementos también se conocen como nutrientes esenciales. Arnon y Stout (1939) fueron los primeros en proponer el término. Los artículos para ser considerados materiales deben cumplir con tres criterios:

- La planta no puede completar su ciclo de vida en ausencia de este elemento.
- La función de un elemento esencial no puede ser reemplazada o compensada por otro elemento.
- El elemento está directamente involucrado en el crecimiento y la reproducción de las plantas.

Los nutrientes esenciales de las plantas sus fuentes y concentraciones típicas en los tejidos vegetales se resumen en la Tabla 1. El carbono (C), el hidrógeno (H) y el oxígeno (O) se consideran elementos no minerales y se derivan del aire y el agua (Jones y Jacobson, 2005a). Los 13 nutrientes restantes se clasifican como macronutrientes y micronutrientes en función de las cantidades relativas de los requisitos de las plantas. Dentro de los macronutrientes, el nitrógeno (N), el fósforo (P) y el potasio (K) se consideran “Nutrientes primarios” mientras que el calcio (Ca), el magnesio (Mg) y el azufre (S) se denominan “Nutrientes secundarios”. Los micronutrientes incluyen boro (B), cloro (Cl), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (MO) y zinc (Zn). El níquel (Ni) se incluye recientemente entre los micronutrientes.

Tabla 1. Nutrientes vegetales esenciales, su fuente, funciones en la planta y concentraciones típicas en los tejidos vegetales.

Elemento	Origen	Formas iónicas absorbidas por las plantas.	Papel en la planta	Concentración típica en tejido seco
Carbono (C)	Aire		Columna vertebral de toda la materia orgánica; necesario para la fotosíntesis Importante para el equilibrio osmótico,	
Hidrógeno (H)	Agua		reacciones bioquímicas y constituyente de carbohidratos	
Oxígeno (O)	Aire agua		Constitución de carbohidrato, necesario para la respiración.	
Nitrógeno (N)	Aire/suelo	NO_3^- NH_4^+	Constituyente de proteínas, clorofila y ácidos nucleicos Constituyente de coenzimas, ácidos nucleicos (ADN) y sustratos etabólicos; almacenamiento de energía (ATP) e importante en la	1.0-5.0%
Fósforo (P)	Suelo	H_2PO_4^- HPO_4^{-2}	transferencia de energía; transporte de nutrientes a través de la pared celular y síntesis de ácidos nucleicos y proteínas. Involucrado con la fotosíntesis, la translocación de	0.1-0.5%
Potasio (K)	Suelo	K^+	carbohidratos, la síntesis de proteínas, la resistencia a enfermedades y la tolerancia a la sequía. Un componente de las paredes celulares; juega	0.5-0.8%
Calcio (Ca)	Suelo	Ca^{+2}	un papel en la estructura y permeabilidad de las membranas.	0.2-1.0%

Elemento	Origen	Formas iónicas absorbidas por las plantas.	Papel en la planta	Concentración típica en tejido seco
Magnesio (mg)	Suelo	Mg ⁺²	Componente de la molécula de clorofila, actúa como activador enzimático, participa en el metabolismo de los carbohidratos.	0.1-0.4%
Azufre (S)	Suelo	SO ₄ ⁻²	Componente importante de las proteínas vegetales (síntesis de aminoácidos) y clorofila.	0.1-0.4%
Boro (B)	Suelo	H ₃ BO ₃ H ₂ BO ₃ ⁻	Importante en la translocación de azúcar, 6-60 mg kg ⁻¹ metabolismo de carbohidratos, metabolismo de N y P, polinización.	
Cloro (Cl)	Suelo	Cl ⁻	Implica la producción de oxígeno en 0.1-1.0% de fotosíntesis, uso de agua, control de enfermedades.	
Cobre (Cu)	Suelo	Cu ⁺²	Un catalizador para la respiración; un componente de varias enzimas, síntesis de proteínas y formación de clorofila, metabolismo de N.	2-20 mg kg ⁻¹
Hierro (Fe)	Suelo	Fe ⁺² , Fe ⁺³	Participa en la síntesis de clorofila y en enzimas para la transferencia de electrones	50-250 mg kg ⁻¹
Manganeso (Mn)	Suelo	Mn ⁺²	Controla varias oxidaciones sistemas de reducción, esenciales para la producción de clorofila y, por lo tanto, para la fotosíntesis	20-200 mg kg ⁻¹
Molibdeno (Mo)	Suelo	MoO ₄ ⁻²	Implica la fijación de N, la síntesis de proteínas, el metabolismo del N	0,05-0,2 mg kg ⁻¹
Zinc (Zn)	Suelo	Zn ⁺²	Se involucra con los sistemas enzimáticos que regulan varias actividades	25-150 mg kg ⁻¹

Elemento	Origen	Formas iónicas absorbidas por las plantas.	Papel en la planta	Concentración típica en tejido seco
			metabólicas, incluida la síntesis de proteínas y el desarrollo de la raíz.	

Fuente: Danforth, (2009)

Todos los nutrientes esenciales se mueven de las raíces a otras partes de la planta, pero cuando esos suministros de nutrientes se restringen al punto de crecimiento, algunos nutrientes se mueven o se translocan de las hojas más viejas a las hojas más nuevas y así sucesivamente. El patrón es diferente, este fenómeno también es llamado " movilidad " de nutrientes. Según la movilidad de los nutrientes dentro de las plantas, los nutrientes de las plantas se clasifican en móviles e inmóviles, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Movilidad de los nutrientes dentro de la planta

Nutrientes móviles	Nutrientes inmóviles
Nitrógeno	Boro
Fósforo	Calcio
Potasio	Cobre
Magnesio	Hierro
Molibdeno	Azufre
Cloro	Zinc
	Manganeso

Fuente: Danforth, (2009)

Los nutrientes también varían ampliamente dentro de la categoría móvil. Por ejemplo, el nitrato (NO_3^-) es más móvil que el fosfato (HPO_4). Por regla general, las deficiencias de nutrientes migratorios aparecen primero en las hojas inferiores (más viejas), mientras que las deficiencias de nutrientes no migratorios muestran los primeros síntomas en las hojas nuevas o en el crecimiento terminal. Los nutrientes móviles también son muy móviles, como el NO_3^- , y la forma de nutrientes NH_4^+ en el suelo es más fácil de absorber para las plantas que sus formas inmóviles.

3.3. Nutrientes en Maíz.

Las concentraciones típicas de nutrientes para varias partes de la planta de maíz se muestran en la Tabla 3. La composición de nutrientes esenciales en cada planta varía según las condiciones de crecimiento, como el estrés, el tipo de planta, la variedad, la etapa de crecimiento y varios otros factores (Ibrahim y Kandil, 2007).

Tabla 3. Materia seca y composición de nutrientes de maíz en la madurez

Componente	Materia seca % del total	Nitrógeno % N	Fósforo % P ₂ O ₅	Potasio % K ₂ O
Grano	48	1,44	0,69	0,50
Tallos	22	0,43	0,14	0,90
Hojas	10,6	1,80	0,69	2,05
Vainas	5,3	0,64	0,37	1,74
Cáscara	4,3	0,36	0,21	1,32
Granos	1,5	0,50	0,18	1,68
Mazorcas	7,5	0,33	0,11	0,62

Fuente: Hanway, (1962)

La composición de nutrientes de un tejido está determinada por su suministro de nutrientes (suelo y nutrientes aplicados), la capacidad del genotipo para absorber nutrientes y descomponerlos en varios componentes, el entorno de crecimiento de la planta (suministro de agua, temporada de crecimiento libre de estrés, etc), depende de la etapa de crecimiento. Por ejemplo, se ha informado que los cultivares de maíz tropical contienen $1,46 \times N$, $0,33 \times P$ y $0,39 \times K$ en el grano (Feil *et al.*, 2005).

3.4. Absorción de nutrientes.

La Tabla 4 muestra las concentraciones típicas de nutrientes encontradas en plantas de maíz que producen 18.7 Mg ha^{-1} . Estos valores son orientativos y las concentraciones reales variarán mucho según las condiciones de cultivo, el cultivo y la capacidad de nutrientes del suelo.

Tabla. 4. Concentraciones de 13 nutrientes esenciales en el maíz

Nutrientes primarios	Contenido	Micronutriente	Contenido
	kg ha⁻¹		kg ha⁻¹
Nitrógeno (N)	240	Cloro (Cl)	110
Fósforo (P)	44	Hierro (Fe)	3
Potasio (K)	200	Manganeso (Mn)	0,6
Nutrientes secundarios		Cinc (Zn)	0,6
Azufre (S)	34	Cobre (Cu)	0,2
Calcio (Ca)	45	Boro (B)	0,1
Magnesio (Mg)	56	Molibdeno (Mo)	>0,1

Fuente: Johnston y Dowbenko (2004)

La cantidad de nutrientes eliminados de la porción cosechada de cultivos como granos, ensilaje y pasto, en el caso del maíz, generalmente se cosecha el grano (alrededor del 50 %

de MS y del 60 al 70 % de N), mientras que el 50 % de MS y alrededor del 30 % de N en la MS residual (hojas, tallos, mazorcas, etc.) se deja en el mismo campo a 50 MS y unos 30 %. Sólo se cosecha grano, por lo tanto, al menos 1/3 de todo el nitrógeno y otros nutrientes se retienen y reutilizan en el mismo campo en una proporción mucho mayor. En los sistemas agrícolas de subsistencia a pequeña escala, los restos de maíz a menudo se consideran valiosos como alimento para el ganado y como material para calefacción, cercas, postes, etc., se eliminan, lo que hace que la tierra sea más susceptible a la erosión y mucho menos nutrientes están disponibles para cultivos posteriores. Es difícil lograr la nutrición de las plantas en tales sistemas y en SOM, el balance de nutrientes siempre serán negativos a menos que se agreguen grandes cantidades de fertilizante cada vez (Ma *et al.*, 2006a).

Según su estudio, la distribución de nutrientes de las plantas de maíz presenta la mayor cantidad de N (más del 50%) en los granos, seguido de las mazorcas. La misma tendencia se observa para el 62% de fósforo dentro de las partículas, seguido por La tusa residual. Además, mostramos que P es el elemento más concentrado dentro de las partículas. Sin embargo, la cantidad de P extraído del maíz es pequeña en comparación con N y K. Similar tendencia se observó para K, Mg y S, que se acumularon principalmente en residuos, seguidos de cereales y mazorcas de maíz. Estos resultados también indican que el potasio es el elemento con menor migración de partículas en comparación con el Mg y el S (Valverde, 2010).

El Sistema Suelo - Planta

El sistema suelo – planta es un sistema abierto en el que los elementos (M) son constantemente removidos de un lado, la fase sólida del suelo y acumulados en otro, la planta.

M (fase sólida)- M (solución) - M (raíz) - M (parte aérea)

Cualquier fenómeno natural, químico o biológico ocurre en el suelo, lo que afecta los nutrientes de las plantas. Los mecanismos involucrados son diversos y pueden afectar los nutrientes de manera diferente, aumentando su disponibilidad en algunos casos y disminuyéndola en otros (Diaz, 2017).

3.5. Gestión de nutrientes

Mejorar la sostenibilidad de la agricultura depende de minimizar los impactos ambientales negativos reduciendo la dependencia de insumos externos, recursos no renovables y manteniendo o mejorando la productividad y las ganancias. El uso de pesticidas como suplementos nutricionales es similar al uso de insecticidas, herbicidas y fungicidas para los agricultores de las regiones tropicales y subtropicales, siempre que se usen correctamente en la cantidad adecuada y en el momento adecuado según cada caso (Flores, 2014).

La fertilización con sustancias minerales (fertilizantes químicos) producidas por procesos químicos en plantas industriales permite a los agricultores corregir rápidamente las deficiencias de nutrientes del suelo y aplicar cantidades suficientes de macro y micronutrientes para satisfacer las necesidades de los cultivos. Una gran ventaja de usar fertilizantes químicos es que algunas de sus formulaciones son altamente solubles y rápidamente se vuelven parte de la solución del suelo, aumentando la concentración y disponibilidad de nutrientes para las raíces de las plantas. Otras formulaciones de fertilizantes químicos se disuelven lentamente, liberando nutrientes gradualmente a medida que están disponibles regularmente (Melgar y Torres, 2014).

Según Flores (2014) los requerimientos por hectáreas son los mencionados a continuación:

Tabla. 5. Requerimientos nutricionales del cultivo del maíz

Requerimientos nutricionales	
Elementos	Kg/ha
Nitrógeno	187
Fósforo	38
Potasio	192
Calcio	38
Magnesio	44
Azufre	22
Cobre	0.1
Zinc	0.3
Boro	0.2
Hierro	1.9
Manganeso	0.3
Molibdeno	0.01

Fuente: Flores, (2014)

Nitrógeno

Es necesario para la producción de proteínas y clorofila, el mantenimiento de la eficiencia fotosintética, el desarrollo del área foliar y en última instancia, la producción de MS (Muchow, 1998). También es el nutriente limitante del rendimiento más importante del mundo. La limitación de N es más severa en los sistemas agrícolas tropicales y subtropicales, donde los sistemas de cultivo son intensivos y la disminución de la fertilidad del suelo es una preocupación (Worku *et al.*, 2007).

Los componentes de N del suelo incluyen N orgánico e inorgánico residual de aplicaciones previas de N, N atmosférico fijado por leguminosas y bacterias de vida libre y deposición atmosférica (Legg y Meisinger, 1982). La disponibilidad de N mineral del suelo (NH_4^+ y NO_3^-) influye en la tasa de iniciación y expansión de la hoja, el tamaño final de la hoja y la tasa de senescencia de la hoja (Schröder *et al.*, 2000).

El manejo del nitrógeno es uno de los temas más estudiados en la agricultura (Subedi *et al.*, 2006). El uso de fertilizantes nitrogenados ha sido identificado como el factor que más energía consume en la producción de maíz (Ruiz Díaz *et al.*, 2008). El uso de nitrógeno es una preocupación importante en la producción de maíz. Esto se debe a que los productores de maíz usan dosis de nitrógeno más altas que las que se consideran "seguras", lo que puede tener impactos ambientales negativos (Schröder *et al.*, 2000). Debido al aumento de los costos de los fertilizantes nitrogenados y la creciente preocupación por la contaminación por NO_3 en las aguas subterráneas y superficiales (Stevens *et al.*, 2005) y la liberación de nitrógeno a la atmósfera, la eficiencia de la fertilización nitrogenada en la producción moderna de maíz es limitada y más importante causa de los gases de efecto invernadero y la contaminación del aire.

Momento crítico del requerimiento de nitrógeno

Un punto de inflexión se refiere a una etapa del maíz en la que la falta de suministro de nitrógeno puede afectar negativamente el crecimiento y el rendimiento. En principio, el estrés por nitrógeno no debería ocurrir en ninguna etapa del desarrollo del maíz, aunque los requisitos de nitrógeno varían ampliamente durante la temporada de crecimiento cuando los niveles de nitrógeno en el suelo son muy bajos, pero se ha demostrado una clara evidencia de deficiencia de nitrógeno. (Brown, 1970).

Cuando los niveles de N en el suelo son muy altos, los rendimientos de grano disminuyen, pero las concentraciones de N en las plantas siguen aumentando. Hay una ventana en la que los niveles de nitrógeno en los tejidos de las plantas son bajos y los cultivos sufren "deficiencias ocultas". Es importante saber cuándo aumentar el suministro de nitrógeno a un cierto nivel. Las concentraciones de nitrógeno dentro de los tejidos de las plantas continúan aumentando, pero los rendimientos de los granos no responden al aumento del suministro de nitrógeno y al aumento de los rendimientos en el suelo. Mayores aumentos en el suministro de nitrógeno del suelo pueden perjudicar la producción de cereales debido al desequilibrio entre la fuente y el consumo (Rajcan y Tollenaar, 1999).

El nitrógeno aplicado antes de la floración tiene dos efectos principales sobre el rendimiento: (i) el tamaño de la planta y (ii) el número de granos. Una mayor cantidad de N desde el inicio de la floración incrementó directamente el número de granos por planta o por unidad de área, lo que posiblemente incrementó la tasa de diferenciación de las espiguillas (Pearson y Jacob, 1987).

El conocimiento tanto de los factores del suelo como de los requisitos de nitrógeno de los cultivos es un requisito previo para desarrollar estrategias de manejo para maximizar las respuestas de rendimiento a los fertilizantes nitrogenados (Muchow, 1998). Es importante conocer el momento crítico de la demanda de N porque se pueden tomar decisiones de cambio de N para evitar pérdidas de rendimiento irreversibles.

El maíz requiere aproximadamente 20-25 kg/ha de nitrógeno (N) por tonelada de grano producido. Entonces, por ejemplo, para producir 10 t/ha de grano, el cultivo debe absorber alrededor de 200-250 kg N/ha del cultivo. Esta cantidad será el nitrógeno requerido para ese nivel de rendimiento.

Los suministros de campo (nitrógeno en el suelo + N de los fertilizantes) deben satisfacer esta necesidad para mantener el sistema nutricionalmente equilibrado. Esta aproximación es el llamado criterio o modelo de equilibrio. Sin embargo, la diferencia entre la cantidad de N en el suelo y la cantidad de N absorbido por los cultivos está determinada por la denominada eficiencia de absorción. Esta eficiencia de absorción depende de la cantidad de N presente

en el suelo al momento de la siembra, la cantidad de N mineralizado en el cultivo y el fertilizante N suministrado (INIAP, 2012).



Figura 1: Síntomas de deficiencia de nitrógeno en plantas de maíz.
Fuente: CIMMYT, 2004.

Fósforo

Aunque el P no es tan abundante en los tejidos vegetales como el N, está involucrado en muchas funciones metabólicas importantes que ocurren en las células vegetales. El P del suelo es generalmente menos móvil y no es ni deficiente ni excesivo en el crecimiento de las plantas dada la mayoría de los suelos microestructurales o un historial de entrada de materia orgánica.

Por tanto, desde el punto de vista de la producción, gestionar P es menos urgente e importante que N. Sin embargo, hay una mayor respuesta del rendimiento del maíz a los fertilizantes fosfatados, especialmente en el potencial de alto rendimiento de P. Por otro lado, la lixiviación de fósforo a los cuerpos de agua se ha convertido en uno de los problemas ambientales graves (Johnston y Dowbenko, 2004).

La deficiencia de fósforo generalmente ocurre cuando el maíz es joven, cuando la concentración de fósforo en la solución es insuficiente para cumplir con los altos requisitos de fósforo necesarios para el crecimiento de la planta y los brotes o las plantas jóvenes de maíz no se tratan adecuadamente, especialmente en condiciones de frío. cantidades adecuadas de fósforo (Bittman *et al.*, 2004).

La alta tasa de acumulación de P en el maíz ocurre más tarde que la de N porque este nutriente se mueve a la superficie de la raíz por difusión y las favorece primero. Por lo tanto, para asegurar que el P no limite el rendimiento, debe estar disponible inmediatamente después de la siembra. La deficiencia de este nutriente retrasa el crecimiento debido a la reducción del desarrollo y elongación de las hojas, y reduce significativamente la tasa fotosintética (Echeverría *et al.*, 2014).

El fósforo se une fácilmente a muchos compuestos en el suelo, haciéndolos menos disponibles para las plantas. A un pH bajo del suelo, los iones de Fe y Al libres se unen al P, lo que hace que menos P esté disponible para las raíces de las plantas. La disponibilidad de fósforo también se reduce en suelos calcáreos (pH alto) ya que el fósforo se une al Ca para formar compuestos insolubles. El P disponible en el suelo se correlacionó positivamente con el contenido de P del grano, y hubo una variabilidad considerable en el contenido de P del grano en cualquier nivel de prueba del suelo (Lithourgidis *et al.*, 2007).

El maíz es un cultivo muy eficiente en términos de utilización de nutrientes, pero al comparar sus necesidades con la soja, sería un error olvidar que el maíz produce de tres a cuatro veces más biomasa, dado el rendimiento del grano. Con esto en mente, se debe planificar el manejo nutricional cuando se busca obtener altos rendimientos. La cantidad de fósforo cosechado del grano no es grande: solo 4 kg (o 20 kg de fertilizante fosfatado) por tonelada de grano. Multiplica este valor por un rendimiento de 10 toneladas por hectárea y estos 4 kilogramos te empiezan a molestar y debes aprender a manejarlos de manera efectiva (INTA, 2008).

Las fuentes de fertilizantes fosfatados son orgánicos (fertilizantes y suplementos) e inorgánicos, tales como: la roca fosfórica y los fertilizantes químicos que contengan fósforo. Las fuentes de fertilizantes de fosfato inorgánico se aplican antes de la siembra o con la siembra de maíz como iniciador, sin duda, una opción en condiciones bajas. En los últimos años, ha habido un interés creciente en la fertilización emergente (el contacto directo de pequeñas cantidades de fertilizante con semillas de maíz) (Bittman *et al.*, 2004).



Figura 2: Síntomas de deficiencia de fosforo en plantas de maíz.

Fuente: CIMMYT, 2004.

Potasio

El potasio es necesario para la fotosíntesis, la movilización de carbohidratos, la síntesis de proteínas y la resistencia a las enfermedades y sequías de las plantas. También se cree que la fertilización óptima con K aumenta la concentración de N en los cultivos y mejora la utilización de N de la planta, no todo el K medido está disponible para las plantas. Esto se debe a que los cationes positivos (+ve) son atraídos por los iones cargados negativamente en el humus del suelo y las partículas de arcilla. También conocida como capacidad de intercambio catiónico del suelo (CIC)). Solo una pequeña porción (<2%) del K total está disponible para las soluciones del suelo como 'K soluble', una forma disponible para ser absorbida por las plantas. El potasio intercambiable del suelo está fuertemente correlacionado con el examen de tejidos y los síntomas de deficiencia (Driskell y Richer, 1952). En regiones o campos de maíz, la cantidad de K requerida varía de un lugar a otro. Por lo tanto, su aplicación depende de tres factores principales: (i) prueba de K del suelo, (ii) objetivo de rendimiento y (iii) CIC del suelo. La absorción de potasio por las plantas puede verse afectada por la alta salinidad y la concentración de nitrógeno en la solución del suelo.

Se acumula abundantemente en las plantas, alcanzando aproximadamente 250 kg K por hectárea en biomasa aérea fisiológicamente madura (Ciampitti *et al.*, 2013). Se observó una alta tasa de asimilación de K entre 15 y 20 días antes de la floración, ya que este elemento se transloca principalmente dentro de la planta de las hojas más viejas a las más jóvenes. Sin embargo, tiene una escasa movilidad en el tallo (Echeverría *et al.*, 2014).

Los niveles de K en los granos de maíz se correlacionaron positivamente con los niveles de rendimiento, la deficiencia de potasio no siempre es visualmente evidente y puede estar enmascarada por otros síntomas de estrés de la planta (Johnston y Dowbenko, 2004), pero para un desarrollo óptimo de la planta, las plantas de maíz deben estar disponibles desde el crecimiento temprano y todos los requisitos de K se absorben a través de la raíz. La aplicación de fertilizantes K se basa en las recomendaciones de las pruebas de suelo. Los rendimientos de maíz se redujeron hasta en un 13 % en condiciones cálidas y húmedas cuando las pruebas indicaron una falta de K disponible (Subedi y Ma, 2009).

Estudio de fertilización potásica de maíz realizado en el período 2004-2010, en suelos con diferentes texturas y contenidos de K (K+) intercambiable, de 0 a 240 kg/ha K₂O, aplicado en la siembra con cloruro de potasio (KCl). Cuando se analizaron los resultados, se observó

un aumento en el rendimiento de maíz con la adición de K en 15 de los 50 sitios investigados ($P < 0.10$). Para determinar los valores críticos se incluyó un tratamiento testigo (sin K) y las dosis medias fueron de 60 y 120 kg/ha en KO. Considerando todos los sitios y cultivos, la masa crítica de K intercambiable encontrada fue de 0.34 cmol (+).kg suelo-1 (Barbazán, *et al.*, 2011).



Figura 3: Síntomas de deficiencia de potasio en plantas de maíz.

Fuente: CIMMYT, 2004.

Calcio

Aunque se requieren cantidades significativas de Ca como parte integral de la estructura de la planta (pared celular), la deficiencia de Ca es menos común en los suelos agrícolas. La mayoría de los suelos neutros y alcalinos contienen suficiente Ca, pero la deficiencia de Ca se puede observar en suelos ácidos. La corrección del pH bajo del suelo con cal suele llevar el Ca del suelo a niveles adecuados para el cultivo de maíz. De manera similar, la aplicación de fertilizantes agrícolas y residuos de cultivos a los suelos ayuda a mantener los niveles de Ca y otros nutrientes (Danforth, 2009).

Magnesio

El magnesio es parte de la molécula de clorofila, actúa como un activador de enzimas y está involucrado en el metabolismo de los carbohidratos. En general, la deficiencia de Mg es mayor que la deficiencia de Ca, pero el Mg a menudo aumenta el rendimiento en la mayoría de los suelos, no es un nutriente limitante. Driskell y Richer (1952) informó una correlación significativa entre el Mg intercambiable del suelo y los síntomas de deficiencia visual de Mg o el examen histológico del maíz, la cal dolomita contiene mucho Mg.

Los suelos derivados de caliza dolomita no requieren fertilización con Mg, del mismo modo, no se requieren fertilizantes de Mg adicionales para la enmienda del suelo con piedra caliza dolomita. Si la deficiencia de Mg se detecta mediante síntomas visuales o mediante un examen del tejido o del suelo, se pueden tomar medidas correctivas mediante la aplicación de fertilizantes que contengan Mg, como Mg quelado u óxido de magnesio (Danforth, 2009).

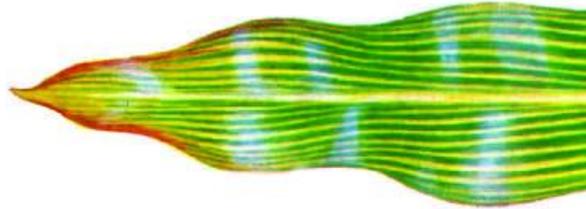


Figura 4: Síntomas de deficiencia de magnesio en plantas de maíz.

Fuente: CIMMYT, 2004.

Azufre

El azufre es un elemento secundario con un papel importante en las plantas, ya que es un componente básico de los aminoácidos vegetales (precursores de proteínas) y participa en la formación de clorofila. El azufre juega un papel clave en la aplicación equilibrada de nutrientes para obtener el máximo rendimiento y una calidad superior del producto. El S existe en formas orgánicas e inorgánicas, siendo el S orgánico la forma predominante en la mayoría de los suelos (Kowalenko, 2004). El S orgánico no está disponible para las plantas a menos que esté mineralizado a sulfato inorgánico oxidado (SO_4^-). Los aditivos de sedimentos y fertilizantes proporcionan cantidades significativas de S al suelo. El azufre tiene una importancia creciente en todas las regiones del mundo debido al frecuente agotamiento temporal y espacial de S (Khan *et al.*, 2006). Sin embargo, el exceso de S soluble en el suelo aumenta la absorción del elemento tóxico Cd e inhibe el crecimiento normal del maíz (Cui y Wang, 2006).

La deficiencia de azufre es causada por varios factores, incluido el mayor uso de fertilizantes sin azufre, el cultivo intensivo, la eliminación de residuos de cultivos y la erosión del suelo. Los síntomas de la deficiencia de S son más comunes durante las primeras etapas de crecimiento ya que el S se filtra fácilmente por la precipitación y a menudo, se acumula en los estratos subterráneos (Hitsuda *et al.*, 2005). La concentración crítica de S en brotes de maíz en etapa temprana es de $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ (Hitsuda *et al.*, 2005). Se han informado mejoras significativas en el rendimiento con la fertilización con S, aunque las respuestas varían

ampliamente de un sitio a otro. La aplicación de S hasta 30 kg ha⁻¹ mejoró el rendimiento promedio de grano de maíz en un 22 % en comparación con los tratamientos de control sin aplicar (Dwivedi *et al.*, 2002).



Figura 5: Síntomas de deficiencia de azufre en plantas de maíz.

Fuente: CIMMYT, 2004.

Micronutrientes

Las deficiencias de micronutrientes se observan a menudo con prácticas agrícolas intensivas y la introducción de cultivares de alto rendimiento. Las deficiencias de micronutrientes son particularmente problemáticas en suelos arenosos, debido a su baja CIC y en suelos orgánicos, debido a su bajo contenido mineral. Las deficiencias de micronutrientes ocurren en muchos suelos debido a la naturaleza calcárea del suelo, el alto pH del suelo, la salinidad del suelo, la sequía persistente, los altos niveles de bicarbonato en el agua de riego y la aplicación desequilibrada de fertilizantes. También está muy extendida en los países asiáticos (Malakouti, 2008). Los micronutrientes también suelen ser deficientes en los suelos volcánicos (Lisuma *et al.*, 2006).

Entre los micronutrientes, Zn seguido de B es el elemento más comúnmente encontrado en programas de fertilización. La deficiencia de zinc es un problema importante de nutrición del suelo en todo el mundo, ya que el zinc disponible se encuentra en niveles deficientes en la mayoría de los suelos (Adiloglu y Adiloglu, 2006). Se observó una disminución en el rendimiento del maíz con la aplicación de B y la acumulación de toxicidad de B en las raíces de las plantas, especialmente en suelos con deficiencia de zinc (Adiloglu y Adiloglu, 2006).

La deficiencia de zinc se correlaciona fuertemente con la aplicación de Zn en bandas o al voleo. Se pueden aplicar pequeñas cantidades de zinc a las semillas como una forma de corregir la deficiencia de zinc en el maíz. La aplicación extensiva de ZnSO₄ seguida de la

incorporación previa a la siembra aumentó el crecimiento temprano y el rendimiento de grano en el maíz. Tasas de aplicación más altas aumentaron las concentraciones de Zn en plantas de maíz jóvenes y casi maduras. También demostraron que una pequeña cantidad de N-banding con $ZnSO_4$ mejoró la eficiencia de los fertilizantes de Zn (Lisuma *et al.*, 2006).



Figura 7: Síntomas de deficiencia de zinc en plantas de maíz.

Fuente: CIMMYT, 2004.

3.6. Problemas ambientales

La producción de maíz es probablemente el mayor usuario de fertilizantes del mundo, e incluso con el manejo nutricional más eficiente, la eficiencia de los nutrientes aplicados siempre es baja (<50%). La baja eficiencia de los nutrientes utilizados, especialmente N, tiene graves consecuencias económicas y ecológicas. Por lo tanto, el uso excesivo e inadecuado de fertilizantes y fertilizantes en la producción de maíz ha generado preocupaciones generales sobre la contaminación de las aguas superficiales, subterráneas y la liberación de nitrógeno gaseoso que contamina el medio ambiente (Christensen, 2002). Aunque existen múltiples vías de pérdida de N de los campos de maíz, las principales vías de pérdida de N ocurren a través de la volatilización de NH_3 , la lixiviación de NO_3 y las emisiones de N_2O (particularmente a través de la desnitrificación). Las pérdidas de nitrógeno de las plantas como NH_3 pueden llegar a ser de 52 a 73 L para fertilizantes 15N etiquetados en campos de maíz (Francis *et al.*, 1993). En estudios de labranza, las pérdidas de nitrógeno gaseoso debidas a la desnitrificación del nitrógeno fertilizado son de hasta un 10 % en maíz con labranza convencional y de hasta un 22 % en maíz sin labranza (Hilton *et al.*, 1994). Las pérdidas por lixiviación de NO_3 -N dependen de la cantidad de NO_3 residual en el suelo, los fertilizantes nitrogenados y aplicados, la temperatura del suelo y las precipitaciones estacionales y/o la tasa de mineralización de MO dependiente del drenaje. La lixiviación de nitratos es más grave en suelos arenosos bien drenados, pero también puede ocurrir en suelos

piedra caliza y esquisto de tierras altas bien drenados. En Ontario, Drury *et al.*, (1996) estimaron un máximo de 26 kg ha⁻¹ año. NO₃ - -N se pierde a través del drenaje de las capas. La desnitrificación es más severa en suelos mal drenados, pero también puede ocurrir en suelos saturados de agua. En Alemania, Hermann *et al.*, (2005) concluyeron que la producción de maíz forrajero se caracteriza por una sobreoferta significativa de N, lo que ofrece una amplia oportunidad para reducir el consumo de N sin riesgo de pérdida de rendimiento. Por lo tanto, los fertilizantes deben usarse con prudencia para maximizar las ganancias, optimizar la calidad de los cultivos, conservar energía y proteger el medio ambiente (Schröder *et al.*, 2000). En esta sección, se analizan diferentes formas de pérdida de nutrientes de los campos de maíz en relación con los impactos ambientales.

3.7. Manejo Integrado de Nutrientes Vegetales.

El material vegetal cosechado y los tratamientos de residuos, o el agotamiento de los nutrientes a través de la lixiviación, la escorrentía superficial y la erosión del suelo, acentúa la fertilidad inherente a menudo muy baja de muchos suelos en los trópicos (Syers, 1997). La sostenibilidad del sistema de cultivo requiere que los nutrientes extraídos del suelo se equilibren mediante la sustitución de nutrientes para mantener o mejorar la fertilidad del suelo (Ma *et al.*, 2006). Los fertilizantes químicos por sí solos no pueden sostener la productividad a largo plazo en muchos suelos y se requieren aportes de materia orgánica para restaurar los niveles de MO y la productividad de las plantas (Syers, 1997). Por lo tanto, mejorar la producción sostenible de alimentos requiere estrategias integradas para utilizar diferentes fuentes de nutrientes vegetales junto con una mejor gestión del suelo, el agua y los cultivos (Keerthisinghe *et al.*, 2003). En la producción de maíz, las decisiones de manejo de nutrientes del agricultor afectan la cantidad y la forma de los nutrientes utilizados, el momento y el método de fertilización, lo que a su vez afecta la cantidad de nutrientes utilizados por la planta de maíz y almacenados como residuos en el suelo. y cuánto está disponible como contaminante potencial del agua y el aire (Christensen, 2002).

El manejo integrado de nutrientes (MIN) se refiere a un enfoque que integra las fuentes de nutrientes vegetales disponibles para cumplir con los requisitos de nutrientes de las plantas para un rendimiento óptimo y al mismo tiempo mantener la fertilidad deseada del suelo (FAO, 1996). El MIN busca integrar todos los medios disponibles de manejo de suelos y cultivos para lograr una productividad regional óptima de la tierra bajo un manejo sostenible de suelos y fertilidad (Subedi y Sapkota, 2002).

Todas las fuentes de nutrientes de las plantas deben ser consideradas para optimizar el rendimiento y la calidad mientras se minimiza el impacto ambiental de estas fuentes de nutrientes para proporcionar una base sólida para los sistemas de producción de alimentos flexibles, capaces de producir una amplia gama de cultivos para satisfacer la demanda dentro de las limitaciones del suelo y el clima (FAO, 1998). El papel del MIN parece ser muy importante en los sistemas agrícolas de subsistencia. Esto se debe a que los suministros de nutrientes siempre son limitados y la degradación del suelo es una gran amenaza para la producción y el medio ambiente. Se deben considerar los siguientes pasos clave al diseñar e implementar el manejo de nutrientes específico del sitio para un dominio o sistema de cultivo en particular:

- Evaluación del estado del suelo: la información sobre los parámetros del suelo, como la MOS, el pH, la disponibilidad de nutrientes, la textura, el alcance de la lixiviación de nutrientes y la erosión, se recopilará mediante visitas al sitio y análisis de laboratorio.
- Establecimiento del objetivo de rendimiento: con base en la disponibilidad de recursos agrícolas, se establecen los niveles de rendimiento esperados para el cultivo bajo un sistema de producción en particular.
- Cálculo del balance de nutrientes: en base a las dos estimaciones anteriores, se puede calcular un balance de nutrientes (es decir, entrada-salida) que indica cuánto y qué nutrientes se agregarán.
- Listado de las fuentes de nutrientes disponibles: todas las disponibles internas (a nivel de finca) y externas considerando las fuentes de nutrientes (compradas).
- Integrar todas las posibles fuentes de nutrientes
- Determinar la cantidad, el momento y los métodos de aplicación de estiércol y fertilizantes para un determinado cultivo, sistema de cultivo y tipo de tierra.
- Seguimiento y monitoreo: una vez que se aplica el estiércol y los fertilizantes en base a las evaluaciones anteriores, el monitoreo periódico de los campos de maíz es importante para abordar las deficiencias durante la temporada, si las hubiere, inducidas por la variabilidad climática, como exceso de lluvia o sequía y solución de problemas para tales deficiencias.

En un sistema MIN, los suelos, los cultivos y los nutrientes se gestionan cuidadosamente en función del entorno de decisión existente, como los sistemas de cultivo, las propiedades del

suelo, la mano de obra, las fuerzas del mercado y la equidad (Subedi y Sapkota, 2002). Varios factores influyen en el rendimiento de los cultivos y los requisitos nutricionales. Con este fin, las propiedades del suelo (textura, MO, nutrientes residuales, etc.), los factores climáticos (precipitación, temperatura), los sistemas de cultivo (cultivos anteriores, sistemas de labranza), las variedades de plantas (potencial de rendimiento) y las consideraciones económicas y de mercado (precios de grano y fertilizantes) deben tenerse en cuenta al hacer recomendaciones para la aplicación de estiércol y fertilizantes.

Las fuentes de nutrientes orgánicos, inorgánicos y de otras plantas se integran junto con las opciones de cultivo y manejo del suelo al determinar las cantidades de fertilizante. Es una estrategia para incorporar fitonutrientes orgánicos e inorgánicos para aumentar la productividad de los cultivos, prevenir la degradación del suelo y satisfacer las necesidades alimentarias futuras. Por lo tanto, la NIM se basa en una serie de factores, incluida la aplicación y el almacenamiento adecuados de nutrientes y la transferencia de conocimientos (Gruhn *et al.*, 2000).

3.8. Conclusiones

- La producción exitosa de maíz requiere un manejo nutricional adecuado para maximizar el rendimiento. Los híbridos de maíz requieren mucha fertilización para producir con éxito. Por lo tanto, el maíz extrae del suelo 90 Kg. De N, 27 Kg. de P_2O_5 , 26 Kg. K_2O , 11 kg. de Ca, 13 kg. de Mg; 10 Kg. de S, por cada 100 quintales de grano de maíz.
- El propósito de la fertilización es proporcionar cantidades adecuadas de nutrientes durante las etapas de crecimiento y floración donde más se necesitan.

3.9. Bibliografía

Adiloglu, A. and Adiloglu, S. (2006). The effect of boron (B) application on the growth and nutrient contents of maize in zinc (Zn) deficiency. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences*, 2(1), 1-4.

Alarcon, A. (2001). El boro como nutriente esencial. *Tecnología de producción*. Universidad Politécnica de Cartagena., 19.

Arnon, D.I. and Stout, P.R. (1939). The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology*, 14, 371-375.

- Arvaidiya L.K. Raj V.C. Patel T.U. Arvadia M.K. (2012) Influence of plant population and weed management on weed flora and productivity of sweet corn (*Zea mays*). *Indian Journal of Agronomy*, 57 (2): 162-167.
- Bajželj, B.; Richards, K.S.; Allwood, J.M.; Smith, P.; Dennis, J.S.; Curmi, E.; Gilligan, C.A. 2014. Importance of food-demand management for climate mitigation. *Nat. Clim. Chang.* 4, 924.
- Barbazán, M., Bautes, C. Beux, L., Bordoli, M., Cano, J., Ernst, O., García A., García, F. y Quincke, A. (2011). Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia, Uruguay Volumen 15*, N° Montevideo, Uruguay.
- Bittman, S.; Hunt, D.E. and Kowalenko, C.G. (2004). Cover crops and relay crops. Pp. 89-94. In: S. Bittman and C.G. Kowalenko (eds.) *Advances in Silage Corn Management*. Pacific Field Corn Association, Agassiz, BC, Canada.
- Brown (1970). *Plant Analysis*. Missouri Agricultural Experimental Station Bulletin. SB881.
- Christensen, L.A. (2002). Soil, nutrient and water management systems used in US corn production. *Agriculture Information Bulletin No. 774*, United States Department of Agriculture (USAID), USA.
- Ciampitti, I. A., Camberato, J. J., Murrell, S. T., y Vyn, T. J. (2013). Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Agronomy Journal*, 105(3), 783–795.
- Cui, Y. and Wang, Q. (2006). Physiological responses of maize to elemental sulphur and cadmium stress. *Plant, Soil and Environment*, 52, 523-529.
- Danforth, A. (2009). *Corn Crop Production Growth, Fertilization and Yield*. Editor: ISBN 978-1-60741-955-6- Nova Science Publishers, Inc.
- Diaz, H 2017. Influencia de tres fuentes potásicas aplicadas en dos épocas sobre el rendimiento del maíz amarillo duro (*Zea mays* L.), Universidad Católica Sedes Sapientiae. Huacho, Perú. Tesis de Investigacion.51p.

- Driskell, B.N. and Richer, A.C. (1952). Correlation of plant tissue tests of corn, deficiency symptoms, and soil analyses on Jordan fertility. *Soil Science Society of America Journal*, 16, 270.
- Driskell, B.N. and Richer, A.C. (1952). Correlation of plant tissue tests of corn, deficiency symptoms, and soil analyses on Jordan fertility. *Soil Science Society of America Journal*, 16, 270.
- Drury, C.F.; Tan, C.S.; Gaynor, J.D.; Oloya, T.O. and Welacky, T.W. (1996). Influence of controlled drainage-subirrigation on surface and tile drainage nitrate loss. *Journal of Environmental Quality*, 25, 317-324.
- Dwivedi, S.K.; Singh, R.S. and Dwivedi, K.N. (2002). Effect of sulphur and zinc nutrition on yield and quality of maize in Typic ustochrept soil of Kanpur. *Journal of Indian Society of Soil Science*, 50, 70-74.
- Echeverría, H., Sainz, H., y Barbieri, P. (2014). Maíz y Sorgo. En Hernan. Echeverría & F. García (Eds.), *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos* (2a ed., pp. 425–451). Buenos Aires - Argentina: INTA Editorial.
- FAO. (1998). *Guide to Efficient Plant Nutrition Management*. Pp. 18. Food and Agriculture Organization (FAO), Rome, Italy.
- FAO. 1996. The state of the world's plant genetic resources: diversity and erosion. Third World Resurgence. *Farmers' Rights and the Battle for Agrobiodiversity*. Issue No. 72/73 KDN PP6738/1/96. An excerpt from the Report on the State of the World's Plant Genetic Resources prepared by the FAO Secretariat for the International Technical Conference on Plant Genetic Resources at Leipzig, Germany, 17–23 June 1996.
- Feil, B.; Moser, S.B.; Jampaton, S. and Stamp, P. (2005). Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization. *Crop Science*, 45, 516-523.
- Flores, H. D. (2014). *Guía técnica El cultivo de maíz*. Obtenido de <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/granos%20basicos/GuiaTecnica%20Maiz%202014.pdf>.

- Francis, D.D.; Schepers, J.S., and Vigil, M.F. (1993). Post anthesis nitrogen loss from corn. *Agronomy Journal*, 85:659-663.
- Gruhn, P.; Goletti, F. and Yudelman, M. (2000). Integrated nutrient management, soil fertility, and sustainable agriculture: Current issues and future challenges. Food, Agriculture, and the Environment Discussion Paper 32. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C. 20006 U.S.A.
- Gudelj, V; Vallone, P; Galarza, C; Anselmi, H; Donadio, H; Salafia, ; Videla M, Horacio; C. 2017 Fertilización en. Resultado de experimentos de fertilización con nitrógeno, fósforo, azufre y zinc. Informe de Actualización Técnica en línea N° 8, EEA INTA Marcos Juárez, paginas 45-51.
- Hanway, J.J. (1962). Corn growth and composition in relation to soil fertility: III. Percentages of N, P and K in different plant parts in relation to stage of growth. *Agronomy Journal*, 54, 222-229.
- Herrmann, A. and Taube, F. (2005). Nitrogen concentration at maturity - an indicator of nitrogen status in forage maize. *Agronomy Journal*, 97, 201-210.
- Hilton, B.R.; Fixen, P.E. and Woodward, H.J. (1994). Effects of tillage, nitrogen placement, and wheel compaction on denitrification rates in corn cycle of corn-oats rotations. *Journal of Plant Nutrition*, 17, 1341-1757.
- Hitsuda, K.; Yamada, M. and Klepker, D. (2005). Sulfur requirement of eight crops at early stages of growth. *Agronomy Journal*, 97, 155-159.
- Ibrahim, S.A. and Kandil, H. (2007). Growth, yield and chemical constituents of corn (*Zea mays* L.) as affected by nitrogen and phosphorus fertilization under different irrigation intervals. *Journal of Applied Science Research*, 3, 1112-1120.
- INIAP. (2012). Producción de maíz amarillo duro en la zona central del litoral ecuatoriano. Quevedo: Departamento de maíz de la estación experimental tropical Pichilingue.
- INTA, 2008. Manejo de la fertilización del maíz. Disponible en:<http://www.inta.gov.ar/ediciones/idia/cereales/maiz08.pdf>.

- Johnston, A.M. and Dowbenko, R. (2004). Essential elements in corn. Pp.23-27. In: S. Bittman and C.G. Kowalenko (eds.) *Advances in Silage Corn Management*. Pacific Field Corn Association, Agassiz, BC, Canada.
- Jones, C. and Jacobson, J. 2005. *Plant Nutrition and Soil Fertility. Nutrient Management Module No. 2*. Montana State University Extension Services. 4449-2.
- Keerthisinghe, G.; Zapata, F. and Chalk, P. (2003). *Plant Nutrition: Challenges and Task Ahead*. Paper Presented in the IAF-FAO Agricultural Conference. Rome Italy, 26-28 March, 2003.
- Kowalenko, C.G. (2004). Determining nutrients available in soil. Pp. 27-33. In: S. Bittman and C.G. Kowalenko (eds.) *Advances in Silage Corn Management*. Pacific Field Corn Association, Agassiz, BC, Canada.
- Legg, J.O. and Meisinger, J.J. (1982). Soil nitrogen budget. Pp. 503-566. In: F.J. Stevenson (ed.) *Nitrogen in agricultural soils. Agronomy – A series of Monographs*. No. 22. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI, USA.
- Lisuma, J.B.; Semoka, J.M.R. and Semu, E. (2006). Maize yield response and nutrient uptake after micronutrient application on a volcanic soil. *Agronomy Journal*, 98, 402-406.
- Lithourgidis, A.S.; Matsi, T.; Barbayiannis, N. and Dordas, C.A. (2007), Effect of liquid cattle manure on corn yield, composition, and soil properties. *Agronomy Journal*, 99, 10411047.
- Long, S.P.; Ort, D.R. 2010. More than taking the heat: Crops and global change. *Curr. Opin. Plant Biol*, 13, 240–247.
- Ma, B.L.; Subedi, K.D. and Liu, A. (2006). Variation in grain N removal associated with management practices in maize production. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 76, 6780.
- Malakouti, M. J. (2008). The effects of micronutrients in ensuring efficient use of micronutrients. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32, 215-220.
- Melgar, R. y Torres Duggan, M. (2014) *Manejo de la Fertilización en Maíz*. Proyecto Fertilizar EEA INTA Pergamino; Proyecto Fertilizar. Disponible en:

[http://www.fertilizando.com/articulos/manejo%20de%20la%20fertilizacionen%20maiz .asp](http://www.fertilizando.com/articulos/manejo%20de%20la%20fertilizacionen%20maiz.asp).

- Muchow, R.C. (1998). Nitrogen utilization efficiency in corn and sorghum. *Field Crops Research*, 56, 209-216.
- Pearson, C.J. and Jacobs, B.C. (1987). Yield components and nitrogen partitioning in maize in response to nitrogen before and after anthesis. *Australian Journal of Agricultural Research*, 38, 1001-1009.
- Preetha, P S , Stalin P (2014). Response of Maize to Soil Applied Zinc Fertilizer under Varying Available Zinc Status of Soil. *Indian Journal of Science and Technology*, 7 : 939-944.
- Rajcan, I. and Tollenaar, M. (1999). Source: sink ratio and leaf senescence in maize. I. Dry matter accumulation and partitioning during kernel filling. *Field Crops Research*, 60, 245-253.
- Raza, A.; Razzaq, A.; Mehmood, S.S.; Zou, X.; Zhang, X.; Lv, Y.; Xu, J. 2019. Impact of climate change on crops adaptation and strategies to tackle its outcome: A review. *Plants*, 8, 34.
- Ruiz Diaz, D.A.; Hawkins, J.A.; Sawyer, J.E. and Lundvall, J.P. (2008). Evaluation of in-season nitrogen management strategies for corn production. *Agronomy Journal*, 100, 1711-1719.
- Schröder, J.J.; Neeteson, J.J. Oenema, O. and Struik, P.C. (2000). Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in corn production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research*, 66, 151-161.
- Stevens, W.B.; Hoefl, R.G. and Mulvaney, R.L. (2005). Fate of nitrogen-15 in a long-term nitrogen rate study: I. Interactions with soil nitrogen. *Agronomy Journal*, 97, 1030-1045.
- Subedi, K.D. and Ma, B.L. (2009). Assessment of some major yield-limiting factors on maize production in a humid temperate environment. *Field Crops Research*, 110, 21-26.

- Subedi, K.D. and Sapkota, G.P. (2002). Integrated plant nutrient management (IPNM) in maize: Pilot testing of IPNM with farmers in Sindhupalanchowk. Pp.163-169. In: N.P. Rajbhandari, K.K. Ransom, K. Adhikari and A.F.P. Palmer (eds.) Sustainable maize production systems for Nepal. Proceedings of a Maize Symposium held December 3-5, 2001, Kathmandu, Nepal.
- Subedi, K.D.; Ma, B.L. and Smith, D.L. (2006). Response of leafy and non-leafy maize hybrid to plant population densities and fertilizer nitrogen levels. *Crop Science*, 46, 1860-1869.
- Programa de Maíz del CIMMYT. (2004). Enfermedades del maíz. Una guía para su identificación en el campo. Cuarta edición. México, D.F.; CIMMYT.
- Syers, J.K. (1997). Manging soil for long-term productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (B)* 352, 1011-1021.
- Ummenhofer, C.C.; Meehl, G.A. 2017. Extreme weather and climate events with ecological relevance: A review. *Philos. Trans. R. Soc. Biol. Sci.* 372, 20160135.
- Valverde, R. (2010). Manejo de nutrientes por sitio específico con labranza mínima; experiencias en generación de recomendación de fertilización de maíz. En S. e. suelo, XII congreso ecuatoriano de la ciencia del suelo (pág. 8). Santo Domingo - Ecuador: Universidad Técnica Equinoccial.
- Wang, X.; Fan, J.; Xing, Y.; Xu, G.; Wang, H.; Deng, J.; Wang, Y.; Zhang, F.; Li, P.; Li, Z. 2019. Chapter three—The effects of mulch and nitrogen fertilizer on the soil environment of crop plants. In *Advances Agronomy*; Sparks, D.L., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA; Volume 153, pp. 121–173.
- Worku, M.; Banziger, M.; Erley, G. S.; Friesen, D.; Diallo, A.O. and Horst, W.J. (2007). Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids. *Crop Science*, 47, 519-528.

Capítulo IV. Manejo integrado de plagas y enfermedades.

Edwin Stalin Hasang Moran

Universidad Agraria del Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-6832-2047>

Arturo Enrique Alvarado Barzallo

Universidad Agraria del Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-9806-9684>

Antonio Gonzalo Álava Murillo

Universidad Agraria del Ecuador

<https://orcid.org/0000-0002-9786-7879>

Danny Daniel Avilés Párraga

Universidad Agraria del Ecuador

<https://orcid.org/0000-0001-7829-3075>

Fernando Javier Cobos Mora

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

4.1. Introducción

Se cree que el maíz (*Zea mays* L.) es originario de México y América Central (Schnable *et al.*, 2009). Actualmente es el cereal básico más producido seguido por el trigo y el arroz en el mundo con una producción de 1033,74 millones de toneladas métricas de 197 millones de hectáreas (FAOSTAT, 2017). Se la conoce popularmente como la “Reina de los cereales” debido a su mayor adaptabilidad y mayor potencial de rendimiento genético entre los cultivos de cereales (Brar *et al.*, 2017). En 2014, se sembraron con maíz 183.319.737 hectáreas de tierra en todo el mundo (USDA, 2015). El maíz fue considerado como principal cultivo de cereales del mundo en 2018/2019, debido a que su producción ronda los 1099,61 millones de toneladas métricas en comparación con otros cultivos de cereales como el trigo (734,74 millones de toneladas métricas), el arroz (495,87 millones de toneladas métricas) y la cebada. (104,6 millones de toneladas métricas) (Estadística, 2019). El maíz es muy importante en los países en desarrollo, donde la población en rápido crecimiento ha superado oficialmente los suministros de alimentos accesibles (Reddy *et al.*, 2013). Se estima que el maíz será el cultivo más importante del mundo en desarrollo y de aquí al 2050 se espera que la demanda de maíz en el mundo en desarrollo se duplique (CIMYYT, 2019).

El maíz es atacado por numerosas plagas de insectos y enfermedades en diferentes etapas de crecimiento de la planta, lo que causa daños en todas las partes de la planta, incluidas la raíz, el tallo, las hojas, las espigas y el grano (Mathur, 1991). La infestación de insectos en el cultivo de maíz puede dañar gravemente el grano de maíz, por lo que reducirá la calidad del cultivo. Se informó que aproximadamente 250 especies de insectos dañaron este cultivo en todo el mundo, pero solo media docena de esos insectos se clasificaron como de importancia económica (Mathur, 1991). Algunas de las principales plagas de insectos que se informan que atacan al maíz son el gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), el gusano de la raíz (*Diabrotica virgifera*), el pulgón de la hoja del maíz (*Rhopalosiphum maidis*) (Fishilevich *et al.*, 2016; Olmstead *et al.*, 2016). Por otro lado, el maíz también sufre el ataque de microorganismos patógenos, algunos de esos culpables invisibles son *Puccinia sorghi*, *Erwinia carotovora*, *Curvularia lunata*, *Rhizoctonia solani* y *Ustilago maydis* (DOA, 2019). Las enfermedades de las plantas causadas por hongos, bacterias y virus pueden afectar a todas las partes de la planta, incluidas las raíces, los tallos, las hojas y las mazorcas. Este último puede tener el mayor efecto en el rendimiento cuando se trata de cosechar el cultivo, ya que la calidad del maíz se ve afectada negativamente.

Aproximadamente, las pérdidas directas de rendimiento causadas por plagas oscilan entre el 20 % y el 40 % de la productividad agrícola mundial (Savary *et al.*, 2012). La infestación de insectos por sí sola destruye un estimado de 18-26 % de la producción anual de cultivos en todo el mundo, con un valor de pérdidas de aproximadamente más de \$ 470 mil millones, donde la mayor proporción de pérdidas (13-16 %) ocurre en el campo, antes del proceso de cosecha (Culliney, 2014). Se informa que el cultivo de maíz en sí está limitado por enfermedades que causan pérdidas de grano de alrededor del 11% de la producción total (Tagne *et al.*, 2008) donde la infección por hongos se encuentra entre las principales causas del deterioro y pérdida del grano de maíz (Tsedaley y Adugna, 2016) y ocupa el segundo lugar después de los insectos (Rashid *et al.*, 2013).

4.2. Manejo integrado de plagas

En 1959, entomólogos de la Universidad de California en Berkeley, Vernon Stern, Ray Smith, Robert van den Bosch y Kenneth Hagen, publicaron un artículo titulado “La integración de productos químicos y el control biológico del pulgón manchado de la alfalfa”. En este documento, ofrecieron la siguiente declaración sobre el concepto de control integrado:

Cualquiera que sea la razón de nuestros crecientes problemas de plagas, se está volviendo cada vez más evidente que se debe desarrollar un enfoque integrado, utilizando tanto un control biológico como químico, en muchos de nuestros problemas de plagas si queremos rectificar los errores del pasado y evitar problemas similares en el futuro.

Estos autores definieron muchos términos y conceptos, ahora bien, conocidos por entomólogos, patólogos de plantas, científicos de malezas y practicantes de MIP, tales como umbral económico, nivel de daño económico y posición de equilibrio general. Las siguientes definiciones se proporcionan a partir de Stern *et al.*, (1959):

Nivel de daño económico. La densidad de población más baja que causará daño.

Límite económico. La densidad a la que deben determinarse las medidas de control para evitar que una población de plagas en aumento alcance el nivel de daño económico.

Posición de equilibrio general. La densidad promedio de una población durante un período de tiempo (generalmente prolongado) en ausencia de un cambio ambiental permanente.

El control integrado se definió como el control de plagas aplicado que combina e integra el control biológico y químico, empleando el uso de umbrales económicos para determinar cuándo se debe utilizar el control químico para evitar que las plagas alcancen el nivel de daño económico. El concepto de control integrado ha evolucionado hacia el concepto de MIP que incluye insectos, patógenos de plantas, malezas y plagas de vertebrados. Dado que los principios iniciales del concepto de control integrado se desarrollaron en respuesta a las plagas de insectos, no todos los principios básicos encajan bien con respecto al manejo integrado de malezas, patógenos de plantas y plagas de vertebrados. Knake & Downs (1979) indicaron que el MIP debe ser un enfoque interdisciplinario en lugar de simplemente combinar varias opciones de control dentro de una disciplina: “Las malezas albergan insectos y enfermedades, las enfermedades pueden matar insectos y malas hierbas, y los insectos pueden usarse para controlar otros insectos y malas hierbas”.

4.3. Tipos de plagas

La selección de una estrategia y los componentes de un programa de MIP están influenciados en gran medida por el estado de una plaga en relación con su huésped. Los profesionales del MIP suelen reconocer cuatro tipos de plagas: (1) subeconómicas, (2) ocasionales, (3) perennes y (4) graves (Pedigo & Rice, 2006).

1) La posición de equilibrio general de una plaga subeconómica siempre está por debajo del nivel de daño económico, incluso durante sus picos de población más altos. Un insecto en esta categoría puede causar pérdidas directas, pero si los valores del huésped (cultivo) son modestos y las densidades de plagas son siempre bajas, entonces no es apropiado iniciar prácticas de control cuyos costos excedan el valor del daño del huésped.

(2) La posición de equilibrio general de una plaga ocasional está casi siempre por debajo del nivel de daño económico, pero ocasionalmente los picos de población superan este nivel. La plaga ocasional es un tipo de plaga muy común. Puede estar presente en o cerca de un huésped casi todos los años, pero solo esporádicamente causa daños económicos.

(3) La posición de equilibrio general de una peste perenne está por debajo del nivel de daño económico, pero las poblaciones máximas ocurren con tanta frecuencia que el daño económico generalmente ocurre anualmente.

4) Una plaga severa tiene una posición de equilibrio general que siempre está por encima del perjuicio económico nivel para que cuando ocurran en o sobre un host, el daño económico es siempre el resultado final. Como podría esperarse, plagas perennes y severas causar los daños más graves y difíciles Desafíos en un programa de MIP.

4.4. Estrategias y tácticas para el manejo de plagas

Una estrategia de manejo de plagas es el enfoque total para eliminar o reducir una plaga real o percibida problema. El desarrollo de una estrategia particular estará muy influenciado por la biología y ecología de la plaga y su interacción con un huésped o ambiente. El objetivo debe ser reducir las plagas. estado al abordar los problemas mediante el manejo de plagas. Debido a que tanto la plaga como el huésped determinan el estado de la plaga, la modificación de uno o ambos pueden enfatizarse en un programa de gestión. Por lo tanto, cuatro tipos de estrategias (Pedigo & Rice, 2006) podría desarrollarse en base a plagas características y economía de la gestión: (1) no hacer nada, (2) reducir el número de plagas, (3) reducir susceptibilidad del huésped al daño de plagas y (4) combinar Poblaciones reducidas de plagas con susceptibilidad reducida del huésped. Una vez que una estrategia de manejo de plagas ha sido desarrollado, los métodos de implementación de la se puede elegir la estrategia. Estos métodos se llaman tácticas de manejo de plagas, y varias tácticas pueden utilizarse para implementar una estrategia de gestión.

Estrategia sin acción

Todos los daños causados por plagas no causan una pérdida económica a un huésped, muchos huéspedes, especialmente plantas y ocasionalmente animales aliados, pueden tolerar pequeñas cantidades de lesión sin sufrir perjuicio económico. Eso no es raro que se produzcan lesiones bajas por insectos. Este es más probable que ocurra cuando la población de la plaga no se considera en relación con un umbral económico. Si la densidad de la plaga está por debajo del umbral económico, entonces la estrategia de no hacer nada es el enfoque correcto; de lo contrario el dinero invertido en el control que no daría lugar a un beneficio neto. La estrategia de no hacer nada frecuentemente se utiliza cuando los insectos causan daños indirectos a un huésped, o cuando un programa exitoso de manejo de plagas reduce la población de plagas y sólo la vigilancia de la población restante es necesario. No se utilizan tácticas en la estrategia de no hacer nada, pero esto no implica que no sea necesario ningún esfuerzo o que la supresión de plagas no está ocurriendo. Se requiere la población de plagas para determinar que la estrategia de no hacer nada es la respuesta adecuada y las influencias ambientales pueden reducir la población, lo que resulta en la supresión de plagas.

Reducir el número de plagas

Reducir la densidad de plagas para aliviar o prevenir problemas es probablemente la estrategia más utilizada en el manejo de plagas. Esta estrategia a menudo se emplea de manera terapéutica cuando las poblaciones alcanzan el umbral económico o de manera preventiva a partir de problemas históricos (Pedigo & Rice, 2006). Dos objetivos pueden ser deseable en el intento de reducir las densidades de plagas. Si la densidad promedio a largo plazo de la plaga, o la posición de equilibrio general, es baja en comparación con el umbral económico, entonces el mejor enfoque sería disminuir los picos de población del parásito. Esta acción no cambiaría apreciablemente la posición de equilibrio general de la plaga, pero debería evitar que se produzcan daños durante los brotes de plagas. Sin embargo, si la población general de plagas en posición de equilibrio está cerca o por encima del umbral económico, entonces el equilibrio general de la posición debe ser bajada para que el pico más alto de las poblaciones nunca alcance el umbral económico. Esto puede lograrse ya sea reduciendo la capacidad de carga del medio ambiente, o reduciendo el potencial reproductivo y/o de supervivencia heredado de la población (Pedigo & Rice, 2006). Existe muchas tácticas que se pueden usar para reducir las plagas. que incluyen huéspedes resistentes, insecticidas, feromonas, trampeo mecánico, enemigos naturales, reguladores del

crecimiento de insectos, liberación de insectos esterilizados y modificación del medio ambiente.

Reducir la susceptibilidad del huésped a las plagas

Uno de los más compatibles con el medio ambiente y estrategias efectivas es reducir la susceptibilidad del huésped al daño por plagas. Esta estrategia no modifica la población de plagas; en cambio el anfitrión en relación e interacción con la plaga es cambiado para hacerlo menos susceptible a un potencial daño de plagas. Una forma común de esta estrategia es donde cultivares de plantas o razas de animales se desarrollan con un tipo de resistencia, conocido como tolerancia, que otorga mayor resistencia a una plaga que una planta o animal similar sin la tolerancia. La tolerancia expresada por una planta o animal no reduce la población de plagas atacantes, pero el daño causado por las plagas tiene menos efecto perjudicial sobre el huésped (es decir, pérdida de rendimiento en plantas o pérdida de peso en animales). El otro componente de esta estrategia, es la modificación ecológica de los factores que influyen en la distribución o abundancia de una plaga, también puede reducir la susceptibilidad del huésped.

4.5. Ejemplos de implementación exitosa de MIP en maíz.

Manejo ecológico del medioambiente. El maíz (*Zea mays*) y el sorgo (*Sorghum bicolor*), dos alimentos principales en el este de África, son atacados por lepidópteros barrenadores del tallo. Los agricultores combinan el uso de cultivos intercalados y cultivos trampa, utilizando plantas que son apropiadas para los agricultores y aprovechan los enemigos naturales. Los barrenadores del tallo son repelidos del maíz y el sorgo por no huéspedes como el desmodium de hoja verde (*Desmodium intortum*), el desmodium de hoja plateada (*Desmodium uncinatum*) y la hierba de melaza (*Melinis minutiflora*), que se intercalan con el maíz o el sorgo (el empuje). Alrededor de los bordes del campo se plantan cultivos trampa, principalmente pasto Napier (*Pennisetum purpureum*) y pasto Sudán (*Sorghum vulgare sudanense*), que atraen y concentran las plagas (la atracción). Estas gramíneas tienen un doble propósito ya que también se utilizan como forraje para el ganado. La hierba de melaza, como cultivo intercalado, reduce las poblaciones de barrenadores del tallo al producir sustancias volátiles repelentes de barrenadores del tallo; también aumenta el parasitismo por una avispa parasitoide. Desmodium también produce sustancias volátiles repelentes similares; pero también produce sesquiterpenos que suprimen la maleza africana parásita (*Striga hermonthica*), una de las principales limitaciones de rendimiento de las tierras de

cultivo en el este de África. Los compuestos de *Desmodium* estimulan la germinación de semillas de maleza bruja y la subsiguiente mortalidad de las plántulas. La estrategia push-pull ha contribuido a aumentar los rendimientos de cereales y la producción ganadera en África oriental, lo que ha tenido un impacto significativo en la seguridad alimentaria (Cook *et al.*, 2007).

Plantas transgénicas. El barrenador europeo del maíz (*Ostrinia nubilalis*) ha sido considerado por algunos (Ostlie *et al.*, 1997) como la plaga del maíz más dañina en América, con costos de control superiores a \$US 1000 millones entre principios y mediados de la década de 1990. Ocasionalmente, los cultivadores usaban insecticidas para prevenir la formación de túneles en el tallo, el daño del grano y la caída mazorcas en el maíz, pero a menudo eran reacios a adoptar el control químico (Rice & Ostlie, 1997). Las razones de la falta de uso incluyen el hecho de que se oculta el daño, se registran grandes infestaciones impredecibles, los campos tenían que ser explorados de forma continua, los insecticidas eran nocivos para la salud y medio ambiente, costosos y los beneficios del control de insecticidas eran inciertos. Estas preocupaciones allanaron el camino para una novedosa forma de manejar esta plaga mediante el uso de plantas transgénicas.

En 1996, Mycogen Seeds y Novartis Seeds introdujo los primeros híbridos comerciales de maíz Bt, los híbridos Bt fueron genéticamente transformados a expresan un gen de la bacteria del suelo, *Bacillus thuringiensis*, que produce una proteína que es tóxico para las larvas del barrenador europeo del maíz. La mayoría de las larvas mueren después de tomar sólo unos pocos bocados de tejido de hoja de maíz. En consecuencia, el maíz Bt proporciona niveles extremadamente altos de mortalidad larval, lo que resulta en una protección excepcional del rendimiento, incluso durante infestaciones intensas del barrenador europeo del maíz (Ostlie *et al.*, 1997). En 2005, aproximadamente 35% de las hectáreas de maíz fueron sembradas con un híbrido transgénico resistente al barrenador del maíz, el barrenador europeo del maíz ha tenido una disminución constante en la severidad de las poblaciones, lo que lleva algunos a concluir que el insecto se ha vuelto una plaga secundaria (Gray, 2006). Un efecto adicional fue que un porcentaje importante de agricultores, disminuyeron el uso de insecticidas al plantar transgénicos de maíz que resulta en menos insecticidas aplicados a los campos (Pilcher *et al.*, 2002). Los productores de maíz perciben una menor exposición a insecticidas y menos químico en el medio ambiente son los dos principales beneficios de plantar híbridos de maíz transgénico (Wilson *et al.*, 2005). El éxito del Bt transgénico de

maíz, ha llevado al desarrollo de híbridos triples que pueden expresar una proteína para barrenadores del maíz, una proteína diferente para el gusano de la raíz (*Diabrotica spp.*) y resistencia a herbicidas.

4.6. Resistencia a plaguicidas

Aunque muchas investigaciones sobre la resistencia a los insecticidas se han centrado en encontrar el gen responsable, una amplia gama de mecanismos genéticos de la penetración reducida o absorción, desintoxicación, secuestro, insensibilidad del sitio; se han identificado para muchos principios químicos de insecticidas (Brown, 1996). Estos mecanismos no son mutuamente excluyentes y con frecuencia se encuentran en combinación, a menudo con modificadores no caracterizados o genes de “efecto menor”. Los genes modificadores sobre las características del ciclo de vida de la plaga, surgen sobre áreas de campos o granjas individuales, estas escalas temporales de evolución de la resistencia están determinadas por factores tales como: la presión de selección, patrones de resistencia cruzada y plaguicidas asociados, número de mecanismos y otros relacionados pueden contribuir solo con pequeñas cantidades de variación en la tolerancia, pero su correlación potencial con otros rasgos al uso, adaptación requerida, reducción de los efectos, etc. no debe pasarse por alto. Los efectos de resistencia en particular se presentan típicamente como si fueran estáticos, pero pueden permanecer bajo selección en un programa de gestión de la resistencia que se basa en ellos en repetidas ocasiones en los ciclos de selección (Forrester & Bird, 1996).

Características de resistencia

Cuando ocurre la resistencia, típicamente surge en una escala espacial y temporal particular, que depende sobre las características del ciclo de vida de la plaga, particularmente la extensión espacial del flujo de genes, y el patrón de uso de plaguicidas. Los casos de resistencia pueden surgir sobre áreas de campos o granjas individuales a regiones enteras. Después de la ocurrencia inicial normalmente se expandirá geográficamente, pero la tasa de expansión dependerá de los patrones de dispersión de la plaga en múltiples escalas temporales, la resistencia está determinada por factores tales como la presión de selección, flujo génico, estabilidad de la resistencia, presencia de patrones de resistencia cruzada y plaguicidas asociadas al uso, número de mecanismos y otros relacionados (Georghiou, 1986).

¿Prevención o cura?

El manejo de la resistencia puede tomar la forma de prevenir que ocurra en primer lugar o de disminuir la frecuencia de plagas ya resistentes en una población. Los estudios teóricos sugieren que la prevención sólo será posible si la prevención estratégica está en su lugar cuando el gen de resistencia es muy bajo (Tabashnik y Croft, 1982), pero en este punto, la genética de la resistencia suele ser desconocido o en el mejor de los casos una conjetura. Por lo general, se prefiere la prevención, pero la dependencia de los plaguicidas para lograr una reducción de la población económicamente beneficiosa, rápida y completa da como resultado patrones de uso con resistencia muy probable, junto con la probabilidad de ser inestable y manejable. Reduciendo selectivamente la frecuencia de plagas resistentes o aumentando la frecuencia de plagas susceptibles, lo cual requiere medios de selección conductuales o bioquímicos.

La resistencia de patógenos humanos a los antibióticos, ha aportado datos teóricos y empíricos resultados que se han tomado prestados en el desarrollo enfoques para el manejo de la resistencia a los plaguicidas. En particular la cuestión de la dosis baja frente a la alta, o la atención prestada a la erradicación del patógeno con cada uso, se ha aplicado al manejo de resistencia para plagas agrícolas. El enfoque en no dejar sobrevivientes conduce a opciones sobre qué tan agresivamente atacar a la población de plagas, usando solo o múltiples pesticidas simultáneamente. Cuanto más sea la mezcla agresiva de pesticidas y dosis altas, los enfoques maximizan la presión de selección y minimizar el número inicial de organismos resistentes, aumentando potencialmente la eficacia de un espacio refugio (Caprio, 2001). Las tácticas específicas disponibles para manejar la resistencia en las poblaciones de plagas han sido revisadas exhaustivamente (Denholm & Rowland, 1992). Además de las variaciones de uso restringido de un plaguicida dado en el espacio o el tiempo, incluyen el uso de pesticidas, o mezclas de múltiples pesticidas y/o sinergistas, que se sabe que son eficaces para una población resistente a plagas. El objetivo en estos casos, ha sido retrasar más que prevenir la resistencia. Probar estas diversas estrategias es difícil porque tienen lugar a escalas reducidas y en periodos de tiempo relativamente largos. Uno de los pocos estudios de campo a gran escala emprendidos aprovechó focos aislados a lo largo de la costa de México para examinar mosaicos, rotaciones e insecticidas individuales (es decir, la primera etapa de una alternancia. Allí, todas estas estrategias llevaron a niveles elevados de resistencia en mosquitos dentro de un año (Hemingway *et al.*, 1997). Las oportunidades

para la prevención de resistencia merecen una especial atención, a pesar del enfoque al uso de plaguicidas para el control de las plagas.

4.7. Sustentabilidad en el manejo integrado de plagas

Un concepto básico de la agricultura sostenible incluye el uso de recursos de una manera que no agota o daña permanentemente los sistemas utilizados para producción vegetal y animal. En la historia reciente, los humanos sobrevivieron como cazadores-recolectores y tal vez menos del 1% de la biomasa podría usarse como alimento (Diamond, 1997). Como resultado, la mayoría de los recursos no eran utilizados directamente por humanos. La disponibilidad limitada de alimentos también restringió el crecimiento de la población, lo que ayudó a hacer un modo de vida sostenible de los cazadores-recolectores. Por el contrario, la domesticación de cultivos y animales para la alimentación, ha aumentado considerablemente la biomasa comestible, lo que lleva a un dramático crecimiento demográfico y la posibilidad que la producción de alimentos adecuados provocará daños a largo plazo en los sistemas agrícolas.

La alta productividad del siglo XXI en la agricultura es el resultado acumulativo de periodos de cambio llamado revolución verde. Algunos han llamado a los cambios en la agricultura basados en la biotecnología la “revolución genética” porque siguen a la revolución verde del siglo XX, durante el cual las variedades de cultivos de alto rendimiento y otros cambios en la producción se extendió a las naciones en desarrollo. El uso de la biotecnología en la agricultura incluye técnicas bien difundidas como la producción de materiales genéticamente modificados (GM; alternativamente llamado plantas transgénicas o modificadas genéticamente [GE]) y animales, pero también existen técnicas menos controvertidas (Herdt, 2006). Por ejemplo, la biotecnología puede usarse para mejorar o complementar los métodos agrícolas convencionales, como la selección asistida por marcadores que se emplea para el mejoramiento tradicional de cultivos.

Es importante señalar que cada vez que la agricultura avanza, se pueden resolver y crear nuevos problemas relacionados con la sostenibilidad (Evans, 2003). Por ejemplo, en el siglo XX el desarrollo de nuevos insecticidas sintéticos, entregó un control efectivo y duradero de insectos plagas (Casida & Quistad, 1998). sin embargo, los efectos adversos del uso incontrolado de pesticidas, fueron traídos a la atención pública por el libro Primavera

Silenciosa (Carson, 1962). Desde la década de 1960, aumentó regulación y ha reducido considerablemente la amenaza de problemas ambientales y agrícolas derivados del uso excesivo de pesticidas. Por lo tanto, parece razonable predecir que una revolución biotecnológica tendrá efectos tanto positivos como negativos sobre la sostenibilidad.

Contiguo a los cambios en la agricultura y la sociedad durante el último siglo, el concepto de sostenibilidad se ha popularizado y ampliado. Las definiciones de agricultura sostenible revelan que el concepto sugerido anteriormente (usar recursos en una manera que no agote o dañe permanentemente sistemas agrícolas) puede ser demasiado simple. Una definición representativa sugiere que la sostenibilidad en la agricultura “mejora la calidad ambiental que es la base de recursos del que depende la agricultura; cubre las necesidades básicas de fibra y alimentos humanos; es económicamente viable; y mejora la calidad de vida para los agricultores y la sociedad en su conjunto” (Sociedad Americana de Agronomía, 1989). Su comprensión puede ayudar considerando tres componentes comunes asociados con agricultura sostenible: (1) efectos económicos, (2) ambientales y (3) sociales o comunitarios (Lyson, 2002). Aunque la mayoría de las prácticas agrícolas afectan a más de uno de estos tres componentes, las categorías son útiles para organizar el pensamiento sobre la sostenibilidad y enfatizar la amplia naturaleza de la agricultura sostenible.

Potencial para mejorar la sostenibilidad

Muchos temas se relacionan con la sustentabilidad agrícola, pero se puede argumentar que hay dos desafíos básicos (Schaller, 1993). Primero, la agricultura debe ser rentable para aquellos que producen vegetales y alimentos de origen animal para el mundo. En segundo lugar, la agricultura debe ser capaz de producir suficientes alimentos (en cantidad y calidad) para sustentar población creciente que se espera que supere 9000 millones antes del año 2050. Sin embargo, las distinciones entre aplicaciones de la biotecnología que abordan la rentabilidad y la producción pueden no ser muy útiles por dos razones. Primero, porque los ingresos de la agricultura son un incentivo básico para agricultores a permanecer involucrados en la agricultura, las ganancias y la producción están relacionados. En segundo lugar, muchas aplicaciones de la biotecnología influirían claramente tanto la rentabilidad como la producción hasta cierto punto.

Las amenazas más graves para la agricultura la rentabilidad y la producción, son las limitaciones o excesos de recursos básicos requeridos por las plantas y animales (agua, calor, nutrientes, suelo). Incluso en países industrializados como EE.UU, los impactos a corto

plazo como la sequía y a largo plazo está el agotamiento de las aguas subterráneas, que son serios problemas agrícolas y ambientales. Un enfoque para aumentar los rendimientos en condiciones de sequía y reducir el uso de agua, es el desarrollo de cultivos con mayor tolerancia a la sequía. La ingeniería genética se ha utilizado para producir tolerancia a la sequía en muchos cultivos importantes como arroz, trigo, maíz y soya.

La selección asistida por marcadores y la ingeniería genética se han utilizado para producir cultivos tolerantes a otros factores de estrés, incluidos los altos niveles de sal, las inundaciones y las temperaturas extremas. La tolerancia al estrés incorporado en las variedades élite de cultivo, no sólo aumentan los rendimientos en algunas áreas, también permiten que la expansión de la agricultura en áreas no aptas. para la producción de ciertos cultivos.

Manejo de plagas y sostenibilidad

El manejo de plagas es uno de los muchos aspectos de la agricultura y la ingeniería genética, el manejo transgénico de plagas en cultivos, ha sido la aplicación comercialmente más exitosa de la biotecnología agrícola. Los rasgos de tolerancia a herbicidas, resistencia a insectos y resistencia a virus, están actualmente disponibles en maíz, algodón, soya, canola, remolacha, arroz, papaya y alfalfa. Argentina, Brasil, Canadá, China e India se encuentran entre los principales consumidores de cultivos transgénicos, en EE.UU se sembraron aproximadamente 54,6 millones de ha, de las 102 millones de hectáreas de cultivos transgénicos a nivel mundial en el 2006 (James, 2006).

Las combinaciones de cultivos y las características en países tecnificados. incluyen la resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas en maíz, algodón y tolerancia a herbicidas en soya, estos rasgos han estado disponibles comercialmente desde mediados de la década de 1990 con una adopción cada vez mayor del 2000 a 2006. Como resultado, gran parte de la investigación costo-beneficio en biotecnología se relaciona a los rasgos de resistencia a insectos y tolerancia a herbicidas en maíz, algodón y soja, que también han causado el escrutinio por parte de los críticos de los cultivos transgénicos. Aunque algunos problemas no encajan claramente dentro de un solo componente de sostenibilidad, las siguientes secciones evalúan el impacto del manejo de plagas sobre aspectos económicos, ambientales y sociales.

Rentabilidad económica. Para que la agricultura sea rentable, una combinación de mayor rendimiento, calidad y ahorro de costos, debe ser suficiente para compensar el costo adicional asociado a la compra de productos orgánicos, biológicos, etc. El costo adicional por la compra de semillas transgénicas, se conoce comúnmente como una tarifa de tecnología, para el manejo de plagas un agricultor es menos probable que compense el costo adicional, cuando las plagas objetivo (insectos, malezas o patógenos) son ausente o sólo presente en cantidades reducidas o el precio del producto agrícola es bajo.

En los EE. UU., las variedades de maíz transgénico que expresan toxinas activas contra insectos derivadas de la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt), ayuda a ilustrar la economía a veces compleja de la biotecnología. Las primeras variedades de maíz Bt estaban destinadas a controlar en maíz el barrenador (*Ostrinia nubilalis*). Durante 1998 y 1999, los bajos precios del maíz y bajas poblaciones de barrenador, crearon una desventaja económica en maíz Bt (Carpenter & Gianessi, 2001). Los beneficios económicos generales en la reducción del daño por insectos y los costos asociados al uso de insecticidas, están cambiando a medida que los nuevos híbridos expresan toxinas Bt adicionales, agregando Cry3Bb1 o las toxinas Cry34/35Ab1 se utilizan para proteger al maíz, tanto del barrenador del maíz como del gusano de la raíz (*Diabrotica spp*) (Rice, 2004). Del mismo modo, el uso de dos o más toxinas Bt complementarias deberían aumentar el valor económico del maíz Bt al mejorar la toxicidad a grupos de lepidópteros plagas del maíz.

La adopción y rentabilidad de cultivos tolerantes a herbicidas son interesantes, existe poca información sobre los beneficios de cultivos tolerantes a herbicidas. La soya, el cultivo tolerante a herbicidas más cultivado, ha demostrado beneficios económicos en los EE. UU. (Heatherly *et al.*, 2002) y Argentina (Qaim & Traxler, 2005). Un análisis económico de la remolacha azucarera transgénica resistente al glifosato en los EE. UU. también mostró los beneficios del aumento del rendimiento, la calidad y el potencial para reducir los costos de los herbicidas (Kniss *et al.*, 2004). La canola tolerante a herbicidas en Canadá también parece presentar un beneficio económico interesante para los agricultores (Stringam *et al.*, 2003).

Impacto ambiental. La producción de cultivos convencionales o derivados de la biotecnología puede afectar los campos agrícolas y el medio ambiente circundante de muchas maneras diferentes. A continuación, se resumen los posibles efectos de los cultivos

transgénicos y otros cultivos derivados de la biotecnología con respecto a (1) la abundancia y diversidad de especies, (2) la sostenibilidad del manejo de plagas y (3) la salud ambiental en general.

Efectos sobre la abundancia y diversidad de especies. Los posibles efectos no deseados de los cultivos biotecnológicos sobre la abundancia y diversidad de especies, a menudo se denominan efectos no deseados. Para los cultivos GM resistentes a los insectos, los no objetivos, incluyen cualquier especie distinta de las plagas que se pretende controlar. Los efectos de los cultivos derivados de la biotecnología en especies no objetivo se han examinado en cientos de experimentos de laboratorio y de campo. Para los cultivos Bt, las toxinas generalmente afectan solo a unas pocas especies estrechamente relacionadas con las plagas objetivo. Aunque esto puede eliminar efectivamente ciertas plagas dentro de un campo, los impactos adicionales sobre la abundancia y la diversidad se limitan principalmente a otras especies que dependen de las plagas objetivo, como los parasitoides específicos del huésped. Como resultado, el control de insectos con cultivos Bt debería tener un impacto mucho menor en las especies no objetivo que los insecticidas convencionales (de amplio espectro). En comparación con el uso de insecticidas convencionales, los cultivos Bt conservan especies no objetivo que conducen a una mayor abundancia o diversidad de artrópodos (Catta neo *et al.*, 2006) y un mejor control biológico de plagas no susceptibles a las toxinas Bt. (Naranjo, 2005).

Debido a que muchos artrópodos beneficiosos se mueven entre sistemas de cultivo (Prasifka *et al.*, 2004a, b), la conservación de especies no objetivo en campos Bt, también podría mejorar el control biológico de plagas en cultivos cercanos (no transgénicos). Algunas investigaciones han mostrado efectos adversos inesperados de los cultivos Bt en insectos no objetivo (p. ej., larvas de mariposa monarca Losey *et al.*, 1999; crisopas depredadoras Hilbeck *et al.*, 1998), pero en general se ha demostrado que tales estudios son engañosos o científicamente defectuosos (Romeis *et al.*, 2004).

También se han considerado los impactos sobre la biodiversidad vegetal, debido a que el uso de cultivos transgénicos y otros cultivos tolerantes a herbicidas, se reducirá la abundancia y diversidad de malezas y semillas de malezas dentro de los sistemas agrícolas, lo que generará menos insectos y aves herbívoros (Chamberlain *et al.*, 2007). Otra preocupación sugiere que la introducción de cultivos transgénicos ha reducido la diversidad

dentro de las especies de cultivos (Gepts & Papa, 2003), aunque la investigación sobre variedades de algodón y soya en los EE. UU. sugiere que la introducción de variedades transgénicas produjo poco o ningún impacto. sobre la diversidad genética (Sneller, 2003). Además, existen cientos de colecciones del sector público de germoplasma de cultivos y sus parientes silvestres con el propósito de preservar la diversidad.

Sostenibilidad en el manejo de plagas. La mayor amenaza para la sostenibilidad de los cultivos resistentes a insectos y tolerantes a herbicidas es la evolución generalizada de poblaciones de plagas resistentes. Al igual que con el uso convencional de plaguicidas, el aumento de la confianza en un solo rasgo transgénico para controlar plagas de insectos o malezas aumenta la probabilidad que los genotipos resistentes se propagarán. En los EE. UU. y otros países que producen cultivos Bt resistentes a los insectos, los pasos para retrasar la evolución de la resistencia en las plagas objetivo se organizan en planes de manejo de resistencia de insectos (IRM). Los planes de MR describen acciones obligatorias para los agricultores y las empresas de semillas, incluida la plantación de refugios no Bt (Environmental Protection Agency, 2001).

A diferencia de la resistencia a los insectos transgénicos, en el caso de los cultivos transgénicos tolerantes a herbicidas, no se presentan planes concretos para el manejo de la resistencia. La falta de un plan sistemático para retrasar la resistencia puede haber contribuido a la propagación de malezas resistentes al glifosato (Sanderman, 2006). Sin embargo, el desarrollo de malezas resistentes en cultivos tolerantes a herbicidas, no es el resultado del uso de un enfoque biotecnológico al control de malezas, sino de una dependencia excesiva e insostenible de una sola combinación de herbicida y del cultivo tolerante a herbicidas. Para evitar el aumento en la resistencia de las malezas al glifosato y otros herbicidas, debería ser útil verificar la duración del cultivo y las rotaciones de los herbicidas (Duke, 2005).

Salud ambiental general. En términos de calidad ambiental, el mayor beneficio potencial relacionado con el manejo de plagas, puede provenir de la reducción significativa en la cantidad de plaguicidas utilizados en la agricultura. Cultivos transgénicos con resistencia a insectos, herbicidas y patógenos pueden permitir reducciones en el uso de pesticidas, cuyos efectos tóxicos son una preocupación para humanos y otros animales vertebrados a través de exposición aguda o crónica. El nivel de reducción de plaguicidas, a través de la

biotecnología depende en gran medida de combinaciones de cultivos y plagas. Por ejemplo, sin el control transgénico de las plagas de lepidópteros, los productores de algodón se han basado en el uso intensivo de insecticidas de amplio espectro (Morse *et al.*, 2006).

Los efectos de la resistencia a los insectos GM con el uso de insecticidas en el maíz son menos claros. El primero, las variedades de maíz Bt se dirigen principalmente al barrenador del maíz, en los Estados Unidos los insecticidas no son usados frecuentemente para controlar *O. nubilalis* en el campo maíz (Shelton *et al.*, 2002), lo que evidencia posibles reducciones modestas en el uso de insecticidas. Sin embargo, en otras áreas el maíz Bt ha proporcionado importantes beneficios ambientales. El control del barrenador asiático del maíz (*Ostrinia furnacalis*) en Filipinas ha reducido el uso de insecticidas a la mitad (Yorobe y Quicoy, 2006). Es posible reducir el uso de insecticidas en los EE. UU. para el maíz dulce Bt, que recibe más aplicaciones de insecticidas por unidad de área que el maíz producido para grano (Shelton *et al.*, 2002). Además, el uso de múltiples toxinas para controlar otras plagas de insectos, debe incrementarse en maíz. Por ejemplo, la rotación de cultivos utilizada anteriormente para controlar los gusanos de la raíz del maíz, se está volviendo menos eficaz ya que se han adaptado para evadir la rotación de cultivos de 2 años, poniendo huevos en cultivos distintos al maíz y mostrando latencia prolongada (Rondón & Gray, 2004). La rotación de maíz con soya también se ha vuelto menos atractiva económicamente debido al aumento de los precios del maíz, lo que provoca que más agricultores siembren maíz en años consecutivos.

Los cultivos transgénicos tolerantes a herbicidas también afectan al medio ambiente, en parte, a través de cambios en el uso de plaguicidas. El uso de glifosato en EE.UU ha aumentado tras la introducción de maíz y soya transgénicos tolerantes al glifosato. Aunque en general un pequeño aumento con el uso de herbicidas en la soya transgénica, pueden tener un beneficio ambiental neto al reducir el uso de otros herbicidas más persistentes (Economic Research Service, 2002). Más allá de los posibles beneficios de los cambios en el control químico de malezas, el uso de cultivos transgénicos parecen haber permitido reducir el control mecánico de malezas mediante labranza (Ammann, 2005). Una mayor adopción de la agricultura de labranza reducida o sin labranza es beneficiosa para la salud ambiental y la sostenibilidad agrícola, mediante la conservación del agua y suelo.

Impactos sociales. Los impactos sociales de las plagas basadas en la biotecnología la gestión será más directa para los agricultores y otros que viven en o cerca de comunidades agrícolas. Si los impactos en estas comunidades son positivos o no depende de si la biotecnología responde efectivamente a las necesidades sociales, lo que puede diferir entre países industrializados y en desarrollo naciones. En naciones industrializadas como los EE.UU., una necesidad crítica es preservar la agricultura como un estilo de vida o forma de empleo. Más de menos de un siglo, la población agrícola de EE. UU. ha disminuido de más del 34% a menos del 2% de la población total. A pesar de que los rendimientos de los cultivos han continuado para aumentar, la mayoría de los ingresos en los hogares agrícolas ahora se deriva de fuentes no agrícolas (Lobao & Meyer, 2001). Porque la preservación de la familia las granjas es una clave para mantener las comunidades rurales y la calidad de vida (Lyson & Welsh, 2005), aumentar los ingresos de las familias campesinas derivar directamente de la agricultura podría ayudar a sostener comunidades rurales. La biotecnología y sus aplicaciones al manejo de plagas pueden ayudar al dar agricultores más opciones para el manejo de cultivos plagas. Más importante aún, la mayor parte de la economía ganancias producidas por transgénicos resistentes a insectos o los cultivos tolerantes a herbicidas son retenidos por los agricultores (Falck-Zepeda *et al.*, 2000). Que significativo esta contribución es preservar las explotaciones familiares y si las ganancias serán estables a largo plazo es difícil de predecir.

4.8. Conclusiones

El uso de nuevas tecnologías, tiene el potencial de reducir la gravedad de muchos problemas planteados por una población en expansión y recursos limitados o degradados. Con respecto al manejo de plagas, con el uso de estos recursos se puede proporcionar un mejor control de plagas, generalmente con estrés reducido en la agricultura y el entorno.

La durabilidad de la efectividad de los eventos biotecnológicos depende de acciones colectivas (como en casi todos los problemas complejos). Estas acciones deben estar sostenidas en una profunda, veraz y amplia comunicación y, en especial, en la capacitación de todos los actores.

4.9. Bibliografía

- American Society of Agronomy (1989). Decision reached on sustainable ag. Madison, WI: American Society of Agronomy, Agronomy News (January).
- Ammann, K. (2005). Effects of biotechnology on biodiversity: herbicide-tolerant and insect-resistant GM crops. *Trends in Biotechnology*, 23, 388–394.
- Brar, IS, Dixit, AK, Khurana, R. y Gautam, A. (2017). Estudios de Propiedades Físicas del Maíz (*Zea mays* L.) Semillas. *Revista internacional de microbiología actual y ciencias aplicadas*, 6(10), 963–970. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.116>.
- Brown, T. (1996). *Molecular Genetics and Evolution of Pesticide Resistance*. Washington, DC: American Chemical Society.
- Caprio, M. (2001). Source–sink dynamics between transgenic and non-transgenic habitats and their role in the evolution of resistance. *Journal of Economic Entomology*, 94, 698–705.
- Carson, R. (1962). *Primavera silenciosa*. Boston, MA: Houghton mifflin.
- Casida, J. E. & Quistad, G. B. (1998). Golden age of insecticide research: past, present, or future? *Annual Review of Entomology*, 43, 1–16.
- Cattaneo, M. G., Yafuso, C., Schmidt, C. et al. (2006). Farm-scale evaluation of the impacts of transgenic cotton on biodiversity, pesticide use, and yield. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 103, 7571–7576.
- Chamberlain, D. E., Freeman, S. N. & Vickery, J. A. (2007). The effects of GMHTcrops on bird abundance in arable fields in the UK. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118, 350–356.
- CIMYYT. (2019). Por qué MAÍZ. Recuperado de <https://maize.org/why-maize/>
- Cook, S. M., Khan, Z. R. & Pickett, J. A. (2007). The use of push–pull strategies in integrated pest management. *Annual Review of Entomology*, 52, 375–400.
- corn borer and corn rootworms: a survey of Midwestern farmer practices and perceptions. *Journal of Economic Entomology*, 98, 237–247.

- Culliney, T. W. (2014). Crop losses to arthropods. In D. Pimentel & R. Peshin (Eds.), *Integrated Pest Management: Pesticide Problems*, Vol.3 (pp. 201–225). Netherland: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_8.
- Denholm, I. & Rowland, B. W. (1992). Tactics for managing pesticide resistance in arthropods, theory and practice. *Annual Review of Entomology*, 37, 91–112.
- Diamond, J. M. (1997). *Guns, Germs, and Steel: The Fates of Human Societies*. New York: W.W. Norton.
- DOA. (2019). Pest of corn. Retrieved from http://www.doa.gov.my/index/resources/aktiviti_sumber/sumber_awam/maklumat_biosekuriti/perosak_tanaman_jagung.pdf.
- Duque, SO (2005). Hacer un balance de los resistentes a los herbicidas cultivos diez años después de la introducción. *Manejo de plagas Ciencia*, 61, 211–218.
- Economic Research Service (2002). *Adoption of Bioengineered Crops*, Agricultural Economic Report No. 810. Washington, DC: US Department of Agriculture. Disponible en www.ers.usda.gov/publications/aer810/aer810.pdf.
- Environmental Protection Agency (2001). Insect resistance management. In *Biopesticides Registration Action Document Bacillus thuringiensis Plant-Incorporated Protectants*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency. Available at www.epa.gov/pesticides/biopesticides/pips/bt_brad2/4-irm.pdf.
- Estadística. (2019). Producción de maíz en la región de Asia Pacífico en 2017, por país (en millones de toneladas). Recuperado, de <https://www.statista.com/statistics/679403/asia-pacific-maize-production-by-country/>.
- Evans, L. T. (2003). Agricultural intensification and sustainability. *Outlook on Agriculture*, 32, 83–89.
- Falck-Zepeda, JB, Traxler, G. y Nelson, RG (2000). Sur plus distribución a partir de la introducción de una innovación biotecnológica. *American Journal of Agricultural Economics*, 82, 360–369.

- FAOSTAT. (2017). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación: La base de datos estadísticos Disponible: <http://faostat.fao.org>.
- Fishilevich, E., Vélez, A. M., Storer, N. P., Li, H., Bowling, A. J., Rangasamy, M., Siegfried, B. D. (2016). RNAi as a management tool for the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera*. *Pest Management Science*, 72(9), 1562–1663. <https://doi.org/10.1002/ps.4324>.
- Forrester, N. W. & Bird, L. J. (1996). The need for adaption to change in insecticide resistance management strategies: the Australian experience. In *Molecular Genetics and Evolution of Pesticide Resistance*, ed. T. Brown, pp. 160–168. Washington, DC: American Chemical Society.
- Georghiou, G. P. (1986). The magnitude of the resistance problem. In *Pesticide Resistance: Strategies and Tactics for Management*, pp. 14–43. Washington, DC: National Academy Press.
- Gepts, P. y Papa, R. (2003). Posibles efectos del trans(gen) flujo de los cultivos a la diversidad genética de las variedades locales y los parientes silvestres. *Bioseguridad Ambiental Investigación*, 2, 89–113.
- Gray, M. (2006). European corn borer: a secondary pest for now? *Pest Management and Crop Development Bulletin*, 9, 261–262. Available at www.ipm.uiuc.edu/bulletin/article.php?id=530.
- Heatherly, L. G., Elmore, C. D. & Spurlock, S. R. (2002). Weed management systems for conventional and glyphosate-resistant soybean with and without irrigation. *Agronomy Journal*, 94, 1419–1428.
- Hemingway, J., Penilla R. P., Rodriguez, A. D. et al. (1997). Resistance management strategies in malaria vector mosquito control: a large-scale field trial in southern Mexico. *Pesticide Science*, 51, 375–382.
- Herd, R. W. (2006). Biotechnology in agriculture. *Annual Review of Environmental Resources*, 31, 265–295.
- Hilbeck, A., Baumgartner, M., Fried, P. M. & Bigler, F. (1998). Effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* cornfed prey on mortality and development time of immature

- Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Environmental Entomology*, 27, 480–487.
- James, C. (2006). Estado global de biotecnología/ GM comercializados Cultivos: 2006, ISAAA Brief No. 35. Ithaca, NY: Servicio Nacional para la Adquisición de Agro-Biotech Aplicaciones.
- Knake, E. L. & Downs, J. P. (1979). The weed science pase of pest management. In *Integrated Pest Management North Central Region Workshop Proceedings*, St. Louis, MO, December 11–13, 1979, ed. S. Elwynn Taylor, Section I, pp. 33–37.
- Kniss, A. R., Wilson, R. G., Martin, A. R., Burgener, P. A. & Feuz, D. M. (2004). Economic evaluation of glyphosateresistant and conventional sugar beet. *Weed Technology*, 18, 388–396.
- Lobao, L. y Meyer, K. (2001). La gran transición agrícola: crisis, cambio y consecuencias sociales de la agricultura estadounidense del siglo XX. *Revista anual de sociología*, 27, 103–124.
- Losey, J. E., Rayor, L. S. & Carter, M. E. (1999). Transgenic pollen harms monarch larvae. *Nature*, 399, 214.
- Lyson, TA (2002). Biotecnologías agrícolas avanzadas y agricultura sostenible. *Trends in Biotechnol ogy*, 20, 193–196.
- Lyson, TA y Galés, R. (2005). Industrialización agrícola, leyes agrícolas anticorporativas y bienestar de la comunidad rural. *Medio Ambiente y Planificación A*, 37, 1479–1491.
- Mathur, LM. (1991). Genética de la resistencia a insectos en maíz. En J. Sarkar KR, Singh HN y Sachan (Ed.), *Maize Genetic Perspectives* (págs. 238–250). Nueva Delhi: Sociedad India de Genética y Fitomejoramiento.
- Morse, S., Bennett, R. e Ismael, Y. (2006). Ambiental impacto del algodón modificado genéticamente en Sudáfrica. *Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente*, 117, 277–289.
- Naranjo, S. E. (2005). Long-term assessment of the effects of transgenic Bt cotton on the function of the natural enemy community. *Environmental Entomology*, 34, 1211–1223.

- Olmstead, D. L., Nault, B. A., & Shelton, A. M. (2016). Biology, Ecology, and Evolving Management of *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae) in Sweet Corn in the United States. *Journal of Economic Entomology*, 109(4), 1667–1676. <https://doi.org/10.1093/jee/tow125>.
- Ostlie, K. R., Hutchison, W. D., Hellmich, R. L. et al. (1997). Bt-Corn and European Corn Borer: Long-Term Success Through Resistance Management. North Central Regional Extension Publication NCR 602. St. Paul, MN: University of Minnesota.
- Pedigo, L. P. & Rice, M. E. (2006). *Entomology and Pest Management*, 5th edn. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- Pilcher, C. D., Rice, M. E., Higgins, R. A. et al. (2002). Biotechnology and the European corn borer: measuring historical farmer perceptions and the adoption of transgenic Bt corn as a pest management strategy. *Journal of Economic Entomology*, 95, 878–892.
- Prasifka, J. R., Heinz, K. M. & Minzenmayer, R. R. (2004a). Relationships of landscape, prey and agronomic variables to the abundance of generalist predators in cotton (*Gossypium hirsutum*) fields. *Landscape Ecology*, 19, 709–717.
- Prasifka, J. R., Heinz, K. M. & Winemiller, K. O. (2004b). Crop colonization, feeding, and reproduction by the predatory beetle, *Hippodamia convergens*, as indicated by stable carbon isotope analysis. *Ecological Entomology*, 29, 226–233.
- Qaim, M. & Traxler, G. (2005). Roundup Ready soybeans in Argentina: farm level and aggregate welfare effects. *Agricultural Economics*, 32, 73–86.
- Rashid A. Suleiman, Kurt A. Rosentrater, & Carl J. Bern. (2013). Effects of deterioration parameters on storage of maize. In *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (p. 131593351). Kansas City, Missouri. <https://doi.org/10.13031/aim.20131593351>.
- Reddy, TR, Reddy, PN, Reddy, RR y Reddy, SS (2013). Manejo del Tizón de la Hoja Turcicum del Maíz Causado por *Exserohilum Turcicum* en el Maíz. *Revista internacional de publicaciones científicas y de investigación*, 3(10), 1–4.

- Rice, M. E. & Ostlie, K. R. (1997). European corn borer management in field corn: a survey of perceptions and practices in Iowa and Minnesota. *Journal of Production Agriculture*, 10, 628–634.
- Rice, M. E. (2004). Transgenic rootworm corn: assessing potential agronomic, economic, and environmental benefits. *Plant Health Progress* doi:10.1094/PHP-2004-0301-01-RV, available at www.plantmanagementnetwork.org/pub/php/review/2004/rootworm/.
- Romeis, J., Dutton, A. & Bigler, F. (2004). Bacillus thuringiensis toxin (Cry1Ab) has no direct effect on larvae of the green lacewing *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of Insect Physiology*, 50, 175–183.
- Rondón, SI & Gray, ME (2004). Desarrollo ovárico y preferencia oviposicional de la variante del gusano de la raíz del maíz occidental (Coleoptera: Chrysomelidae) en el centro este de Illinois. *Revista de Entomología Económica*, 97, 390–396.
- Sandermann, H. (2006). Biotecnología vegetal: estudios de casos ecológicos sobre resistencia a herbicidas. *Tendencias en la ciencia de las plantas*, 11, 324–328.
- Savary, S., Ficke, A., Aubertot, J. N., & Hollier, C. (2012). Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food Security*, 4, 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>.
- Schaller, N. (1993). El concepto de sustentabilidad agrícola. *Agricultura, Ecosistemas y Medio Ambiente*, 46, 89–97.
- Schnable PS., Ware D., Fulton RS., Stein JC. (2009). El genoma del maíz B73: complejidad, diversidad y dinámica. *Science* 326:1112–1115 Shad RA., Chatha MQ., Nawaz H. (1993). Estudios de manejo de malezas en maíz. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 14(1): 44-50.
- Shelton, AM, Zhao, JZ y Roush, RT (2002). Consecuencias económicas, ecológicas, de seguridad alimentaria y sociales del despliegue de plantas transgénicas Bt. *Revisión anual de entomología*, 47, 845–881.

- Sneller, CH (2003). Impacto de los genotipos transgénicos y la subdivisión en la diversidad dentro del germoplasma de soja de élite de América del Norte. *Ciencia de cultivos*, 43, 409–414.
- Stern, V. M., Smith, R. F., van den Bosh, R. & Hagen, K. S. (1959). the integration of chemical and biological control of the spotted alfalfa aphid (the integrated control concept). *Hilgardia*, 29(2), 81–101.
- Tabashnik, B. E. & Croft, B. (1982). Managing pesticide resistance in crop–arthropod complexes: interactions between biological and operational factors. *Environmental Entomology*, 11, 1137–1144.
- Tagne, A., Feujio, T. P., & Sonna, C. (2008). Essential oil and plant extracts as potential substitutes to synthetic fungicides in the control of fungi. In *ENDURE International Conference 2008* (pp. 1–3).
- tringam, G. R., Ripley, V. L., Love, H. K. & Mitchell, A. (2003). Transgenic herbicide tolerant canola: the Canadian experience. *Crop Science*, 43, 1590–1593.
- Tsedaley, B., & Adugna, G. (2016). Detection of Fungi Infecting Maize (*Zea mays* L.) Seeds in Different Storages Around Jimma, Southwestern Ethiopia. *Journal of Plant Pathology & Microbiology*, 7(3), 1000338. <https://doi.org/10.4172/2157-7471.1000338>.
- USDA. (2015). Trigo Mundial [http:// Maíz \(maíz\), arroz y algodón](http://nue.okstate.edu/CropInformation/World_Wheat_Production.htm). Recuperado de nue.okstate.edu/CropInformation/World_Wheat_Production.htm.
- Wilson, T.A., Rice, M.E., Tollefson, J.J. & Pilcher, C.D. (2005). Transgenic corn for control of the European
- Yorobe, JM & Quicoy, CB (2006). Impacto económico del maíz Bt en Filipinas. *Científico agrícola filipino*, 89, 258–267.

Capítulo V. Manejo integral de arvenses.

Carmen Emelia Muñoz López

Universidad de Guayaquil

<https://orcid.org/0000-0002-9888-1488>

Cristina Evangelina Maldonado Camposano

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-1202-3184>

Germán Reinaldo Troya Guerrero

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0003-1293-4866>

Jhon Luis Cano Maquilón

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-8872-2873>

5.1. Introducción

El arroz (*Oryza sativa* L.) es un alimento básico para todos y es considerado un alimento importante por más del 50% de la población mundial, por lo que juega un papel importante en la estabilidad económica y social. Las malezas son la restricción biológica más importante para lograr rendimientos adecuados, ya que pueden competir por los recursos y afectar la calidad del arroz. Se esperan pérdidas significativas de rendimiento debido a las malas hierbas, en condiciones extremas, pueden ocurrir pérdidas de toda la cosecha (Jabran y Chauhan, 2015). El arroz de siembra directa (SSD) sufre una mayor pérdida de rendimiento que el arroz trasplantado (Mahajan *et al.*, 2009). En el arroz trasplantado, la aparición inicial de malas hierbas se controla mediante inundación. Además, las plántulas de arroz germinadas por el método SSD no compiten con las malezas coggerminadas (Kumar *et al.*, 2008). Es importante que se invierta en prácticas de manejo integrado para reducir las pérdidas de rendimiento causadas por las malezas.

5.2. Malezas de importancia en arroz

Hay diferentes ecosistemas en los que se cultiva el arroz, de regadío, de tierras bajas poco profundas, de tierras medias profundas, de aguas profundas y de tierras altas. En estos ecosistemas se dan varios tipos de malas hierbas (Singh y Singh, 2008). Se han informado cambios en la flora de malezas con modificación en la hidrología superficial y los métodos de establecimiento del arroz. Ho (1991) observó cambios en la dinámica de las malezas cuando se utilizó labranza cero en el arroz. La aplicación de métodos de labranza cero secos

y húmedos al arroz aumentó la biodiversidad y cambió la preponderancia relativa de las principales especies de malezas en comparación con los métodos de trasplante. El identificarlas es la clave para ejecutar las medidas de control correspondientes. Se identifican según su morfología o hábitat. Vanegas & Muñoz (1984) mencionan que: “La costa del Ecuador presenta condiciones climáticas adecuadas y suelos propicios para el crecimiento agresivo de malezas.” Cubriendo el 96% de la superficie arroceras del país, brinda condiciones ideales para el desarrollo de malezas que causan problemas en el cultivo del arroz. La información sobre la flora de malezas importantes en el arroz se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Malezas de importancia económica en el cultivo de arroz

Especie	Nombre vulgar	Arroz riego	Arroz seco
<i>Amaranthus spp.</i>	Bledo		X
<i>Bidens pilosa</i>	Amor seco		X
<i>Cyperus spp.</i>	Coquitos		X
<i>Echinochloa colonum</i>	Paja patilla	X	X
<i>Eclipta alba</i>	Botoncillo	X	
<i>Echinochloa crusgalli</i>	Moco pavo	X	
<i>Eleusine indica</i>	Pata gallina		X
<i>Euphorbia spp.</i>	Lechosas		X
<i>Ludwigia spp.</i>	Clavo agua	X	
<i>Leptochloa spp.</i>	Pajas		X
<i>Momordica charantia</i>	Achochilla		X
<i>Portulaca oleracea</i>	Verdolaga		X
<i>Rottboellia cochinchinensi</i>	Caminadora	X	X

Fuente: Ordeñana (2013)

5.3. Componentes de competencia

La competencia de luz ocurre cuando las plantas crecen juntas y una planta da sombra a otra, de modo que la planta bajo la sombra recibe menos intensidad y calidad de luz de la que necesita para un crecimiento óptimo (Lovato *et al.*, 2022).

La cantidad de agua necesaria varía mucho de una planta a otra, la competencia entre el agua y los nutrientes suele ser más importante porque comienza antes que la competencia por la luz. La competencia por el agua es mayor cuando las raíces de los cultivos y las malas hierbas están estrechamente entremezcladas y obtienen su agua del mismo volumen de suelo. Esto significa que la competencia de las malezas por el agua es más severa para el

arroz de secano que para el arroz de regadío porque la humedad suele ser limitante (Cadena *et al.*, 2021).

Al competir por los nutrientes, las malezas absorben tanto o más que los cultivos, en general, los factores que hacen que las plantas sean competitivas para el consumo de agua también las hacen competitivas para el consumo de nutrientes. La competencia entre malezas y cultivos por el espacio y el dióxido de carbono generalmente es irrelevante (Lovato *et al.*, 2022).

La reducción en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos causada por las malas hierbas puede deberse a un factor distinto de la competencia. También pueden ocurrir efectos alelopáticos. La alelopatía es el efecto perjudicial de una planta sobre otra al producir compuestos tóxicos que se liberan al medio ambiente. También se conocen los efectos alelopáticos de las malezas sobre los cultivos y viceversa (Rocafuerte, 2019).

5.4. Pérdidas de rendimiento por malezas

La pérdida de rendimiento debido a las malas hierbas, depende en gran medida de la estación, el tipo de malas hierbas, la densidad, la variedad de arroz, la tasa de crecimiento, el método de gestión y el ecosistema. El alcance de las pérdidas de malas hierbas se puede determinar a partir de los siguientes ejemplos. A nivel mundial, la pérdida de rendimiento real debido a las plagas se estima en un 40 %, siendo las malas hierbas responsables de la mayor parte (32 %) de esta pérdida (Rao *et al.*, 2007). Rao y Moody (1994) encontraron que bajo condiciones no controladas, las malezas causaron una pérdida del 36% al 56% en el rendimiento del grano. En India, Mukherjee (2004) encontró una pérdida de rendimiento de aproximadamente 33%. De manera similar, Oerke (2006) informó que las malezas son responsables del 10 % y el 37 % de la pérdida de rendimiento real y potencial en todo el mundo.

Las pérdidas de rendimiento debido a gramíneas (principalmente *E. crus-galli*) y malezas fueron del 41% y 28%, respectivamente (Azmi y Baki, 1995). Azmi y Rezaul (2008) encontraron que el arroz maleza (*Oryza sativa* f. *spontanea*) madura antes que el arroz cultivado y es propenso al desgrane, lo que dificulta la cosecha y reduce los rendimientos. Azmi y Abdullah (1998) estimaron que el arroz maleza causa una pérdida de rendimiento de alrededor del 60 % con una infestación del 35 % y puede alcanzar hasta un 74 % de SSD con una infestación severa. La pérdida de rendimiento debido a malezas es más severa en

SSD que en arroz trasplantado (Karim *et al.*, 2004). Se informaron reducciones de rendimiento del 13 al 63 % para el arroz trasplantado cuando no se controlaron las malezas, mientras que se registraron pérdidas del 50 al 91 % para el SSD (Singh *et al.*, 2005a).

5.5. Métodos de control

Los métodos de control de malezas se pueden dividir en técnicas preventivas, culturales, físicas, químicas y biológicas.

Medidas Preventivas

Prevenir la invasión y propagación de malezas es la estrategia más importante en el manejo de malezas (Buhler, 2002). Esto requiere tomar precauciones tales como usar semillas libres de malezas, mantener limpios los campos, bordes, canales de riego, y limpiar los implementos agrícolas antes de moverlos de un campo a otro (De Datta y Baltazar, 1996). Por lo tanto, la prevención incluye todas las medidas que limitan la introducción y el establecimiento de malas hierbas en un área. Hay muchos ejemplos de introducción de malas hierbas nocivas sin tomar precauciones. Un ejemplo es el arroz negro, que se esparce en muchos países por semillas de arroz contaminadas (Chauhan, 2013b) y actualmente es un problema importante en el cultivo convencional de arroz debido a que no existen herbicidas lo suficientemente selectivos para controlar esta mala hierba. La prevención se ha descuidado en los últimos años debido a la disponibilidad de herbicidas. Sin embargo, en situaciones donde están presentes biotipos de malezas tolerantes a herbicidas y malezas difíciles de controlar, las medidas preventivas se vuelven importantes y juegan un papel efectivo en el control de malezas (Buhler, 2002).

Medidas Culturales

Técnica de semillero falso

La técnica de semillero falsos es una técnica eficaz de control de malezas cuando los cultivos están expuestos a una fuerte infestación de malezas en las primeras etapas de crecimiento. Este método consiste en preparar el suelo varias semanas antes de plantar los cultivos para estimular la germinación de malas hierbas. Esto agota el banco de semillas de la capa superior del suelo y reduce la aparición de malas hierbas (Rao *et al.*, 2007). Después de que emergen las malas hierbas y antes de plantar el arroz, las malas hierbas se eliminan mediante métodos químicos (herbicidas no selectivos) o métodos mecánicos (como la labranza).

En esta técnica, las plántulas de malas hierbas emergentes se eliminan principalmente con herbicidas (Oliver *et al.*, 1993). Sin embargo, también se puede implementar un semillero temporal sumergiendo las plántulas de malezas en agua durante 10 días, seguido de un período de semillero de 7 y 14 días después de la emergencia de las malezas (Sindhu *et al.*, 2010). Singh *et al.*, (2009) reportaron una reducción del 53% en las poblaciones de malezas en SSD después de practicar semillero convencionales. Delouche *et al.*, (2007) y Rao *et al.*, (2007) también utilizaron técnicas de vivero obsoletas para controlar el arroz maleza en SSD sin labranza, que tienen opciones limitadas para controlar estas malezas.

Preparación del suelo/Sistemas de labranza

Los sistemas de preparación o labranza juegan un papel importante en el cultivo del arroz, especialmente SSD, y pueden ser utilizados como un medio eficaz para el control de malezas, reduciendo así los costos y aumentando las ganancias. Esta práctica tiene dos propósitos principales. uno es arrancar la maleza que crecen en el campo y la otra es preparar el suelo para crear las condiciones adecuadas para la germinación de las semillas. La distribución vertical de semillas de malezas en el suelo se ve afectada de manera diferente por los diferentes sistemas de cultivo y la abundancia relativa de diferentes especies de malezas dentro del campo como resultado de esta distribución de semillas de malezas en el suelo (Chauhan y Johnson, 2009). Por ejemplo, la mayoría de las semillas de malas hierbas permanecen cerca de la superficie del suelo después de plantarlas en un sistema de labranza cero. Esto crea condiciones favorables para la germinación de semillas de malas hierbas presentes en la superficie del suelo. Por otro lado, con los sistemas de labranza convencionales, las semillas de malas hierbas en la superficie pueden quedar demasiado profundas para emerger. Sin embargo, también es cierto que las semillas de malezas de labranza cero son más propensas a una rápida desecación y depredación en caso de labranza cero en comparación con los sistemas convencionales.

Varios estudios han informado que la biomasa de malezas y la densidad de malezas fueron más altas en los sistemas sin labranza que en los sistemas de labranza convencional, lo que resultó en mayores rendimientos de grano en las parcelas con labranza convencional en comparación con los sistemas de labranza cero (Fig. 1) (Singh *et al.*, 2015). Las prácticas de labranza afectan no solo al cultivo actual, sino también a la incidencia de malezas en el próximo cultivo. No hay duda de que la labranza se puede utilizar como una herramienta importante para el control de malezas y la reducción de la labranza puede aumentar este

problema (Shrestha *et al.*, 2005). Sin embargo, la labranza no es un control definitivo de malezas porque las semillas de malezas se entierran en la capa profunda que no sale a la superficie y se llevan a la capa superficial, por lo que solo se puede usar para el control temporal de malezas y crear un entorno favorable para la germinación y el crecimiento (Chauhan y Johnson, 2010 a,b).

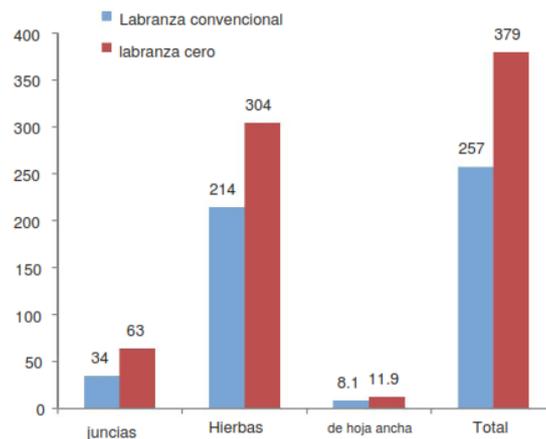


Figura. 1. Biomasa de malezas influenciada con diferentes prácticas de labranza.
Fuente: Singh *et al.*, (2015)

Método del establecimiento del Cultivo

Se han introducido varios métodos de cultivo para el arroz, como el trasplante, la siembra directa en seco, la siembra directa en húmedo y la siembra en agua. Estos métodos marcan una diferencia en la flora de malezas del campo. En comparación con los métodos de trasplante convencionales, el control de malezas en los sistemas SSD es particularmente desafiante debido a la variabilidad y la gravedad de la infestación de malezas y la falta de una película de agua para controlar las malezas en el momento de la emergencia del trasplante. Además, en SSD, tanto el arroz como las malas hierbas emergen en el sistema SSD al mismo tiempo, por lo que las plantas no pueden utilizar el tamaño de la planta contra las malas hierbas como en el sistema trasplantado. Las distribuciones de semillas de malezas en los perfiles del suelo se ven afectadas por el trabajo de preparación del suelo en los sistemas SSD, lo que resulta en una abundancia de especies de malezas en comparación con los métodos de trasplante (Chauhan y Opeña, 2012).

Los sistemas SSD de labranza convencionales están dominados por numerosas especies perennes, pastos anuales y arbustos anuales (Timsina *et al.*, 2010). Sin embargo, se observó

una reducción en el crecimiento de malezas perennes (*C. rotundus*) y malezas anuales en el sistema de labranza cero SSD en comparación con el sistema de labranza convencional. Por lo tanto, el método de cultivo se puede utilizar como una herramienta eficaz para el control de malezas en el arroz. La pérdida de rendimiento por malezas en los tratamientos SSD varió de 91,4 a 99,0 % en comparación con 16,0 a 42,0 % en los tratamientos de trasplante (Chauhan y Opeña, 2012). Por lo tanto, elegir técnicas de cultivo apropiadas es un paso importante hacia el manejo integral de malezas en el cultivo de arroz.

Densidad de siembra

Los enfoques de manejo cultural de malezas se enfocan principalmente en reducir el impacto de las malezas en los cultivos, ya sea haciéndolos menos competitivos o haciéndolos más competitivos (Gibson *et al.*, 2002). El aumento de las tasas de siembra se puede utilizar para mejorar la competitividad de los cultivos y ha demostrado ser un componente eficaz en las estrategias de manejo de malezas (Kristensen *et al.*, 2008). La competitividad de las plantas contra las malezas aumenta a medida que aumenta la densidad de plantas al reducir el espacio entre hileras (Chauhan y Johnson, 2010a). La sombra, la cobertura del dosel y la acumulación de biomasa están determinados por la densidad de plantación del cultivo y afectan acumulativamente la capacidad de control de malezas (Anwar *et al.*, 2011). El espacio estrecho entre plantas (10 cm) redujo significativamente la biomasa de malezas en comparación con el espacio más amplio entre plantas (20 cm) (Chauhan y Opeña, 2013a,b). Zhao *et al.*, (2007) informaron que la biomasa de malezas disminuyó y el rendimiento del arroz aeróbico aumentó a medida que el número de semillas viables aumentó de 100 a 300 por m². Chauhan y Augho (2013) también encontraron en experimentos de macetas que el aumento de la densidad de población disminuyó el crecimiento y la reproducción de *E. crus-galli*. Por lo tanto, se sugiere que el aumento de la tasa de siembra puede usarse como una herramienta de control de malezas en sistemas agrícolas de bajos y altos insumos.

Cultivares competitivos de malezas

El arroz generalmente se considera un competidor débil de las malezas en comparación con otros cultivos como el maíz (Saito *et al.*, 2010a). Sin embargo, se han documentado diferencias de cultivares en la capacidad de controlar las malas hierbas en el arroz (Zhao, 2006). Además, se pueden desarrollar genotipos de arroz mejorados para el control de malezas. El desarrollo de tales variedades con una mayor competitividad frente a las malas

hierbas puede ser más aceptable para los productores de arroz y ayudar a reducir la dependencia de los herbicidas.

La competitividad de cultivos y malezas tiene dos componentes principales. Estos son la resistencia a malezas y la capacidad de control de malezas (Jannink *et al.*, 2000). La tolerancia a las malas hierbas es la capacidad de un cultivo para mantener altos rendimientos a pesar de la competencia, y la capacidad de control de malas hierbas es la capacidad de una planta para controlar el crecimiento de malas hierbas y reducir la producción de semillas, reduciendo así la producción de semillas durante la temporada de crecimiento actual y las subsiguientes, de la producción de semillas de malezas y la posterior acumulación en el banco de semillas son deseables en los cultivos que crecen con malezas, por lo que cuando se trata de la competitividad del cultivo y de las malezas, ambos factores son importantes (Jordan, 1993).

Las variedades ideales de arroz que compiten con las malezas deben tener una fuerte capacidad de supresión de malezas y un alto rendimiento tanto en condiciones libres de malezas como con malezas. La biomasa de malezas se evalúa en condiciones de malezas para determinar la capacidad de supresión de los cultivos (Saito *et al.*, 2010b). Este método de manejo en el control de malezas a través de cultivares se conoce como método genético. El papel de los cultivares competidores puede explotarse aún más mediante la manipulación de prácticas agrícolas, como cambios en la densidad de siembra y la temporada de siembra. Esto puede resultar útil para proporcionar un control adicional de malezas cuando no se usan herbicidas o se usan de manera reducida (Mahajan y Chauhan, 2011).

Varios rasgos confieren resistencia a las malezas (Mahajan y Chauhan, 2013a). Estos son la altura de la planta (Mennan *et al.*, 2012), el número de macollos (Harding y Jalloh, 2011; Mennan *et al.*, 2012), la biomasa de los macollos (Ni *et al.*, 2000), el índice de área foliar (Moukoubi Harding y Jalloh, 2011), cobertura foliar (Lotz *et al.*, 1995), área foliar específica (Moukoubi *et al.*, 2011), crecimiento de raíces (Gibson *et al.*, 1999; Fofana and Jalloh, 2011) Rauber, 2000), vigor de plántula temprana (Zhao *et al.*, 2006), área foliar y biomasa de plántulas (Namuco *et al.*, 2009). Fischer *et al.*, (1997) observaron que la competitividad del arroz contra *E. colona* se correlacionó más con el macollamiento del arroz y el área foliar que con la altura de la planta.

Estudios previos han demostrado que existen diferencias significativas en la competitividad entre los genotipos de arroz. Mennan *et al.*, (2012) encontraron que entre varios cultivares

de arroz (Osmanc¸yk, K¸yz¸ly¸rmak, Karadeniz, Koral y Ne¸yis), Koral fue significativamente m¸as alto que otras variedades independientemente de la densidad de *E. crus-galli*. la producci¸on, con *E. crus -galli* disminuyendo en un 30% y 16%, respectivamente. Este cultivar mostr¸o la mejor competitividad debido a la alta acumulaci¸on de biomasa en las primeras etapas de crecimiento y menor reducci¸on de la altura de la planta en presencia de *E. cruz-galli* en comparaci¸on con otras variedades.

Las caracter¸isticas alelop¸aticas tambi¸en se pueden usar para reducir la infestaci¸on de malezas sin costo adicional. Este m¸etodo de control de malezas no da¸na el medio ambiente ni aumenta los costos de control de malezas. El control alelop¸atico de malezas se puede aplicar como estrategia ¸unica en ciertos sistemas de cultivo (Farooq *et al.*, 2011). Adem¸as, se puede integrar con otros m¸etodos para lograr un control efectivo. En este caso, las estrategias de control alelop¸atico manipulan el potencial del cultivo de tal manera que estos aleloqu¸imicos del cultivo reducen la competencia de malezas (Jabran *et al.*, 2015).

Rotaci¸on de cultivos y sistema de cultivo

Cada cultivo permite que crezcan malas hierbas espec¸ificas en su asociaci¸on. se reconocen en diferentes rotaciones y por lo tanto, se controlan mediante la rotaci¸on de cultivos, que tienen diferentes ciclos de vida y h¸abitos culturales. Por ejemplo, las diferentes ¸epocas de siembra y cosecha de los cultivos de rotaci¸on impiden el establecimiento de malas hierbas y la producci¸on de semillas, lo que aumenta las oportunidades de los agricultores para controlar las malas hierbas (Rao, 2011).

Hay tres mecanismos principales por los cuales la presi¸on de selecci¸on cambia con la rotaci¸on. Estos son (i) cambios en las pr¸acticas de manejo (momento de las actividades de campo, herbicidas, etc.), (ii) cambios en los patrones de competencia por los recursos y (iii) alelopat¸ia. Sin embargo, los tres mecanismos no se utilizan para todos los tipos de rotaci¸on.

Por lo tanto, al examinar el impacto de una rotaci¸on de cultivos en particular sobre la din¸amica de las malezas, es necesario considerar qu¸e mecanismos utiliza una rotaci¸on de cultivos en particular (Nichols *et al.*, 2015). El desarrollo de sistemas de cultivo, como una disposici¸on espacial adecuada y la labranza eficiente ayudan a las plantas a competir con las malezas (Avola *et al.*, 2008). Sin embargo, si queremos utilizar la manipulaci¸on del sistema de cultivo como un componente de manejo de un sistema integrado de malezas, se requiere una compresi¸on profunda de la din¸amica de las malezas y el impacto de los factores

relacionados con la planta y el suelo en el ciclo de vida de las malezas (Davis y Liebman 2003).

Control físico

El control físico de malezas se puede realizar por métodos manuales o mecánicos. El deshierbe manual es la intervención de control de malezas más común en los sistemas de cultivo de arroz. Es eficaz para reducir la competencia directa de malezas y evitar que las malezas produzcan y arrojen semillas, pero requiere mucha mano de obra, ya que necesita de 250 a 780 horas de mano de obra por hectárea (Rodenburg y Johnson, 2009).

Roder (2001) identificó que se necesitan de 150 a 200 días de deshierbe manual por hectárea para mantener los cultivos de arroz libres de malezas. Además, dado que las malezas herbáceas y las plántulas de arroz son morfológicamente similares, y el retraso en el control de malezas debido a la falta de disponibilidad, los altos costos de la mano de obra (Johnson, 1996) o debido a las malas condiciones climáticas son otros problemas del deshierbe manual.

Sin duda, el deshierbe mecánico ha demostrado ser muy útil, pero su ámbito de aplicación se limita únicamente a los cultivos en hileras, lo que lo convierte en un método menos común. Además, se requieren condiciones óptimas de suelo y agua para que los herbicidas mecánicos funcionen de manera eficiente y efectiva. Sin embargo, el control mecánico de malezas combinado con la aplicación de herbicidas antes del brote puede usarse como una herramienta eficaz para el manejo integrado de malezas en SSD (Matloob *et al.*, 2015). El deshierbe mecánico es más efectivo cuando las malezas no pueden controlarse con medios químicos u otros (como lluvia prolongada o sequía). Los desmalezadores mecánicos también ayudan a reducir el uso general de herbicidas.

Control químico

Los métodos tradicionales de control de malezas incluyen labranza inicial, deshierbe manual con azadones y extracción manual. Dependiendo de la especie de maleza, la intensidad de la infestación y el cultivo que se está cultivando, generalmente se aplican 2 o 3 deshierbes manuales para un control efectivo. Sin embargo, el control de malezas del arroz trasplantado por medios mecánicos y culturales es costoso, especialmente en esta crisis laboral. Además de los altos costos, la escasez de mano de obra, las condiciones climáticas desfavorables y algunas malezas resistentes (*E. colona* y *E. crus-galli*) y el arroz han hecho que los métodos químicos sean más populares que los métodos tradicionales (Matloob *et al.*, 2015).

En los últimos años, los productores de arroz de muchos países han pasado de los sistemas de trasplante a los sistemas de siembra directa. Las malas hierbas son una limitación importante para los agricultores que practican la labranza cero (Rao *et al.*, 2007). En los métodos de trasplante tradicionales, el agua estancada suprime las malas hierbas, pero en el sistema SSD, el control de malas hierbas se pierde el control inherente de malas hierbas del agua estancada en el establecimiento del cultivo de arroz y las malas hierbas emergen al mismo tiempo que el arroz, compitiendo por los recursos. Varias estrategias de control de malezas, culturales, mecánicas, manuales y químicas también se pueden practicar con los sistemas SSD para controlar las malezas. Sin embargo, entre varias estrategias de control de malezas, el control químico de malezas se considera el más eficiente y económico (Suria *et al.*, 2011). El uso de herbicidas reduce el tiempo de control de malezas en 100 h ha⁻¹ en comparación con el control manual de malezas con SSD. Por lo tanto, la mayoría de los productores de arroz que practican SSD usan herbicidas (Mazid *et al.*, 2003).

Ingredientes activos y su modo de acción

La actividad y selectividad de los herbicidas se basan en la eliminación de malas hierbas según la cantidad y el mecanismo por el cual los ingredientes actúan sobre sus procesos metabólicos esenciales (Morcote, 2013). El Comité de Acción de Tolerancia a los Herbicidas (Herbicide Resistance Action Comitee), desarrollaron un esquema para clasificar los herbicidas según su función. Esto facilita a los investigadores el desarrollo de nuevos productos que ayuden a evitar que las malas hierbas se vuelvan resistentes a los nuevos herbicidas. (Ramírez, 2014). La Tabla 2 muestra la clasificación de los herbicidas por sitio de acción:

Tabla 2. Clasificación de los Herbicidas según el Sitio de Acción.

Grupo HRAC	Sitio de acción	Familia Química	Ingrediente Activo	Grupo WSSA
A	Inhibición de la enzima Acetil Coenzima A Carboxilasa	Ariloxifenoxipropionato	Clodinafop-propargyl Cyhalofop-butyl Diclofop-methyl Fenoxaprop-P-ethyl Fluazifop-P-butyl Haloxifop-R-methyl Propaquizafop Quizalofop-P-ethyl	1

			Alloxydim Butroxydim Clethodim Cycloxydim Profoxydim Sethoxydim Tepraloxyn Tralkoxydim	
		Ciclohexadiona		
		Fenilpirazolina	Pinoxaden	
			Amidosulfuron Azimsulfuron Bensulfuron-methyl Chlorimuron-ethyl Chlorsulfuron Cinosulfuron Cyclosulfamuron Ethametsulfuron- methyl Ethoxysulfuron Flazasulfuron Flupysulfuron- methyl-Na Foramsulfuron- methyl Halosulfuron-methyl Imazosulfuron Iodosulfuron Mesosulfuron Metsulfuron-methyl Nicosulfuron Oxasulfuron Primisulfuron- methyl Prosulfuron Pyrazosulfuron-ethyl Rimsulfuron Sulfometuron- methyl Sulfosulfuron Thifensulfuron- methyl Triasulfuron Tribenuron-methyl Trifloxysulfuron- methyl Tritosulfuron	
B	Inhibición de la enzima Aceto Lactato Sintasa (ALS)	Sulfonilurea		2
		Imidazolinona	Imazapic Imazamethabenz- methyl Imazamox Imazapyr Imazaquin Imazethapyr	
		Triazolpirimidina	Cloransulam-methyl Diclosulam florasulam flumetsulam metosulam penoxsulam	
		Pirimidinilribenzoato	Bispyribac-Na Pyribenzoxim Pyriftalid Pyriithiobac-Na Pyriminobac-methyl	

		Sulfonilamino-carboniltriazolinona	Flucarbazone-Na Propoxycarbazone- Na	
C1	Inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II (PSSII)	Triazina	Ametryne Atrazine Cyanazine Desmetryne Dimethametryne Prometon Prometryne Propazine Simazine Simetryne Terbumeton Terbutylazine Terbutryne Trietazine	5
		Triazinona	Hexazinone Metamitron Metribuzin	
		Trizolinona	Amicarbazone	
		Uracil	Bromacil Lenacil Terbacil	
		Piridazinona	Pyrrazon = cloridazon	
		Fenil-carbamato	Desmetpham Phenmedipham	
C2	Inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II (PSII)	Urea	Chlorobromuron Cholorotoluron Chloroxuron Dimefuron Diuron Ethidimuron Fenuron Fluometuron (see F3) Isoproturon Isouron Linuron Methabenzthiazuron Metobromuron Metoxuron Monolinuron Neburon Siduron tebutrhiuron	7
		Amide	Propanil Pentanochlor	
C3	Inhibición de la fotosíntesis en el fotosistema II (PSII)	Nitrilo	Bormofenoxin Bromoxynil Ioxynil	6
		Benzotiadiazinona	Bentazon	
		Fenil-piridazina	Pyridade Pyridafol	

D	Inhibición del flujo de electrones en el fotosistema I (PSI)	Bipiridilo	Diquat Paraquat	22
E	Inhibición de protoporfirogeno Oxidasa (PPO)	Difenileter	Acifluorfen-Na Binefox Clomethoxyfen Fluoroglycofen-ethyl Fomesafen Halosafen Lactofen Oxyfluorfen	14
		Fenilpirazol	Fluazolate Pyraflufen-ehtyl	
		N-fenilftalamida	Cinidon-ethyl Flumioxazin Flumiclorac-pentyl	
		Tiadiazol	Fluthiacet-methyl Thidiazimin	
		Oxadiazol	Oxadiazon Oxadiargyl	
		Triazolinona	Azafenidin Carfentrazone-ethyl Sulfentrazone	
		Oxasoldimediona	Pentoxazone	
F1	Inhibición de las síntesis de carotenoides a nivel de la fitoeno desaturasa (PDS)	Piridazinona	Norflurazon	12
		Piridincarboxiamida	Diflufenican Picolinafen	
F2	Inhibición de 4-hidroxifenil- piruvato-dioxigenasa (4-HPPD)	Triketona	Mesotrione Sulcotrione	27
		Isoxasol	Isoxachlortole Isoxaflutole	
		Pirasol	Benzofenap Pyrazolynate Pyrazoxyfen	
F3	Inhibición de la biosíntesis de carotenoides (sitio objetivo desconocido)	Triasol	Amitrole	11
		Isoxazolidinona	Clomazone	
		Urea	Fluometuron	
		Difenileter	Aclonifen	
G	Inhibición de EPSP sintasa	Glicina	Glyphosate Sulfosate	9
H	Inhibición de la glutamino sintasa	Ácido fosfínico	Glufosinate-ammonium Bialaphos = bilanaphos	10
I	Inhibición de DHP (dihidropterato) sintasa	Carbamato	Asulam	18

K1	Inhibición del ensamblaje de microtúbulos de la mitosis	Dinitroanilina	Benefin = benfluralin Butralin Dinitramine Ethalfluralin Oryzalin Pendimethalin Trifluralin	3
		Fosforoamidato	Amiprofos-methyl Butamiphos	
		Piridina	Dithiopyr Thiazopyr	
		Benzamida	Propyzamide = pronamide Tebutam	
		Acido benzoico	DCPA = chlorthal- dimethyl	
K2	Inhibición de la mitosis/Organización de microtúbulos	Carbamato	Chlorpropham Propham Carbetamide	23
K3	Inhibición de la división celular	Cloroacetamida	Acetochlor Alachlor Butachlor Dimethachlor Metazachlor Metolachlor Pethoxamid Pretilachlor Propachlor Thenylchlor	15
		Acetamida	Diphenamid Napropamide Naproanilide	
		Oxyacetamida	Flufenacet Mefenacet	
		Tetrazolinona	Fentrazamide	
		Nitrilo	Diclobenil Chlorthiamid	
L	Inhibición de la síntesis de la pared celular (celulosa)	Benzamida	Isoxaben	20.21.26
		Triazolocarboxamida	Flupoxam	
		Ácido quinolin carboxílico	Quinclorac	
M	Desacople (desorganización de la membrana)	Dinitrofenol	DNOC	24

N	Inhibición de la síntesis de lípidos (no inhibición de ACCasa)	Tiocarbamato	Butylate Cycloate Dimepiperate EPTC Esprocarb Molinate Orbencarb Pebulate Prosulfocarb Thiobencarb = Benthocarb Tiocarbazil Triallate Vernolate	8.26
		Fosforoditioato	Bensulide	
		Benzofuran	Benfuresate Ethofumesate	
		Acido cloro carbónico	TCA Dalapon Flupropanate	
O	Acción como ácido indolacético (Auxinas sintéticas)	Ácido fenoxi- carboxílico	Clomeprop 2,4-D 2,4-DB Dichlorprop = 2,4-DP MCPA MCPB Mecoprop = MCPP = CMPP	4
		Ácido benzoico	Chloramben Dicamba TBA	
		Ácido piridin- carboxílico	Clopyralid Fluroxypyr Picloram Triclopyr	
		Ácido quinolín carboxílico	Quinclorac	
P	Inhibición del transporte de auxinas	Ftalamato	Naptalam Diflufenzopyr-Na	19
Z	Desconocido. Nota: Ya que el sitio de acción de los herbicidas en el grupo Z es desconocido es probable que difieren en el sitio de acción entre sí y con otros grupos	Ácido arilaminopropionico	Flamprop-M-methyl / - isiopropyl	25.26.17
		Pirazolio	Didenzoquat	
		Organoarsenical	DSMA MSMA	

Fuente: Menne (2013)

Entre los herbicidas, las sulfonilureas y los compuestos fenoxi son los productos químicos más utilizados para controlar las malezas de hoja ancha en SSD (Mahajan y Chauhan, 2013b). Rao *et al.*, (2007) informaron sobre el uso extensivo de propanil, pendimetalin, fenoxaprop, molinate, thiobencarb, quinclorac, butachlor y acetochlor para controlar malezas gramíneas. Para controlar plantas anuales y malezas de hoja ancha, se ha encontrado que el herbicida oxadiazon es efectivo (Dickmann *et al.*, 1997). De manera similar, se ha encontrado que la aplicación de bispiribac sodio como postemergencia es muy efectiva contra malezas de hoja ancha (Jabran *et al.*, 2012a). Los herbicidas de preemergencia (oxadiazón, pendimetalina, etc.) se aplican dentro de los tres DDS en el arroz, preferiblemente poco después de la siembra y antes de la emergencia de malezas o cultivos (Jabran *et al.*, 2012 a, b). Los herbicidas de postemergencia temprana (butaclor, propanil, tiobencarb, etc.) se aplican en la etapa de 2 a 4 hojas. Los herbicidas de emergencia tardía (bispiribac-sodio, azimsulfuron, fenoxaprop, etoxysulfuron, 2,4-D, etc.) se aplican comúnmente por vía foliar, con tiempos de aplicación que varían entre 14 y 28 DDS (Awan *et al.*, 2015).

Cuando los cultivos están infestados de malas hierbas complejas y diversas, ningún herbicida por sí solo puede controlar todas las malas hierbas. En tales situaciones, se puede lograr un control efectivo de malezas mediante combinaciones de herbicidas (aplicaciones secuenciales o aplicación en tanque). herbicidas de amplio espectro en combinación con otras prácticas de cultivo. Esta práctica puede controlar eficazmente todos los grupos de malezas, incluidas las malezas herbáceas de hoja ancha (Awan *et al.*, 2015). Singh *et al.*, (2006) informaron que una mezcla en tanque de 50 + 18 g ha⁻¹ fenoxaprop-etilo más etoxisulfuronato 50 + 18 g ha⁻¹ como postemergencia a los 18–21 DDS fue eficaz tanto en malezas forrajeras como de hoja ancha. Al combinar diferentes herbicidas, se debe tener cuidado para asegurar que los diferentes herbicidas sean compatibles entre sí y no tengan efectos antagónicos. Zhang *et al.*, (2005) también encontraron un efecto antagonista sobre la actividad fenoxaprop sobre *Echinochloa spp.* cuando se aplica en combinación con bensulfuron, carfentrazone, halosulfuron y triclopyr. De manera similar, una aplicación de mezcla en tanque de fenoxaprop etilo o cihalofop-butilo con clorimuron más metsulfuron o 2,4-D también mostró un efecto antagónico. Awan *et al.*, (2015) demostraron que el oxadiazon controla eficazmente todas las especies de malezas dominantes presentes en sitio cuando se aplica solo o en combinación con otros herbicidas post-emergentes. Se encontró que es el mejor los herbicidas de amplio espectro cuando se aplica solo o en combinación

con otros herbicidas de postemergencia para controlar de manera efectiva todas las especies de malezas dominantes presentes en el sitio.

Los herbicidas han demostrado ser herramientas muy importantes para el control de malezas en el cultivo de arroz (Zimdahl, 2007). Además, la aplicación de herbicidas requiere el momento adecuado en relación con las etapas de crecimiento del cultivo y las malezas (King y Oliver, 1992), las condiciones climáticas (Hammerton, 1967) y las inundaciones. Por ejemplo, los herbicidas foliares activos como bentazón, 2,4-D y triclopir deben aplicarse después del drenaje para permitir un mejor contacto entre el herbicida y el follaje (Singh *et al.*, 2009). Sin embargo, algunos herbicidas, como el molinato, deben aplicarse en agua, ya que una aplicación en campos drenados provocaría su pérdida por volatilidad. Las sulfonilureas deben aplicarse en agua ya que la inundación actúa como un medio para una distribución uniforme.

En la investigación de Espinoza, (2019, realizada en la localidad de San Pablo, provincia de Los Ríos Ecuador, fue evaluado mezclas de herbicidas de pre-mergencia y post-emergencia en el cultivo de arroz. Según los resultados el mejor control de malezas a los 20 y 40 días se reportó en la mezcla de Clomazone + Bentiocarbo, en dosis de 0,850 L + 4,0 L y Bispiribac sodium + Picloram + 2,4 D amina en dosis de 0,4 L + 0,7 L sin daño evidente al cultivo.

Épocas de aplicación en herbicidas

Según Cerruffo (2018) la aplicación de los herbicidas pueden ser de varios tipos, todo de acuerdo a la época del cultivo y el sistema de siembra, clasificándolos de la siguiente manera:

Pre-Siembra (PS), el herbicida se aplica antes de la siembra. Generalmente se realiza en presencia de malas hierbas.

Presiembra incorporada (PSI). Estos herbicidas se incorporan al suelo durante el cultivo para evitar la evaporación.

Preemergentes (PRE), son aplicados antes de la emergencia de la maleza y del cultivo.

Post-Emergencia (POST): Estos herbicidas se suelen aplicar después de que el arroz ya ha emergido y actúan directamente sobre las hojas de la maleza. Estos son de dos tipos:

- Postemergentes tempranos (POST1), estos son aplicados a los 15 días después que el cultivo haya germinado.
- Postemergentes tardíos (POST2), son aplicados 20 días después que el cultivo haya germinado.

Resistencia a herbicidas en malezas

En la agricultura moderna, los herbicidas tienen un papel vital en el manejo de malezas, la función de los herbicidas está mejor desarrollado en el sistema de arroz aeróbico, haciendo que otros métodos sean menos efectivos y aumentando la infestación de malezas. La selección y propagación de malezas resistentes es un problema muy serio; bajo una continua presión de selección, muchas especies de malezas tolerantes a herbicidas han evolucionado en los sistemas de arroz (Fischer *et al.*, 2000).

Los mecanismos de resistencia a los herbicidas se agrupan en dos tipos: resistencia basada en el sitio objetivo y resistencia basada en el sitio no objetivo. La resistencia basada en el sitio objetivo es causada por la alteración de los sitios objetivo del herbicida. Mientras que la resistencia basada en el sitio no objetivo incluye otros mecanismos de resistencia, como un mayor metabolismo de los herbicidas, un mayor secuestro de herbicidas y una menor absorción de herbicidas (Powles y Yu, 2010).

Un informe reciente mostró que 48 especies de malezas que se encuentran en los cultivos de arroz desarrollaron tolerancia a varios herbicidas (Heap, 2016). La resistencia a los inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS) es la forma más común de resistencia en las malas hierbas del arroz. Las principales malezas han desarrollado resistencia a los inhibidores de ALS frente a varios herbicidas incluyen *E. crus-galli* y *C. difformis* (Heap 2016). Después de varios años de uso y abuso de los herbicidas fenoxi (2,4-D) y sulfonilureas en sistemas aeróbicos de arroz, varias especies de malezas, como *S. zeylanica*, *M. minuta* y *F. miliacea*, fueron dejando sin uso estos herbicidas en Tailandia, Malasia y Vietnam (Azmi *et al.*, 2005). De igual forma, han desarrollado resistencia a propanil, quinclorac y clomazone *E. crusgalli* (Talbert y Burgos, 2007).

Estas malas hierbas tolerantes a los herbicidas representan un gran desafío para los productores de arroz, ya que reducen los rendimientos y aumentan los costos de producción (Fischer *et al.*, 2000). Por lo tanto, en este contexto de casos crecientes de resistencia a los

herbicidas, se deben implementar estrategias integradas para controlar las malezas tolerantes a los herbicidas (Fischer y Hill, 2004).

Control biológico

El biocontrol es la técnica de aplicar enemigos naturales (agentes de biocontrol) a las malezas sin afectar significativamente las plantas deseadas. Estos patógenos biológicos incluyen insectos, animales, peces (como la carpa china), caracoles, pájaros (como los patos), microorganismos (como hongos, bacterias, virus y nematodos), sus sustancias tóxicas y plantas (plantas parásitas y compuestos parasitarios). Este enfoque es aún más útil cuando la evolución de algunas malezas tolerantes a herbicidas requiere el desarrollo de nuevas estrategias de control de malezas.

El control biológico se puede dividir en dos enfoques: convencional y bioherbicidas (Hallett, 2005). Los enfoques clásicos que utilizan depredadores o patógenos exóticos no se han implementado en el arroz. Sin embargo, el desarrollo de bioherbicidas es de gran interés para la investigación. Los enfoques de bioherbicidas se basan en enemigos naturales que pueden reducir el impacto negativo de las malezas en el rendimiento de los cultivos al no causar daños. Varios autores han revisado el estado de los bioherbicidas (Charudattan, 2001; Hallett, 2005).

Los patógenos fúngicos se pueden utilizar como agentes biológicos para el control de malezas (Motlagh, 2011). Los hongos *Trichoderma viride* Pers. y *Gliocladium virens* controlan *Echinochloa spp.* en condiciones de laboratorio que no afectan negativamente al cultivo de arroz (ICAR, 2007). De manera similar, se descubrió que el hongo *Fusarium equiseti* infecta a *Echinochloa crus-galli* con más frecuencia en comparación con el cultivo de arroz (Motlagh, 2011). Por lo tanto, *Fusarium equiseti* puede considerarse un bioherbicida que controla *E. crus-galli* en la etapa de crecimiento de dos o tres hojas de la maleza.

Las estrategias biológicas de control de malezas en el arroz también incluyen patos silvestres (Smith y Sullivan, 1980) e insectos (Oraze y Grigarick, 1992). Los agricultores de Arkansas, EE. UU., atraen a los patos inundando los campos de arroz durante el invierno, que controlan el arroz maleza (*Oryza sativa* f. *spontanea*) alimentándose de sus semillas. Una prueba de campo consecutiva de 9 años en China, informó que el cultivo de arroz - pato redujo el número de especies de malezas en el banco de semillas de 38 a 21 y redujo la densidad de semillas de malezas en el suelo en más del 90%. (Li *et al.*, 2012).

Los métodos de control biológico pueden ser herramientas muy útiles para controlar las malas hierbas en el arroz. Sin embargo, la integración de métodos biológicos con otros métodos de control es fundamental en el programa de manejo de los sistemas de producción de arroz (Smith, 1991). Las estrategias biológicas controlan un espectro comparativamente estrecho de especies de malezas en comparación con los métodos químicos u otros.

5.6. Manejo integrado de malezas

Como se mencionó anteriormente, las malezas son un factor limitante importante en el cultivo de arroz, especialmente en SSD, y el manejo adecuado de las malezas garantiza el éxito del cultivo de arroz. Hasta la década de 1940, los medios físicos, culturales y biológicos fueron los principales medios de control de malezas (Juraimi *et al.*, 2013). Desde su introducción a fines de la década de 1940, se ha creído que los herbicidas pueden resolver los problemas de malezas a largo plazo. Sin embargo, después de más de 50 años de uso intensivo de herbicidas, cada vez es más claro el uso exclusivo de herbicidas, lo que lo convierte en una estrategia a corto plazo (Juraimi *et al.*, 2013). El uso intensivo de herbicidas puede conducir a la contaminación ambiental, el desarrollo de resistencia a los herbicidas (Heap, 2016) y el empobrecimiento de la flora y la fauna natural. Además, la presencia de malezas rústicas y compleja significa que no solo puede fallar un método para controlar las malezas, sino que también puede conducir a al desarrollo de malezas complejas (Jabran y Chauhan). 2015). Debido a todos estos problemas, existe la necesidad de encontrar maneras de cómo reducir los peligros ambientales injustificados que plantea el uso de herbicidas y cómo eliminar el deshierbe manual que requiere mucha mano de obra en el arroz. Por lo tanto, existe la necesidad de reevaluar las estrategias de control de malezas físicas, culturales y biológicas integradas con métodos químicos de control de malezas. Un sistema que combina múltiples métodos de control de malezas se denomina control integrado de malezas. Esto incluye la selección, integración e implementación de medidas efectivas de control de malezas considerando sus impactos económicos, ambientales y sociales. El manejo integrado de malezas hace un mejor uso de los recursos y ofrece una gama más amplia de opciones de manejo (Buhler *et al.*, 2000).

La integración de prácticas agronómicas mejoradas, la puntualidad de las operaciones, fertilización óptima, manejo del agua e incorporación de residuos de cultivos al suelo, aumenta la eficiencia de los herbicidas aplicados y mejora la competitividad de las plantas contra las malezas (Chauhan *et al.*, 2012). Subramanian y Martin (2006) informaron que se

logró un control eficaz de malezas con pretilacloro y protector a 400 g ha⁻¹ combinado con cultivos intercalados de sesbania combinado con azolla. Pretilaclor con safener + intercalado de daincha + cultivo dual de azolla mantuvo su superioridad al registrar mayores rendimientos de grano (57,4 q ha⁻¹).

Muchos investigadores han defendido la adopción de un enfoque integrado de manejo de malezas para la producción sostenible de arroz (Bhurer *et al.*, 2013). Por lo tanto, el manejo integrado de malezas es la opción más viable y práctica para lograr un control sostenible de las malezas en los sistemas de arroz, proporcionando no solo un control económico de las malezas sino también el uso adecuado de herbicidas y evitar degradación ambiental.

5.7. Arroz tolerante a herbicidas

Se han introducido varios herbicidas selectivos que afectan negativamente a las malas hierbas sin afectar al arroz. Sin embargo, las malezas resistentes a los herbicidas y el arroz silvestre se están convirtiendo en un desafío cada vez mayor para los productores de arroz en todo el mundo (Mubeen *et al.*, 2014). La introducción de arroz tolerante a herbicidas puede ser una herramienta muy útil para el control de maleza.

Cuando el arroz es tolerante a herbicidas específicos o herbicidas que pueden dañar la planta, se denomina arroz tolerante a herbicidas (IRRI, 2015). Se desarrollaron tres sistemas de arroz tolerantes a herbicidas. Estos son tolerantes a: imidazolinona, glufosinato y glifosato (Gealy *et al.*, 2003). La tecnología transgénica se ha utilizado para cultivares de arroz tolerantes al glufosinato-glifosato. El arroz tolerante a la imidazolinona se desarrolló mediante mutagénesis de semillas inducida químicamente y mejoramiento convencional. Los cultivares de arroz tolerantes a herbicidas son una forma clásica, segura, novedosa y eficaz de controlar las malas hierbas mediante la aplicación de un método herbicida de nueva generación, altamente eficaz, no tóxico y rápidamente biodegradable (Mahajan y Chauhan 2013 a)

El primer arroz tolerante a herbicidas (Clearfield®) se desarrolló en los Estados Unidos para controlar las malas hierbas comúnmente conocidas como arroz rojo en los Estados Unidos. Hasta 2012, era el único arroz tolerante a herbicidas disponible para los productores en algunos países. La tecnología de arroz tolerante a herbicidas de Clearfield ofrece una opción para controlar las malas hierbas del arroz usando herbicidas de imidazolinona, particularmente imazetapir (Croughan, 2003; Reyes *et al.*, 2020). Además del arroz

Clearfield, también se han desarrollado otros cultivares de arroz tolerantes a herbicidas, como el arroz Liberty Link® y Roundup Ready® (IRRI, 2015).

El arroz tolerante a herbicidas puede ayudar a mejorar el control de malezas y reduce los costos de producción. Sin embargo, si esta herramienta no se maneja adecuadamente, los problemas de malezas se pueden agravar, especialmente en los sistemas de monocultivo. Si la resistencia a los herbicidas se propaga a las malezas y al arroz silvestre, su control puede volverse más difícil. Además, con el aumento del uso de un solo tipo de herbicida, muchas malezas pueden desarrollar resistencia a herbicidas similares. Por lo tanto, puede reducir la eficacia de los herbicidas actuales. El arroz tolerante a herbicidas se convierte en un problema cuando las semillas de arroz tolerantes a herbicidas en el suelo se convierten en malas hierbas en los años siguientes cuando se cultivan diferentes variedades de arroz. Hay una larga lista de malezas de arroz en todo el mundo que han desarrollado resistencia a los herbicidas (Heap, 2016).

5.8. Conclusiones

Las malas hierbas son limitaciones biológicas clave que obstruyen el crecimiento y la productividad de los sistemas de arroz. La flora de malezas está cambiando rápidamente en respuesta a cambios en el manejo agronómico. Por lo tanto, se necesitan estrategias y tecnologías apropiadas de manejo de malezas para mantener la estabilidad del rendimiento y reducir el costo de producción.

Hay varias estrategias en el manejo de malezas para los sistemas de arroz en combinación con herramientas agronómicas como: la densidad de siembra, el espacio entre hileras, el patrón de siembra y la explotación de cultivares competitivos de malezas. El uso de una sola estrategia no puede proporcionar un control de malezas eficaz y sostenible durante toda la temporada, por la variabilidad y diferentes hábitos de crecimiento en estos organismos.

5.9. Bibliografía

- Anwar MP, Juraimi AS, Puteh A, Selamat A, Man A, Hakim MA (2011) Seeding method and rate influence on weed suppression in aerobic rice. *Afr J Biotechnol* 10:15259–15271.
- Avola G, Tuttobene R, Gresta F, Abbate V (2008) Weed control strategies for grain legumes. *Agron Sustain Dev* 28:389–395.

- Awan TH, Cruz PCS, Chauhan BS (2015) Agronomic indices, growth, yield-contributing traits, and yield of dry-seeded rice under varying herbicides. *Field Crop Res* 177:15–25.
- Azmi M, Abdullah MZ (1998) A manual for the identification and control of padi angin (weedy rice) in Malaysia. MARDI Publication, Serdang, p. 18.
- Azmi M, Baki BB (1995) The succession of noxious weeds in tropical Asian rice fields with emphasis on Malaysian rice ecosystem. Proceedings of 15th Asian Pacific Weed Science society Conference, Tsukuba, pp. 51–67.
- Azmi M, Chin D, Vongsaroj P, Johnson D (2005) Emerging issues in weed management of direct-seeded rice in Malaysia, Vietnam, and Thailand. In: Toriyama K, Heong KL, Hardy B (eds) *Rice is life: scientific perspectives for the 21st century*. International Rice Research Institute, Philippines Proceedings world rice research conference, Tokyo and Tsukuba, November, 4–7, 2004, Japan, pp. 196–198.
- Azmi M, Rezaul MR (2008) *Weedy rice- biology, ecology and management*. MARDI Publication, Kuala Lumpur, p. 56.
- Bhurer KP, Yadav DN, Ladha JK, Thapa RB, Pandey K (2013) Effect of integrated weed management practices on performance of dry direct seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Agron J Nepal* 3:53–63
- Buhler DD (2002) Challenges and opportunities for integrated weed management. *Weed Sci* 50:273–280.
- Buhler DD, Liebman M, Obrycki JJ (2000) Theoretical and practical challenges to an IPM approach to weed management. *Weed Sci* 48:274–280.
- Cadena, D; Helfgott, S; Drouet, A; Cobos, F and Rojas, N. (2021). "Herbicides in the Irrigated Rice Production System in Babahoyo, Ecuador, Using Neutrosophic Statistics." *Neutrosophic Sets and Systems* 39, 1 (). https://digitalrepository.unm.edu/nss_journal/vol39/iss1/13.
- Cerruffo, O. (2018). Manejo de malezas en arroz de riego (*Oryza sativa* L.) sembrado con semilla pre-germinada, en la zona de Babahoyo (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2018).

- Charudattan R (2001) Biological control of weeds by means of plant pathogens: significance for integrated weed management in modern agroecology. *BioControl* 46:229–260.
- Chauhan BS (2013a) Effect of tillage systems, seeding rates, and herbicides on weed growth and grain yield in dry-seeded rice systems in the Philippines. *Crop Prot* 54:244–250.
- Chauhan BS (2013b) Strategies to manage weedy rice in Asia. *Crop Prot* 48:51–56.
- Chauhan BS, Abugho SB (2013) Effects of water regime, nitrogen fertilization, and rice plant density on growth and reproduction of lowland weed *Echinochloa crus-galli*. *Crop Prot* 54:142–147
- Chauhan BS, Johnson DE (2009) Influence of tillage systems on weed seedling emergence pattern in rainfed rice. *Soil Tillage Res* 106:15–21
- Chauhan BS, Johnson DE (2010a) The role of seed ecology in improving weed management strategies in the tropics. *Adv Agron* 105:221–262.
- Chauhan BS, Johnson DE (2010b) Implications of narrow crop row spacing and delayed *Echinochloa colona* and *Echinochloa crus-galli* emergence for weed growth and crop yield loss in aerobic rice. *Field Crop Res* 117:177–182.
- Chauhan BS, Mahajan G, Sardana V, Timsina J, Jat ML (2012) Productivity and sustainability of the rice-wheat cropping system in the Indo-Gangetic Plains of the Indian subcontinent: problems, opportunities, and strategies. *Adv Agron* 117:315–369.
- Chauhan BS, Opeña J (2012) Effect of tillage systems and herbicides on weed emergence, weed growth, and grain yield in dry-seeded rice systems. *Field Crop Res* 137:56–69
- Chauhan BS, Opeña J (2013a) Implications of plant geometry and weed control options in designing a low-seeding seed-drill for dry-seeded rice systems. *Field Crop Res* 144:225–231
- Chauhan BS, Opeña J (2013b) Weed management and grain yield of rice sown at low seeding rates in mechanized dry-seeded systems. *Field Crop Res* 141:9–15
- Croughan TP (2003) Clearfield rice: it's not a GMO. *Louisiana Agric* 46:24–26.

- Davis AS, Liebman M (2003) Cropping system effects on giant foxtail (*Setaria faberi*) demography: I. Green manure and tillage timing. *Weed Sci* 51:919–929.
- De Datta SK, Baltazar AM (1996) Weed control technology as a component of rice production systems. In: Auld BA, Kim KU (eds) *Weed management in rice*. FAO plant production and protection paper 139, Rome, pp. 27–52
- Delouche JC, Burgos NR, Gealy DR, Zorilla-San Martin G, Labrada R, Larinde N (2007) *Weedy rices: origin, biology, ecology and control*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Dickmann R, Melgarelo J, Loubiere P, Montagnon M (1997) Oxadiargyl: a novel herbicide for rice and sugarcane. In: *Proceedings of the 1997 British Crop Protection Conference-Weeds*, Brighton, pp. 51–57.
- Espinoza, F. (2019). *Mezclas de herbicidas de pre-emergencia y post-emergencia en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.) de riego en la zona de Babahoyo* (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019).
- Farooq M, Jabran K, Cheema ZA, Wahid A, Siddique KH. (2011) The role of allelopathy in agricultural pest management. *Pest Manag Sci* 67:493–506.
- Fischer AJ, Ateh CM, Bayer DE, Hill JE (2000) Herbicide-resistant *Echinochloa oryzoides* and *E. phyllopogon* in California *Oryza sativa* fields. *Weed Sci* 48:225–230.
- Fischer AJ, Hill JE (2004) Weed control programs. In: University of California Cooperative Extension and California Rice Research Board (ed) *Rice production workshop*. University of California, Division of Agriculture and Natural Resources, Oakland, pp. 9.1–9.10.
- Fischer AJ, Ramirez HV, Lozano J (1997) Suppression of jungle rice [*Echinochloa colona* (L.) Link] by irrigated rice cultivars in Latin America. *Agron J* 89:516–552
- Fofana B, Rauber R (2000) Weed suppression ability of upland rice under low-input conditions in West Africa. *Weed Res* 40:271–280.
- Gealy DR, Mitten DH, Rutger JN (2003) Gene flow between red rice (*Oryza sativa*) and herbicide resistant rice (*O. sativa*): implications for weed management. *Weed Technol* 17:627–645.

- Gibson KD, Fischer AJ, Foin TC, Hill JE (2002) Implications of delayed *Echinochloa* spp. Germination and duration of competition for integrated weed management in water-seeded rice. *Weed Res* 42:351–358.
- Gibson KD, Foin TC, Hill JE (1999) The relative importance of root and shoot competition between water-seeded rice and water grass. *Weed Res* 39:181–190.
- Hallett SC (2005) Where are the bioherbicides? *Weed Sci* 53:404–415.
- Harding SS, Jalloh AB (2011) Evaluation of the relative weed competitiveness of upland rice varieties in Sierra Leone. *African J Plant Sci* 5:396–400
- Heap I (2016) The international survey of herbicide resistant weeds. www.weedscience.org.
- Ho NK (1991) Comparative ecological studies of weed flora in irrigated rice fields in the Muda area. Muda Agricultural Development Authority, Telok Chenga, Alor Setar Kedah, p. 97.
- ICAR (2007) Vision 2025. NRCWS perspective plan. Indian Council of Agriculture Research, New Delhi
- IRRI (2015) Herbicide-resistant rice. <http://irri.org/news/hot-topics/herbicide-resistant-rice>.
- Jabran K, Chauhan BS (2015) Weed management in aerobic rice systems. *Crop Prot* 78:151–163.
- Jabran K, Ehsanullah E, Hussain M, Farooq M, Babar M, Dogan MN, Lee DJ (2012a) Application of bispyribac-sodium provides effective weed control in direct-planted rice on a sandy loam soil. *Weed Biol Manag* 12:136–145.
- Jabran K, Farooq M, Hussain M, Ehsanullah, Khan MB, Shahid M, Lee DJ (2012b) Efficient weeds control with penoxsulam application ensures higher productivity and economic returns of direct seeded rice. *Int J Agric Biol* 14:901–907.
- Jabran K, Mahajan G, Sardana V, Chauhan BS (2015) Allelopathy for weed control in agricultural systems. *Crop Prot* 72:57–65.
- Jannink JL, Orf JH, Jordan NR, Shaw RG (2000) Index selection for weed suppressive ability in soybean. *Crop Sci* 40:1087–1094.

- Johnson DE (1996) Weed management in small holder rice production in the tropics. <http://ipmworld.umn.edu/chapters/johnson.htm>.
- Jordan N (1993) Prospects for weed control through crop interference. *Ecol Appl* 3:84–91.
- Juraimi AS, Uddin Md K, Anwar Md P, Mohamed MTM, Ismail Mohd R, Azmi M (2013) Sustainable weed management in direct seeded rice culture: a review. *Aust J Crop Sci* 7:989–1002.
- Karim SMR, Man AB, Sahid IB (2004) Weed problems and their management in rice fields of Malaysia: an overview. *Weed Biol Manage* 4:177–186.
- Kristensen L, Olsen J, Weiner J (2008) Crop density, sowing pattern, and nitrogen fertilization effects on weed suppression and yield in spring wheat. *Weed Sci* 56:97–102.
- Kumar V, Bellinder RR, Gupta RK, Malik RK, Brainard DC (2008) Role of herbicide-resistant rice in promoting resource conservation technologies in rice–wheat cropping systems of India: a review. *Crop Prot* 27:290–301.
- Li SS, Wei SH, Zuo RL, Wei JG, Qiang S (2012) Changes in the weed seed bank over 9 consecutive years of rice-duck farming. *Crop Prot* 37:42–50.
- Lotz LAP, Wallinga J, Kropff MJ (1995) Crop-weed interactions: quantification and prediction. In: Glen DM, Greaves MP, Anderson HM (eds) *Ecology and integrated farming systems*. Wiley and Sons, Chichester, pp. 31–47.
- Lovato, R; Giménez, L & López, M. (2022). *Ecología de comunidades de malezas de arroz (Oryza sativa L.) como aporte hacia una agricultura sustentable*. Ediciones INTA.
- Mahajan G, Chauhan B, Johnson D (2009) Weed management in aerobic rice in Northwestern Indo-Gangetic Plains. *J Crop Improv* 23:366–382.
- Mahajan G, Chauhan BS (2011) Effects of planting pattern and cultivar on weed and crop growth in aerobic rice system. *Weed Technol* 25:521–525.
- Mahajan G, Chauhan BS (2013a) The role of cultivars in managing weeds in dry-seeded rice production systems. *Crop Prot* 49:52–57

- Mahajan G, Chauhan BS (2013b) Herbicide options for weed control in dry-seeded aromatic rice in India. *Weed Technol* 27:682–689
- Matloob A, Khaliq A, Chauhan BS (2015) Weeds of direct-seeded rice in Asia: problems and opportunities. *Adv Agron* 130:291–336.
- Mazid MA, Jabber MA, Mortimer M, Wade LJ, Riches CR, Orr AW (2003) Improving rice-based cropping systems in north-west Bangladesh: diversification and weed management. In: *The BCPC International Congress, Crop Prod Prot, Hampshire, UK, BCPC publisher, pp. 1029–1034.*
- Mennan H, Ngouajio M, Sahin M, Isik D, Altop EK (2012) Competitiveness of rice (*Oryza sativa* L.) cultivars against *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. in water-seeded production systems. *Crop Prot* 41:1–9.
- Menne, H. (2013). Classification of Herbicides According to Side of Action. Ficha Informativa, Comité de Acción contra la Resistencia a Herbicidas. Obtenido de <http://www.weedscience.org/Documents/ShowDocuments.aspx?DocumentID=1193>
- mith RJ Jr (1991) Integration of biological control agents with chemical pesticides. In: TeBeest DO (ed) *Microbial control of weeds*. Chapman and Hall, New York, pp. 189–208.
- Moody K, Cordova VG (1985) Wet-seeded rice. In: *Women in rice farming*. International Rice Research Institute, Los Baños, pp. 467–480
- Morcote, H. (2013). Eficacia y selectividad de Amicarbazone aplicado en diferentes dosis en caña panelera (*Saccharum officinarum* L.), en Güepsa, Santander. *Ciencia y Agricultura*, X(1), 47-56.
- Motlagh MRS (2011) *Fusarium Equiseti* (corda) Saccardo as biological control agent of barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli* L.) in rice fields. *J Food Agric Environ* 9:310–313.
- Moukoumbi YD, Sie M, Vodouhe R, Bonou W, Toulou B, Ahanchede A (2011) Screening of rice varieties for their weed competitiveness. *Afr J Agric Res* 6:5446–5456.
- Mubeen K, Nadeem M, Tanveer A, Jhala A (2014) Effects of seeding time and weed control methods in direct seeded rice (*Oryza sativa* L.). *J Anim Plant Sci* 24:534–542.

- Mukherjee D (2004) Weed management in rice. *Agric Today* 11:26–27.
- Namuco OS, Cairns JE, Johnson DE (2009) Investigating early vigour in upland rice (*Oryza sativa* L.): part I. Seedling growth and grain yield in competition with weeds. *Field Crop Res* 113:197–206.
- Ni H, Moody K, Robles RP, Paller EC, Lales JS (2000) *Oryza sativa* plant traits conferring competitive ability against weeds. *Weed Sci* 48:200–204.
- Nichols V, Verhulstb N, Cox R, Govaerts B (2015) Weed dynamics and conservation agricultura principles: a review. *Field Crop Res* 183:56–68.
- Oerke EC (2006) Crop losses to pests. *J Agric Sci* 144(01):31–43.
- Oliver LR, Klingaman TE, McClelland M, Bozsa RC (1993) Herbicide systems in stale seedbed soybean (*Glycine max*) production. *Weed Technol* 7:816–823.
- Oraze MJ, Grigarick AA (1992) Biological control of ducksalad (*Heteranthera limosa*) by wáterlily aphid (*Rhopalosiphum nymphaeae*) in rice (*Oryza sativa*). *Weed Sci* 40:333–336.
- Ordeñana, R. (2013). *Bioecología y Fisiogenética de Malezas*. Babahoyo, Los Rìos, Ecuador: Editoral Malena.
- Powles SB, Yu Q (2010) Evolution in action: plants resistant to herbicides. *Annu Rev Plant Biol* 61:317–347.
- Ramírez, J. (2014). *Dinámica poblacional de malezas del cultivo de arroz en las zonas centro, meseta y norte del departamento del Tolima*. Tesis o trabajo de Investigación presentado como requisito para optar al título de Magister en Ciencias Agrarias-Malherbología, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Bogotá, Colombia.
- Rao AN (2011) Integrated weed management in rice in India. In: *Rice Knowledge Management Portal (RKMP)*. Directorate of Rice Research, Rajendranagar, pp. 1–35.
- Rao AN, Johnson DE, Sivaprasad B, Ladha JK, Mortimer AM (2007) Weed management in direct- seeded rice. *Adv Agron* 93:153–255.

- Rao AN, Moody K (1994) Ecology and management of weeds in farmers' direct seeded rice (*Oryza sativa* L.) fields. International Rice Research Institute, Los Baños.
- Reyes Borja, W. O., Santelices Villalta, J. C., Quispe Sandoval, M. F., & Cobos Mora, F. J. (2020). Variación hereditaria de líneas F2 de arroz (*Oryza sativa* L. ssp. indica) derivadas de un parental femenino portador del gen Clearfield. *Journal of Science and Research*, 5(CININGEC), 275–293. Recuperado a partir de <https://revistas.utb.edu.ec/index.php/sr/article/view/1013>.
- Rocafuerte, Á. (2019). Herbicidas postemergentes en el manejo de control de malezas y su efecto en el rendimiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) (Bachelor's thesis, Babahoyo: UTB, 2019).
- Rodenburg J, Johnson DE (2009) Weed management in rice-based cropping systems in Africa. *Adv Agron* 103:149–218.
- Roder W (2001) Slash-and-burn rice systems in the hills of northern Lao PDR. In: Description, challenges, and opportunities. International Rice Research Institute, Los Baños, p. 201.
- Saito K, Azoma K, Rodenburg J (2010b) Plant characteristics associated with weed competitiveness of rice under upland and lowland conditions in West Africa. *Field Crop Res* 116:308–317.
- Saito K, Phanthaboon K, Shiraiwa T, Horie T, Futakuchi K (2010a) Genotypic variation in ability to recover from weed competition at early vegetative stage in upland rice. *Plant Prod Sci* 13:116–120.
- Shrestha A, Lanini T, Mitchell J, Wright S, Vargas R, Tulare UCCE, County M (2005) An update of weed management issues in conservation tillage systems. *California Weed Science Society Proceedings*, Monterey, CA, pp. 58–63.
- Sindhu PV, Thomas CG, Abraham CT (2010) Seed bed manipulations for weed management in wet seeded rice. *Indian J Weed Sci* 42:173–179
- Singh G, Singh Y, Singh VP, Johnson DE, Mortimer M (2005a) System level effects in weed management in rice-wheat cropping in India. BCPC International Congress on Crop Science and Technology-2005. SECC, Glasgow.

- Singh M, Bhullar MS, Chauhan BS (2015) Influence of tillage, cover cropping, and herbicides on weeds and productivity of dry direct-seeded rice. *Soil Tillage Res* 147:39–49.
- Singh S, Bhushan L, Ladha JK, Gupta RK, Rao AN, Shivaprasad B (2006) Weed management in dry-seeded rice (*Oryza sativa*) cultivated on furrow irrigated raised bed planting system. *Crop Prot* 25:487–495.
- Singh S, Chhokar RS, Gopal R, Ladha JK, Gupta RK, Kumar V, Singh M (2009) Integrated weed management: a key to success for direct-seeded rice in the Indo-Genetic Plains. In: Ladha JK, Singh Y, Errenstein O, Hardy B (eds) *Integrated crop and resource management in the rice – wheat system of South Asia*. International Rice Research Institute, Los Banos, pp. 261–278
- Singh Y, Singh G (2008) Cropping systems and weed flora of rice and wheat in the Indo Gangetic plains. In: Singh Y, Singh VP, Chauhan B, Orr A, Mortimer AM, Johnson DE, Hardy B (eds) *Direct seeding of rice and weed management in irrigated rice wheat cropping system of the Indo Gangetic Plains*. Los Banos, International Rice Research Institute and Pantnagar: Directorate of Experiment Station, G B Pant University of Agriculture and Technology, pp. 33–43.
- Smith RJ Jr, Sullivan JD (1980) Reduction of red rice grain in rice fields by winter feeding of ducks. *Arkansas Farm Res* 29:3
- Subramanian E, Martin GJ (2006) Effect of chemical, cultural and mechanical methods of weed control on wet seeded rice. *Indian J Weed Sci* 38:218–220.
- Suria ASMJ, Juraimi AS, Rahman MM, Man AB, Selamat A (2011) Efficacy and economics of different herbicides in aerobic rice system. *Afr J Biotechnol* 10:8007–8022.
- Talbert RE, Burgos NR (2007) History and management of herbicide-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) in Arkansas rice. *Weed Technol* 21:324–331.
- Timsina J, Haque, Chauhan BS, Johnson DE (2010) Impact of tillage and rice establishment methods on rice and weed growth in the rice-maize-mungbean rotation in northern Bangladesh. Presented at the 28th International Rice Research Conference, 8–12 November 2010. Hanoi, Vietnam OP09: Pest, Disease, and Weed Management

Vanegas, F., & Muñoz, R. (1984). *Malezas Tropicales del Litoral Ecuatoriano*. Institución Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Estación Experimental "Pichilingue". Quito, Ecuador: INIAP.

Zhao DL, Atlin GN, Bastiaans L, Spiertz JHJ (2006) Cultivar-weed competitiveness in aerobic rice: heritability, correlated traits, and the potential for indirect selection in weed-free environment. *Crop Sci* 46:372–380.

Zhao DL, Bastiaans L, Atlin GN, Spiertz JHJ (2007) Interaction of genotype × management on vegetative growth and weed suppression of aerobic rice. *Field Cro.*

Capítulo VI. La quema de los residuos de cosecha y su impacto en la fertilidad de los suelos.

Edwin Stalin Hasang Moran

Universidad Agraria del Ecuador
<https://orcid.org/0000-0001-6832-2047>

Simón Ezequiel Farah Asang

Universidad Agraria del Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-0089-1419>

Wilmer Baque Bustamante

Universidad Agraria del Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-5604-2192>

Marlon Stalin Ovando Quintanilla

Universidad Agraria del Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-4379-9142>

Fernando Javier Cobos Mora

Universidad Técnica de Babahoyo
<https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

6.1. Introducción

Los principales desafíos que enfrenta el mundo incluyen la inseguridad alimentaria, la escasez de agua, la degradación de la tierra, la escasez de energía, el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el cambio climático (Alsafadi *et al.*, 2020). Los GEI son gases activos que atrapan la radiación solar reflejada desde la tierra y aumentan el calentamiento global (Tessum *et al.*, 2014). Los principales GEI son el dióxido de carbono (CO²), el metano (CH⁴) y el óxido nitroso (N₂O) (Oertel *et al.*, 2016).

En los últimos años, las actividades antropogénicas han contribuido a más del 55 % de las emisiones totales de GEI (Mohammed *et al.*, 2021). Más del 22 % de las emisiones totales de GEI se han originado en el sector agrícola (Platis *et al.*, 2019), donde diferentes actividades, así como la degradación de las tierras agrícolas, han aumentado las emisiones de GEI (Gozubuyuk *et al.*, 2020). Por lo tanto, la determinación y medición de las emisiones de CO₂ de las tierras agrícolas ha recibido una gran atención por parte de científicos y legisladores de todo el mundo (Li *et al.*, 2016).

La quema es una de las prácticas agrícolas tradicionales más contaminantes en los países en desarrollo, incluido Ecuador, ya que es la forma más fácil y económica de eliminar los residuos poscosecha (Beuchelt *et al.*, 2015). La quema, tiene muchos impactos en el medio ambiente, puede influir en las funciones biológicas de la materia orgánica, su descomposición, el secuestro de carbono, la agregación del suelo y directamente a través de una pérdida de aporte de materia orgánica (Giller *et al.*, 1997). Además, la quema de biomasa contribuye a la generación de gases y partículas contaminantes en la atmósfera con un impacto perjudicial en la química atmosférica global (Xinghua *et al.*, 2007). La quema de residuos de cultivos tiene muchos efectos adversos sobre la fertilidad del suelo y, por lo tanto, sobre los ingresos de los agricultores. La falta de cobertura superficial hace que el suelo sea propenso a la erosión, la fertilidad del suelo disminuye con la pérdida de suelo superficial. El nitrógeno, el nutriente que limita con mayor frecuencia el rendimiento del maíz (Boonlertnirun y Jompuk, 2011), y el azufre se pierden en la atmósfera en el incendio. Los efectos nocivos de la quema de residuos en la producción de maíz desaparecerían cuando se detuviera la quema (Devkota y Rerkasem, 2000).

Las emisiones de contaminantes climáticos y atmosféricos debido a la quema de residuos de cultivos podrían aumentar en las próximas décadas, ya que las proyecciones muestran que alimentar a más de 9 mil millones de personas en 2050 requeriría un aumento del 70% en la producción de alimentos a partir de 2005/2007. Factores como el cambio climático, la escasez de agua, el aumento de las temperaturas y las condiciones climáticas extremas seguramente tendrán efectos severos en los rendimientos de los cultivos, impactando negativamente en muchas regiones agrícolas, que deberían cambiar a prácticas agrícolas sostenibles para mitigar los efectos de este desafío global (Elferink y Schierhorn, 2016).

A nivel mundial, el deterioro de la salud del suelo puede ser la principal limitación que contribuye a los bajos rendimientos en la agricultura de subsistencia y, por lo tanto, un importante contribuyente a la inseguridad alimentaria. En la actualidad, la degradación de la fertilidad y productividad de los suelos agrícolas se atribuye a la realización de prácticas inadecuadas, lo que cuestiona la sostenibilidad de la producción de cultivos, especialmente de cultivos intensivos como el maíz (Lal, 2004).

Estos bajos niveles de fertilidad en gran medida son resultado de las malas prácticas de manejo que los agricultores aplican al suelo, como la quema y el sobre pastoreo, principalmente; cuando se siembra en terrenos inclinados, que es donde se produce la mayor

pérdida de suelo y de nutrientes, bajando así la fertilidad y la capacidad productiva del mismo. Para mantener fértil y productivo el suelo, es necesario aplicar prácticas de manejo y de conservación, que además ayuden a mantener la humedad del suelo por más tiempo. (FHIA, 2011).

Se estima que los seres humanos son responsables de aproximadamente el 90% de la combustión de biomasa mundial, principalmente a través de la quema deliberada de vegetación forestal y residuos de pastos y cultivos para favorecer el crecimiento de nuevas cosechas, limpiar el terreno y destruir hábitat de insectos dañinos (Harrison, 2002; SAG, 2006).

El sistema agrícola roza-tumba-quema, fue en principio ambientalmente sustentable debido a que en su forma tradicional no utilizaba agroquímicos (Perry, *et al.*, 2016), y aumentaba su fertilidad de manera natural mediante el desarrollo de vegetación secundaria (Dockersmith, *et al.*, 2000).

Sin embargo, la intensificación de este sistema ha acelerado el degrado del suelo aprovechable para la agricultura (Zermeño, *et al.*, 2016), precipitando la pérdida de los mismos, pues, al quedar sin protección, las lluvias arrastran las partículas de suelo a las quebradas y ríos (SAG, 2006), provocando como consecuencia un suelo muy infértil con falta de humedad (Castillo & Navarro, 2007), donde además la fauna benéfica muere (Flores, 2005); constituyéndose este método de la agricultura tradicional en una de las causas principales de la pérdida de biodiversidad del mundo (Gudynas & Ghione, 2010).

Según Hauck (1974) la agricultura de corte y quema es el método predominante en el 30% de los suelos en condiciones de explotación en el mundo. En Ecuador, el sector campesino ocupa más del 50% de la superficie para cultivos alimentarios como maíz, frijol, cebada y ají, donde la técnica de tumba, roza, y quema aceleró la destrucción del suelo, fauna, aguas y bosques (Migongo, 2013).

6.2. Rastrojos

Los rastrojos son subproductos derivados de las actividades agrícolas y son importantes por su uso como fuente de alimentación en la ganadería, desempeñan un papel preponderante en los sistemas agrícolas y pecuarios. (Vélez, *et al.*, 2013).

Estos restos se caracterizan por una marcada estacionalidad, tanto por razón del momento de su producción como por la necesidad de retirarlos del campo en el menor tiempo posible para no interferir en otras tareas agrícolas y evitar la propagación de plagas e incendios. Los restos vegetales tienen importancia en los microorganismos ya que influye de forma positiva en cuanto a número y actividad, si estos son incorporados al suelo (proceso de descomposición), además estos microorganismos tienen participación en las propiedades físico-químicas del suelo. Por esta razón se recomienda incorporar los restos del cultivo al suelo para evitar erosión, deterioro del suelo y principalmente pérdidas de nutrientes importantes para las plantas. (Acevedo, 2003)

Se consideran que anualmente se producen en el mundo 2962 millones de toneladas de restos agrícolas, de los cuales la cantidad de los principales nutrientes (N, P, K) que podrían ser recuperados de estos residuos serían 74 millones de toneladas anuales en el mundo. (GOH y Kumar, 2000)

En general, los principales elementos que contienen los diferentes cultivos son: Potasio, N y Ca. Los cereales se destacan por un mayor contenido de elementos monovalentes como K. Una cantidad de rastrojos de trigo equivalentes a 1 O Tm/Ha, reciclaría al suelo en un año una cantidad de macronutrientes de 58 Kg de N, 4 Kg de P, 114 Kg de K, 12 Kg de S, 51 Kg de Ca y 9 Kg de Mg. Además de alrededor de 400 Kg de carbono por tonelada de rastrojo. (Maturana y Acevedo, 2003).

6.3. Características de los residuos de cultivos

Los residuos vegetales se pueden diferenciar en dos componentes; uno estructural y uno metabólico.

El primero está definido por estructuras celulósicas, lignificas, paredes celulares y polisacáridos estructurales; y los componentes metabólicos o citoplasmáticos, están definidos por proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, almidones, etc. entre las cuales se encuentran la mayor proporción del nitrógeno de los tejidos vegetales. (Rodríguez, 1993)

Composición. Los residuos de cultivos se componen principalmente de celulosa (40–50% en peso), hemicelulosa (15–25% en peso), lignina (20–30% en peso), proteína y azúcares solubles (glucosa, fructosa, entre otros.). Las características de composición de los residuos de cultivos se resumen en la Tabla 1 (Wang *et al.*, 2020). La celulosa es un biopolímero compuesto por una unidad de glucosa monomérica unida con un enlace glucosídico 1,4-β-.

Se presenta en forma de cadenas de microfibrillas alineadas en paralelo en la pared celular vegetal unidas por puentes de hidrógeno entre las cadenas. La hemicelulosa tiene una composición compleja (xilanos, xiloglucanos, arabinoxilanos y glucomananos). La lignina es un polímero complejo fenólico formado por la reticulación de tres componentes principales: p-coumaryl, coniferyl, y sinapyl alcohol. En las paredes celulares, la celulosa está rodeada por una monocapa de hemicelulosa e incrustada en una matriz de hemicelulosa y lignina, que forman una estructura tridimensional compleja y estable (Grzyb *et al.*, 2020).

Tabla 1. Residuos de cultivos producidos en el mundo

Materia prima	Residuos de cultivos (MT)
Tallos de maíz	750
Arroz	360
Trigo	600
Caña de azúcar	102
Algodón	89
Otros	544
Residuos Totales	2.445,2

Fuente: Wang *et al.*, (2020)

Contenido nutritivo. Como biomasa rica en carbono, los residuos de cultivos contienen carbono (40 %-45 %), nitrógeno (0,6 %-1 %), fósforo (0,45 %-2 %), potasio (14 %-23 %) y microelementos, que son necesarios para el crecimiento de los cultivos (Tabla 2). Ayudan a aliviar los desequilibrios de nutrientes en el suelo agrícola y compensan los inconvenientes de los fertilizantes inorgánicos. La tasa de liberación y el contenido de nutrientes están relacionados con las propiedades de los residuos del cultivo (relación C/N y composición química), el clima (temperatura y humedad), las condiciones del suelo (pH y contenido de agua) y el método de aplicación del cultivo. residuos en el suelo (directos e indirectos) (Grzyb *et al.*, 2020).

Por lo general, se supone que una relación C/N superior a 25:1 que conduce a la rápida inmovilización del nitrógeno inorgánico, mientras que una relación C/N más baja da como resultado la mineralización. La temperatura cálida y la humedad adecuada del suelo pueden mejorar potencialmente la descomposición de los residuos de cultivos y la liberación de nitrógeno (Singh *et al.*, 2020).

Tabla 2. Características de composición de residuos de maíz (en base seca).

Propiedades	Rastrojo de maíz
C (%)	43.86 ± 1.31
N (%)	1.00 ± 0.25
P (%)	0.95 ± 0.49
K (%)	17.73 ± 7.00
S (%)	0.39 ± 0.22

Fuente: Wang *et al.*, (2020)

Estructura física. Los residuos de cultivos tienen una estructura tubular distintiva y una pared gruesa con un peso ligero, sus estructuras huecas están compuestas por paredes celulares y abundantes poros. Las características de la estructura de los poros incluyen principalmente el área superficial específica, el volumen de los poros y la distribución del tamaño de los poros (Chen *et al.*, 2017). Los diferentes tipos de residuos de cultivos tienen diferentes estructuras de poros, la estructura interior de paja de arroz tiene un gran número de vasos vainas del haz, cavidades medulares, canales intercelulares y otros tejidos porosos, que tienen una superficie específica baja (0,77 m² /g) y un volumen de poros (0,0059 m³ /g) (Xu *et al.*, 2016). Los poros de tamaño nanométrico (5–100 nm) son los principales poros en los tallos de maíz, el área total de poros es de 31,88 m² /g y la porosidad es del 73,33% (Li y Chen, 2014).

La densidad aparente refleja la permanencia de los residuos de cultivos, que varía con los tipos y la uniformidad de los residuos. Los tallos huecos y la epidermis externa de baja densidad hacen que la densidad aparente de los residuos de maíz sea extremadamente pequeña. La densidad aparente de la paja de soya es mayor debido a su tallo sólido y su estructura compacta (Huo *et al.*, 2012).

6.4. Quema de rastrojos

La quema de rastrojos ha sido y continúa siendo, una práctica habitual y muy extendida, aun cuando produce numerosos efectos indeseables desde el punto de vista ambiental. Afectando a la vegetación y la fauna silvestre al posibilitar incendios de zonas adyacentes a los potreros quemados y con ello la pérdida de fauna benéfica asociada a los cultivos (Jorge, 2015)

La quema de rastrojos produce numerosos efectos indeseables especialmente sobre el suelo (incremento de la erosión y pérdida de la fertilidad a largo plazo), la atmosfera (gases invernadero), la vegetación, la fauna el paisaje. La que también lo priva de materia orgánica,

que es importante para mejorar la estructura del suelo y proporciona vida a la tierra actuando como un sustrato para varios microorganismos. (Hal Tenhoff, 2005 y García, 2003)

Entre los aspectos favorables de la quema, se puede mencionar: destrucción de propágulos de malas hierbas, reducción de parásitos y patógenos, restitución de minerales al suelo, eliminación rápida del residuo. En casos en que la quema sea inevitable, es importante evaluar posibles soluciones para asegurar un uso sustentable del suelo, por ejemplo, la quema debería hacerse después de un periodo de lluvia, para minimizar pérdidas por lixiviación de los nutrientes liberados. (Martínez, 2002)

Acevedo (2003) señala que el diferente contenido de materia orgánica hace que el suelo quemado retenga menos agua y esté menos aireado. En cuanto a la fertilidad potencial del suelo, luego de años de análisis, se puede decir que la quema tiende a incrementar las cosechas en los primeros años, pero tiende a disminuirlas más a largo plazo.

6.5. Efectos de la quema en las propiedades físicas del suelo

Según Debanó *et al.*, (2005), las características físicas importantes en el suelo que son afectadas por las quemaduras serían: textura, estructura, densidad y porosidad del suelo. Las características físicas tales como mojabilidad y estructura se afectan a temperaturas relativamente bajas, mientras que el contenido de la arena de cuarzo, que contribuye a la textura, se afecta a temperaturas extremas del suelo. La fracción textural más sensible es la arcilla, que comienza a cambiar con temperaturas del suelo cerca de 400 °C.

Del mismo modo, De Luis *et al.*, (2003) señalan que entre los efectos más importantes después de la quema en las características físicas del suelo, se han sugerido la modificación de la estructura por la mineralización parcial de los horizontes orgánicos, pues la temperatura deteriora la estabilidad de los agregados por la destrucción de la materia orgánica y las arcillas minerales resultando una reducción de la porosidad y un aumento de la escorrentía y la erosión. De Luis *et al.*, (2003), acepta que los fuegos intensos pueden eliminar la capa orgánica superficial y dejar al descubierto una capa de suelo mineral con características hidrofóbicas, no dejando entrar el agua al suelo.

La estructura del suelo se ve afectada por la quema de residuos por dos razones, según Debanó *et al.*, (2005), primero porque la materia orgánica en un perfil del suelo se concentra en la superficie del suelo donde se expone directamente a la combustión y en segundo lugar, el valor de umbral para los cambios irreversibles en materia orgánica son bajos (50 a 60 °C).

Efecto sobre el color del suelo. El color del suelo es la alteración más notoria en el suelo quemado (Ulery y Graham, 1993). Generalmente, el color del suelo está determinado por la cantidad y estado de hierro y/o MO que contiene (Singh *et al.*, 2004). La tonalidad del color del suelo depende de la presencia de óxidos de hierro que se ven afectados significativamente a las diferentes temperaturas alcanzadas durante el calentamiento (Terefe *et al.*, 2008). A mayor temperatura se produce el enrojecimiento de la matriz del suelo. El tono más rojo que aparece en los suelos quemados aparentemente se debe a la transformación de óxidos de Fe y MO (Certini, 2005).

Los parches de la superficie del suelo enrojecido indican el lugar donde el suelo fue severamente quemado. Los cambios inducidos en las propiedades del color por el fuego son más o menos permanentes (Terefe *et al.*, 2005). El color de la ceniza se puede utilizar como indicador de la gravedad del incendio y según el consumo de MO, puede variar desde producir ceniza negra hasta producir ceniza blanca (ceniza completa) (Bodi *et al.*, 2011).

Efecto sobre la textura del suelo. Los componentes de la textura del suelo (arena, limo y arcilla) si se someten a altas temperaturas se alteran. La fracción textural más sensible es la arcilla, que comienza a cambiar cuando la hidratación de la arcilla y la estructura reticular de la arcilla comienzan a colapsar. A altas temperaturas puede ocurrir la destrucción completa de la estructura arcillosa interna (Neary *et al.*, 2008). La variación observada en la separación del suelo después de la quema del suelo puede estar relacionada con la exposición de los suelos a altas temperaturas que resultan en la fusión de partículas de arcilla y limo en partículas del tamaño de arena (Ketterings *et al.*, 2000). El suelo expuesto a incendios severos provocó un aumento en el contenido de arena con la correspondiente disminución en el contenido de arcilla (Oguntunde *et al.*, 2004). Las partículas de arcilla para convertirse en partículas del tamaño de la arena también pueden deberse a la calcinación de hierro y aluminosilicato (Terefe *et al.*, 2008). Las capas de suelo enrojecidas después del fuego tenían menos contenido de arcilla que el suelo no quemado (Ulery y Graham, 1993). Los agregados del tamaño de la arena que se forman en los suelos superficiales durante la quema alteran la distribución del tamaño de las partículas y dan como resultado texturas más gruesas debido a un mayor contenido de agua del suelo y capacidad de retención. La quema del suelo disminuyó la capacidad de retención de agua del suelo tanto en la capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente, lo que finalmente redujo la capacidad de retención de agua disponible en el suelo. El aumento de arena y la disminución del contenido de arcilla después del fuego disminuyen la capacidad de retención de agua disponible en el suelo.

Emerson (1995) también concluyó que el aumento en el contenido de arcilla aumenta la capacidad de retención de agua tanto en la capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente. La otra razón de la reducción de la capacidad de retención de agua del suelo es la reducción de la MO total del suelo que se quema durante la quema del suelo. Esto puede atribuirse al hecho de que la MO mejora la retención de agua (Brady y Weil, 1999) y que la mayoría de la MO dentro del suelo contiene 50-90% de agua (Assunta *et al.*, 2004).

Efecto sobre la densidad aparente. La densidad aparente de los suelos aumenta como resultado del fuego (Boerner *et al.*, 2009), este aumento en la densidad aparente del suelo puede atribuirse a la combustión de MO. Como resultado de la pérdida de MO en los suelos calentados, se destruyó la estructura del suelo, lo que condujo al aumento de la densidad aparente del suelo (Choromanska y De Luca, 2002). Campbell *et al.* (1995) también reportaron el mismo resultado, el aumento de la fracción de arena debido a la quema también puede contribuir a la reducción de la densidad aparente del suelo en los sitios quemados. La quema de suelo aumentó la densidad de partículas, el aumento en la densidad de partículas podría deberse a la disminución de MO. El tono más rojo del suelo quemado es un indicador del mayor consumo de MO que, a su vez, aumenta la densidad de partículas. El tono más rojo que aparece en los suelos quemados aparentemente se debe a la eliminación completa de MO (Certini, 2005).

Porosidad total. La quema del suelo afecta la porosidad total del suelo. Se observa una disminución en la porosidad total después de la quema del suelo. Una disminución en la porosidad total en el suelo quemado atribuida a una reducción en la distribución del tamaño de los poros. Los agentes aglutinantes de partículas de suelo destruidos disminuyeron la porosidad total del suelo después de la quema del suelo. La cohesión está mediada por agentes aglutinantes como las sustancias húmicas, que forman fuertes complejos con Fe, Al y Mg (Nwadialo y Mbagwu, 1991). Estos ligantes se ven profundamente afectados por la temperatura del fuego y, en relación con las arcillas, promueven cambios importantes en la estructura del suelo. La microagregación se ve afectada por la participación del fuego en los cambios estructurales del suelo. La degradación de la microestructura del suelo podría producir una disminución de la porosidad y reducir la cohesión de las partículas del suelo y favorecer la producción de escorrentía y la remoción del suelo por erosión hídrica (Reichert y Darrell, 1994).

Contenido de agua del suelo y capacidad de retención. La quema del suelo disminuye la capacidad de retención de agua del suelo tanto en la capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente, lo que finalmente redujo la capacidad de retención de agua disponible en el suelo. El aumento de arena y la disminución del contenido de arcilla después del fuego disminuyen la capacidad de retención de agua disponible en el suelo. Emerson (1995) también concluyó que el aumento en el contenido de arcilla aumenta la capacidad de retención de agua tanto en la capacidad de campo como en el punto de marchitez permanente. La otra razón de la reducción de la capacidad de retención de agua del suelo es la reducción de la MO total del suelo que se quema durante la quema del suelo. Esto puede atribuirse al hecho de que la MO mejora la retención de agua (Brady y Weil, 1999) y que la mayoría de la MO dentro del suelo contiene 50-90% de agua (Assunta *et al.*, 2004).

Repelencia al agua del suelo. Las altas temperaturas de la superficie 'queman' los residuos orgánicos y crean vapores que se mueven hacia abajo en respuesta a un gradiente de temperatura y luego se condensan en las partículas del suelo haciéndolas repelentes al agua (Letey, 2001). La repelencia al agua es causada por la presencia de compuestos orgánicos con propiedades hidrofóbicas en la superficie de las partículas del suelo (Doerr *et al.*, 2009). Se han informado condiciones del suelo repelentes al agua altamente variables después de los incendios (Huffman, 2004).

La repelencia al agua del suelo es muy variable en el tiempo y el espacio (Doerr *et al.*, 2008). Las tres variables predictivas de la repelencia al agua del suelo son la severidad de la quema, el contenido de arena y la humedad del suelo solo podrían explicar el 30-41% de la variabilidad en la repelencia al agua del suelo medida en dos incendios silvestres y tres prescritos (Huffman *et al.*, 2001). La repelencia al agua del suelo se fortalece con el aumento de la severidad de la quema y el contenido de arena, y disminuye con el aumento del contenido de humedad del suelo (Huffman *et al.*, 2001). A medida que los suelos se humedecen, ya no son repelentes al agua (Leighton-Boyce *et al.*, 2003). Los estudios indican que es poco probable que la repelencia al agua del suelo después de un incendio aumente las tasas de escorrentía una vez que los suelos se hayan humedecido, pero la repelencia al agua del suelo se puede restablecer una vez que los suelos se secan (Leighton-Boyce *et al.*, 2003).

6.6. Efectos de la quema en las propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo son las más importantes entre los factores que determinan el poder de suministro de nutrientes del suelo a las plantas y microbios. Las

reacciones químicas que ocurren en el suelo afectan los procesos que conducen al desarrollo del suelo y al aumento de la fertilidad del suelo. Los minerales heredados de los materiales originales del suelo liberan con el tiempo elementos químicos que sufren varios cambios y transformaciones dentro del suelo (Hubbert y Oriol, 2005).

Reacción del suelo (pH). El pH del suelo aumenta después de la quema del suelo, cuando se quema MO, se liberan cationes básicos y en consecuencia, aumenta el pH del suelo (Ulery *et al.*, 1993). La carga inicial de combustible y el pH del suelo, la intensidad del fuego y las lluvias posteriores al incendio son factores que afectan el alcance y la duración de los cambios de pH. El aumento del pH a temperaturas más altas también fue causado por la formación de óxidos metálicos (Giovannini *et al.*, 1990). Los residuos de ceniza generalmente están dominados por carbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos, cantidades variables de sílice, metales pesados, sesquióxidos, fosfatos y pequeñas cantidades de N orgánico e inorgánico. La ceniza tiene la capacidad de neutralizar la acidez del suelo después del fuego (Arocena y Opio, 2003). A medida que aumenta el porcentaje de saturación de bases, también aumenta el pH del suelo y la disponibilidad de cationes de nutrientes básicos para las plantas (Bohn *et al.*, 2001).

Materia orgánica del suelo. La experiencia de cambio más intuitiva del suelo durante la quema es la pérdida de MO (Certini, 2005). El efecto del fuego en la MO del suelo depende en gran medida del tipo y la intensidad del fuego, entre otros factores, la humedad del suelo, el tipo de suelo y la naturaleza de los materiales quemados. Por lo tanto, el efecto sobre los procesos del suelo y su intensidad influenciada por el fuego son muy variables y no se pueden sugerir tendencias generalizadas para la mayoría de los cambios inducidos por el fuego en la composición del humus. Las quemas prescritas de baja intensidad por lo general producen pocos cambios en el carbono del suelo, pero las quemas prescritas intensas o los incendios forestales pueden provocar una gran pérdida de carbono en el suelo (Fernández *et al.*, (1997) sugirieron que en fuegos de baja intensidad, los lípidos son el grupo menos afectado mientras que el 90% de la celulosa soluble en agua, las hemicelulosas y la lignina se destruyen.

Efecto sobre el nitrógeno (N) del suelo. En el suelo se distinguen dos pool de N, desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos: un pool de N activo y un pool de N pasivo. En el pool de N activo del suelo se encuentra el pool de N orgánico lábil, el pool de N orgánico estabilizado y el pool de N inorgánico. En el pool de N pasivo se encuentra el pool de N

orgánico o pool húmico (Maturana y Acevedo, 2003). Esta fracción pasiva del N-orgánico no participa en la nutrición durante la temporada de cultivo, debido a su lento proceso de degradación, a pesar de que constituye entre el 80 y 90% del N total del suelo. Conforma un material complejo, difícilmente atacable por los microorganismos del mismo (Rodríguez, 2001).

El pool de N orgánico lábil corresponde, aproximadamente a un 30% del N total de los residuos de cosecha y entre un 1 y 2% del N total del suelo. Puede ser utilizado en su totalidad por los cultivos durante el transcurso del año. El pool de N orgánico estabilizado del suelo corresponde alrededor de un 70% del N total de los residuos de cosecha y entre un 10 y 20% del N total del suelo. La contribución de éste depende del agroecosistema y su manejo (Maturana y Acevedo, 2003).

El pool de N lábil y el pool de N estabilizado son mineralizados por los microorganismos con distintas tasas, el primero lo hace rápidamente en el suelo, en cambio el N estabilizado se mineraliza de forma más lenta que el N lábil, y ambos pasan a incrementar el pool de N inorgánico (Rodríguez, 2001).

El N en las plantas es absorbido en forma de nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) por las raíces de las plantas, satisfaciendo de este modo las necesidades de N del cultivo (Maturana y Acevedo, 2003).

Después de una quema pueden ocurrir pérdidas por volatilización de N a la forma de amonio, debido a la alcalinidad de las cenizas y al aumento de actividad de la enzima ureasa. En el Reino Unido, en el año 1981 se estimaron pérdidas por emisión de amonio desde los rastrojos quemados equivalente a 20.000 toneladas de N al año y en 1991 esta cantidad bajó a 3300 ton/año debido a la prohibición impuesta a esta práctica (Acevedo, 2003).

Hernández *et al.* (1997) realizaron un estudio de los efectos a corto plazo de un incendio en suelos mediterráneos con bosques de pino, la evaluación luego de nueve meses después dio como resultado, todos los suelos quemados tenían mayores valores de nitrógeno, fósforo y potasio disponibles y menor valores de carbono orgánico y ácidos húmicos que en suelos sin quemar.

Efecto sobre el fósforo (P) del suelo. El P es un elemento que en el desarrollo de las plantas es esencial, los requerimientos por parte de esta son diez veces más bajos que de nitrógeno, siendo incluso menor que de potasio. En algunos países es la segunda deficiencia más

extendida, principalmente en suelos volcánicos. La gran parte del P en los suelos, normalmente no es aprovechada por las plantas. Sus formas solubles se fijan con gran facilidad con la fase sólida del suelo, por lo que su lixiviación es nula o muy escasa. Generalmente su movimiento no supera los 20 milímetros (Maturana y Acevedo, 2003).

Se encuentra una mayor concentración de P en el suelo, donde exista una mayor concentración de N, ya que la disponibilidad del P se ve estimulada por la mineralización del N. Desde el punto de vista de la nutrición de los cultivos, el P en el suelo se clasifica en P lábil, P no lábil y P de la solución, (Maturana y Acevedo, 2003).

Es importante destacar que los microorganismos desempeñan un rol fundamental en el movimiento del P en el suelo, ya que de ellos depende que el P no lábil pueda ser solubilizado y aprovechado por las plantas (Maturana y Acevedo, 2003).

El P lábil corresponde al P adsorbido por la superficie de la fase sólida del suelo o fracción inorgánica, que se encuentra en equilibrio con el P de la solución. El P no lábil corresponde al anión fosfato que ha quedado adsorbido, con alta energía, en el interior de las arcillas o de los óxidos de fierro y aluminio. Pool pasivo que se encuentra en equilibrio con el pool lábil. El P de la solución del suelo corresponde al P que es directamente aprovechable por los cultivos. La concentración de P de la solución es muy baja y va entre los 0.006 y 0.03 ppm extraída con agua con CaCl_2 0,01M. Este se encuentra en equilibrio instantáneo con el pool de P lábil (Rodríguez, 2001). El equilibrio entre estas tres fracciones: la fracción lábil y la solución del suelo y un segundo equilibrio entre la fracción no lábil y la fracción lábil, dependen del plazo de tiempo que se considere, considerando la temporada del cultivo. Es así como, un fosfato que se encuentra no lábil en la temporada de cultivo, no significa que no se encuentre disponible en la próxima temporada (Pinochet, 2004).

Efecto sobre el potasio (K) del suelo. El K es un catión monovalente, capaz de desplazarse en el suelo por simple difusión. Se distingue el K no intercambiable, aquel presente en los coloides del suelo o K intercambiable y el K de la solución del suelo. El K de la solución es aquel que se encuentra como ión libre en la solución suelo y los cultivos lo utilizan directamente para satisfacer sus requerimientos nutritivos. El K no intercambiable es aquel retenido fuertemente por minerales primarios y arcillas micáceas, siendo éste de lenta disponibilidad. El K retenido por adsorción por los coloides del suelo o K intercambiable, es capaz de neutralizar las cargas negativas de las arcillas e intercambiarse con otros cationes (principalmente Ca^{++}). Se encuentra en equilibrio con el K de la solución. El tipo y la

cantidad de arcilla determinan el contenido de K en posiciones de intercambio y la energía con que es retenido. Existe una estrecha relación entre el tipo de arcilla, el contenido de arcilla y los valores de K intercambiable y no intercambiable (Maturana y Acevedo, 2003).

Martínez (2002), en un estudio que realizó, dice que luego de la quema de los rastrojos se consigue aportar al suelo una pequeña cantidad de potasio, pero se pierde la capa superior del suelo, por ende desaparece el coloide y con él se destruye la capacidad hídrica lograda. Hernández y López (1999), señalan que el fuego produce un aumento en Ca, Mg, Na, K y P disponibles, logrando así una fertilización inmediata a corto plazo, sin embargo, esta situación a mediano y a largo plazo se revierte.

Capacidad de intercambio catiónico. En general, los procesos que afectan la textura, como la arcilla y los cambios de MO, también afectan la CIC de los suelos. La capacidad de intercambio de cationes disminuye después de un incendio severo, probablemente debido a una gran reducción en el contenido de humus. La reducción de la CIC después de la quema también fue reportada por Giovannini *et al.* (1990) y Marcos *et al.*, (2007), quienes afirmaron que la CIC disminuyó con el aumento de la temperatura debido al cambio estructural en los minerales arcillosos, la combustión de MO y la conversión de las partículas de arcilla en partículas del tamaño de la arena.

Micronutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu). El comportamiento de los micronutrientes, como Fe, Mn, Cu y Zn frente al fuego no es bien conocido porque faltan estudios específicos (Certini, 2005). La influencia del fuego en la disponibilidad de micronutrientes es útil para entender su efecto en la recuperación post incendio de suelos y plantas (García-Marco y González-Prieto, 2008). Pocos estudios sugieren que los micronutrientes también experimentan una reducción en la cantidad después del fuego. García-Marco y González-Prieto (2008) estudiaron los efectos a corto y mediano plazo del fuego sobre la disponibilidad de micronutrientes en el suelo.

6.7. Residuos de cultivos para la mejorar el suelo

Textura. Devolver los residuos de cultivos al suelo puede mejorar las propiedades físicas del suelo al aumentar el contenido de humedad del suelo, disminuir la densidad aparente y aumentar la porosidad total y la estabilidad de los agregados (Brankatschk y Finkbeiner, 2015). El retorno de residuos de cultivos puede aumentar el contenido de humedad del suelo al reducir la escorrentía superficial y la evaporación directa, mejorando la conductividad del

agua saturada del suelo y la infiltración del agua (Jin *et al.*, 2020). La cobertura de paja disminuye la temperatura de la capa superior del suelo (0–5 cm de profundidad) y aumenta la humedad del suelo de 12.3% a 16.6%, respectivamente, en comparación con el tratamiento de remoción de paja en un experimento de campo de maíz de 12 años (Brankatschk y Finkbeiner, 2015). El contenido de agua del suelo aumentó notablemente en un 19 % después de dos años de incorporación de paja en comparación con el tratamiento sin paja (Zhao *et al.*, 2019). Sin embargo, el contenido de agua del suelo se reducirá al principio debido a la adsorción de residuos de cultivos y microorganismos. Por lo tanto, es necesario regar a tiempo para acelerar la compactación del suelo, lo que hace que los residuos del cultivo y el suelo estén más en contacto.

La densidad aparente del suelo puede ser un indicador de los cambios en la estructura del suelo. Zhao *et al.*, (2019) observaron que la densidad aparente del suelo en la capa de 0 a 20 cm disminuyó en un 5,7 % después de 7 años de aporte de maíz y paja de trigo. Además, los tratamientos de retorno de paja redujeron la densidad aparente del suelo en ambas capas del suelo (0–20 cm, 20–40 cm) [29]. Xu *et al.*, (2018) observaron que el retorno de paja de maíz (4500 kg ha⁻¹) disminuyó la densidad aparente del suelo a lo largo del perfil del suelo, específicamente, la densidad aparente del suelo disminuyó en un 9,5 % y un 8,6 % en la capa de suelo de 0–20 cm y la capa de suelo de 20–40 cm, respectivamente, en la temporada de crecimiento 2016–2017. También encontraron que el efecto de los tratamientos de retorno de paja en la disminución de la densidad aparente del suelo variaba según el período de crecimiento de los cultivos.

La porosidad total del suelo es una de las propiedades físicas básicas del suelo y un índice para la evaluación de la fertilidad y productividad del suelo. La porosidad del suelo aumenta cuando se mezclan residuos de cultivos triturados con el suelo a través de un arado profundo. Gao *et al.*, (2020), mostró que la porosidad total del suelo aumentó en un 23,0% en la etapa de madurez fisiológica bajo el tratamiento de retorno de tallos de maíz de verano. Zheng *et al.*, (2019) también encontraron que la porosidad total del suelo aumentó en un 21,7% con la aplicación de paja (4500 kg ha⁻¹ a-1) en un experimento de campo de cinco años en un sitio fijo realizado en un campo de arroz en el noreste de China. Sin embargo, la alta porosidad del suelo hace que el suelo y las semillas no puedan estar en estrecho contacto, lo que afecta la germinación y el crecimiento de las semillas. Por lo tanto, se necesita riego y supresión oportunos para asegurarse de que el suelo se compacte.

Los aglomerados se vuelven más grandes y más estables con la entrada de residuos de cultivos, ya que los residuos de cultivos pueden reponer materia orgánica fresca en el suelo (Jin *et al.*, 2020). La proporción de grandes aglomerados del suelo y aglomerados estabilizados con agua revela la capacidad sostenible del suelo (Gao *et al.*, 2020). El diámetro de peso medio (DPM) y el diámetro medio geométrico (DMG) reflejan no solo la estabilidad del agregado sino también el potencial del suelo para el ciclo de nutrientes. Un experimento de campo de 12 años realizado por Rigon *et al.*, (2020) mostró que la ausencia de un cultivo de cobertura de primavera resultó en una DPM más baja de agregados estables al agua. Además.

pH y capacidad de intercambio catiónico. Los residuos de cultivos pueden tener una gran influencia en el pH del suelo, especialmente en aquellos suelos con baja capacidad amortiguadora. Pan *et al.*, (2020), llevó a cabo un experimento de incubación de 30 días para investigar los efectos de mejora en un ultisol ácido con cuatro productos de descomposición de paja de cultivo (SDP), y los resultados mostraron que el pH del suelo aumentó entre un 55 % y un 75 %. Sin embargo, los resultados de la investigación de Cao *et al.*, (2021). mostró que la cobertura de paja con labranza cero y labranza rotatoria redujo significativamente el pH del suelo de 7.7 a 7.4 y 7.2. En otro estudio, se observó que la aplicación de residuos de cultivos al suelo aumentó el pH de la capa superior del suelo (0-10 cm) y subsuelos, y los efectos pueden persistir durante 26 meses (Butterly *et al.*, 2012). Los cambios en el pH están relacionados con la concentración de cationes en exceso, los ciclos de C y N, los tipos de residuos de cultivos y el suelo (Zhao *et al.*, 2019). El manejo de residuos de cultivos influye de manera alta y significativa en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. La acumulación de materia orgánica del suelo (MOS) en los residuos de cultivos puede producir más cargas negativas para aumentar la CIC (Rezig *et al.*, 2013). Malobane *et al.*, (2020) encontró que una retención de residuos de cultivos del 30 % (basada en la biomasa fresca cosechada total) produjo una CIC 11,3 % y 27,32 % más alta que la retención y eliminación de residuos de cultivos del 15 %, respectivamente, en un experimento de campo de tres años con sorgo dulce. La CIC de un Ultisol arenoso aumentó en 0,72, 1,09, 0,99 y 1,05 cmol/kg después de aplicar productos descompuestos de maní, guisante, canola y arroz (Pan *et al.*, 2021). El aumento de la CIC está controlado principalmente por la acumulación de materia orgánica en el suelo.

Carbón orgánico y nutrientes del suelo. Los residuos de cultivos en descomposición se consideran componentes básicos en el ciclo de nutrientes. El retorno de residuos de cultivos

puede aumentar el contenido de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo disponible y potasio en los suelos (Zhao *et al.*, 2019). Además, la aplicación de residuos de cultivos en el suelo puede prevenir la pérdida de nutrientes y mejorar la disponibilidad de nutrientes esenciales (Zhang *et al.*, 2021).

Los residuos de cultivos contienen aproximadamente un 40 % de carbono orgánico, que puede regular las propiedades del suelo y mejorar su estabilidad mediante la formación de grandes agregados. El contenido de carbono orgánico del suelo aumentó en un 52 % y un 50 % con un tratamiento del 5 % (p/p) de tallo de ajo crudo en 2016 y 2017, respectivamente. La devolución de residuos de cultivos también puede reducir la pérdida de carbono orgánico (Chen *et al.*, 2016).

El nitrógeno es necesario para la formación de proteínas, aminoácidos y ácidos nucleicos. El nitrógeno de los residuos de cosecha se puede transformar en NH_4^+ y NH_3^- través de mineralización y nitrificación. Zhao *et al.*, (2019) observado que la incorporación de paja y fertilizantes parciales aumentó significativamente el nitrógeno disponible en el suelo a profundidades de 0 a 20 cm en un promedio del 64 %. Sin embargo, los residuos de cultivos tienen una relación C/N relativamente alta (60–100:1). Por lo tanto, el aumento de los residuos devueltos puede mejorar la inmovilización del nitrógeno, lo que a su vez puede requerir una aplicación adicional de fertilizante nitrogenado (Fontaine *et al.*, 2020).

El fósforo es un elemento esencial para las reacciones energéticas y la división celular. El fósforo en los residuos de se puede descomponer en H_2PO_4^- cultivos y HPO_4^{2-} microorganismos. La incorporación de paja de cultivos a largo plazo (30 años) aumentó el fósforo disponible en el suelo en la capa de 0 a 20 cm. Al mismo tiempo, la eficiencia en el uso del fósforo aumentó del 43 % en 1983 al 72 % en 2012 con fertilización mineral más 3750 kg/ha de tratamiento con paja de trigo (Guo *et al.*, 2018).

El potasio iónico se libera fácilmente de los residuos de cultivos. El aporte de residuos de cultivos contribuye a la acumulación de potasio en el suelo (Cherubin *et al.*, 2018). Alí *et al.*, (2020), señalo que el contenido de potasio disponible aumentó en un 4,4 %, 6,5 % y 3,8 %, respectivamente, con la aplicación de tallos de ajo crudo en dosis del 1 %, 3 % y 5 %. Además, los resultados de la investigación de Yadav *et al.*, (2021), mostró que retener ing 90% (7,0 t) de residuos de soja agregó 89,7 kg de potasio en el suelo, y 232,2 kg de potasio se agregaron a través de 90% (13,8 t) de residuos de trigo en 5 años.

Aleloquímicos. Los aleloquímicos son principalmente metabolitos secundarios ligados a los residuos de cultivos, liberados por descomposición microbiana y por lixiviación en el suelo. Estos aleloquímicos incluyen compuestos de bajo peso molecular (como azúcares, iones inorgánicos, vitaminas, nucleótidos, aminoácidos y fenoles) y sustancias de alto peso molecular (polisacáridos, enzimas y otras proteínas). Los aleloquímicos liberados por los residuos de cultivos tienen efectos adversos o positivos en el próximo cultivo. Esto está muy relacionado con la semilla objetivo, los alelos químicos específicos y la concentración (Lqbal *et al.*, 2019). Entre los aleloquímicos, los ácidos fenólicos (PA) son las sustancias activas más estudiadas y han sido reconocidas como sustancias alelopáticas. Existe un fenómeno común de que las AP inhiben la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas durante la descomposición de los residuos de cultivos a través de la alelopatía (Yao *et al.*, 2020). Los PA pueden generarse en la descomposición de la lignina catalizada por la enzima fenolasa en los hongos (Otte *et al.*, 2020). Un estudio realizado por El Mergawi, (2019), mostró que las AP causaron grandes efectos de inhibición en la germinación de *Phalaris minor*. El efecto de inhibición fue del 21,5 al 75,7 % y del 48,7 al 100 % en las concentraciones de 10 mM y 20 mM, respectivamente.

Mientras tanto, se ha demostrado que los AP tienen efectos antifúngicos, efectos inhibidores en la reducción del crecimiento de especies de malezas y ayudan en la formación y estabilización de agregados en concentraciones apropiadas (Zhang *et al.*, 2020). Los resultados de la investigación de Wei *et al.*, (2021), mostró que el crecimiento micelial y la generación de esporas de *B. cinérea* disminuyeron en un 86,18 % y un 69,10 %, respectivamente, después del tratamiento con 0,2 g/l de PA. La fertilización puede reducir el contenido de ácidos fenólicos en el suelo al promover la actividad microbiana del suelo. Sobre todo, hacer un uso completo de los aleloquímicos activos liberados por los residuos de cultivos después de regresar al suelo y evitar los efectos adversos en el próximo cultivo tiene un significado significativo en la gestión de residuos de cultivos.

Actividad microbiana. Las comunidades microbianas del suelo juegan un papel importante en el proceso del ecosistema del suelo y el ciclo biogeoquímico de los elementos básicos, como el nitrógeno y el carbono. El retorno de residuos de cultivos puede aumentar el contenido de materia orgánica en el suelo y proporcionar un buen ambiente para el crecimiento y proliferación de microorganismos (Su *et al.*, 2020).

Su *et al.*, (2020), encontraron que, en comparación con la incorporación de paja de trigo, se observó una menor diversidad de la comunidad fúngica y un mayor riesgo de patógenos fúngicos en el suelo con incorporación de paja de maíz. Se observó una menor abundancia relativa de bacterias y hongos, pero una mayor abundancia relativa de actinomicetos en el retorno de paja de doble temporada. Alí *et al.*, (2020) observaron que los sustratos de ajo aumentaron la abundancia y diversidad de microbios beneficiosos para las plantas. Se informó que las combinaciones a largo plazo de paja de arroz y fertilización inorgánica tuvieron impactos positivos en la diversidad y población de hongos en los suelos de arroz y las funciones de los hongos cambiaron significativamente (Nie *et al.*, 2018). Otro estudio a largo plazo (30 años) realizado por Zhao *et al.* (2016), mostraron que los hongos y Gram-negativos (Gm-) aumentaron con las tasas de entrada de paja, mientras que todos los tratamientos no cambiaron la abundancia de bacterias totales y Gram-positivos (Gm+) en un sistema de cultivo de maíz de verano y trigo de invierno en el centro-norte de China. Las propiedades microbianas del suelo variaron con los tipos de residuos devueltos, las tasas de retorno y las condiciones del suelo.

6.8. Residuos de cultivos para la remediación de suelos

Metales pesados. La contaminación por metales pesados, como la contaminación por cadmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu), arsénico (As), mercurio (Hg) y plomo (Pb), en los suelos se ha convertido en un gran problema. Provoca una reducción del rendimiento de los alimentos y presenta amenazas para la salud humana a través de las cadenas alimentarias. Se han informado efectos inhibidores de la incorporación de residuos de cultivos sobre la movilidad y la biodisponibilidad de algunos metales pesados en los suelos (Palansooriya *et al.*, 2020). Un experimento en macetas de invernadero reveló que la paja de arroz redujo la biodisponibilidad de Ni en un 68 % a una tasa de aplicación del 2 % (Ali *et al.*, 2020). De la misma manera, los resultados de la investigación de Xu *et al.*, (2016), mostró que la concentración de Pb en el suelo y los brotes de maíz se redujo en un 13,5 % y un 58,2 %, respectivamente, con un tratamiento con paja de arroz al 1 % (p/p). Dos posibles mecanismos son responsables de este riesgo reducido. Una es la interacción entre las partículas de materia orgánica de los residuos de cultivos y los metales. El otro es el aumento de la biomasa microbiana y la actividad enzimática después de la aplicación de residuos de cultivos (Su *et al.*, 2021).

Contaminantes orgánicos. En un experimento de columna de suelo realizado por Schnitzler *et al.*, (2007), mostró que los residuos de maíz (10 t ha^{-1}) en la capa superior de la columna de suelo de 0 a 5 cm disminuyeron la movilidad y la biodisponibilidad de la benazolina y sus metabolitos. Los resultados de la investigación de Xiang *et al.*, (2019) También mostró que la biodisponibilidad del 2,2',4,4'-tetrabrominated disminuyó un 62,7 %, 64,8 % y 72,4 % en raíces de zanahoria con 1 %, 2 % y 4 % (p/p) de enmienda de paja de maíz, respectivamente. De manera similar, el 97 % de la concentración de phenanthrene se eliminó con paja de arroz modificada (tratada con solución de NaOH) en el suelo contaminado con phenanthrene después de 120 días a través del metabolismo de los carbohidratos (Elyamine *et al.*, 2019). Bao *et al.*, (2019) observó que los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) disminuyeron entre un 30,5 y un 37,7 % en un suelo contaminado después de 112 días de incubación con paja de maíz (6 % p/p). La entrada de residuos de cultivos disminuyó la movilidad de algunos contaminantes orgánicos a través de las fuerzas de van der Waals, las interacciones hidrofóbicas y el donante-aceptor de electrones.

Patógenos. Se consideró que la incorporación de residuos de cultivos aumentaba las cantidades de patógenos y promovía enfermedades de los cultivos. Sin embargo, algunos estudios han indicado que el retorno de los residuos de cultivos puede aumentar la cantidad de microbios antagonistas y luego controlar las enfermedades de las plantas transmitidas por el suelo. El modo apropiado de retorno de residuos de cultivos es una estrategia efectiva para aliviar los patógenos transmitidos por el suelo (Yang *et al.*, 2020). La clave es utilizar residuos de cultivos sanos y libres de enfermedades en el campo para evitar la propagación de gérmenes y agravar la enfermedad del próximo cultivo.

Salinidad y alcalinidad. La salinización y la alcalinización del suelo restringen severamente la productividad de los cultivos en el mundo, especialmente en áreas áridas y semiáridas. La aplicación de residuos de cultivos tiene el potencial de mejorar los suelos salinos y alcalinos a través del manejo del agua y la sal (Song *et al.*, 2020). Un experimento de campo de tres años realizado por Zhang *et al.*, (2020) mostró que el flujo de lixiviación de sal aumentó con diferentes tratamientos de espesor de paja (3 cm, 5 cm, 7 cm), y los resultados mostraron que el contenido de sal disminuyó en un 3,07–36,82 % en la capa de suelo de 0–40 cm con entrada de paja compactada de 7cm. Zhao *et al.*, (2016), mostró que la capa de paja de maíz (12 t ha^{-1}) enterrada a una profundidad de 40 cm y la aplicación de mantillo plástico disminuyó el contenido de sal en un 51,3 %, 42,2 % y 31,4 % durante todo

el período de crecimiento del girasol en 2011, 2012 y 2013, respectivamente. Los residuos de cultivos pueden aumentar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, mejorar la eficiencia de la lixiviación de sal y reducir la acumulación de sal dentro de la profundidad superficial del suelo (Dong *et al.*, 2021).

6.9. Conclusiones

Los residuos de cultivos son materiales ricos en carbono que contienen mucho nitrógeno, fósforo, potasio y microelementos. El aporte de residuos de cultivos es una forma sostenible de mejorar la calidad del suelo sin alterar su equilibrio biológico. La descomposición de los residuos de cultivos puede aumentar los contenidos de carbono orgánico y fósforo disponible, potasio en los suelos, que pueden proporcionar nutrientes para microorganismos y cultivos. Además, la humedad del suelo, la estabilidad de los agregados y la porosidad también pueden ser mejorado. Los efectos negativos de los aleloquímicos en el crecimiento de los cultivos se pueden ajustar mediante la gestión de retorno de residuos de cultivos. Sin embargo, los resultados de los efectos de los residuos de cultivos sobre el pH y los metales pesados son inconsistentes. Los residuos de cultivos tienen efectos inhibitorios sobre algunos metales pesados bajo ciertas condiciones. Además, los residuos de cultivos tienen efectos positivos en la reducción de la biodisponibilidad de algunos contaminantes orgánicos del suelo, aliviando varios patógenos transmitidos por el suelo y mejorando los suelos salinos y alcalinos.

Se requiere un modo razonable de retorno de residuos de cultivos para mejorar la salud del suelo. Primero, la adición de nutrientes a partir de residuos de cultivos orgánicos debe sincronizarse con la demanda de los cultivos. En segundo lugar, el retorno de los residuos de cultivos combinado con fertilizante nitrogenado parcial, agente de maduración de paja y cal puede promover la descomposición de los residuos de cultivos al mejorar las actividades de los microorganismos del suelo. En tercer lugar, las condiciones del suelo, el clima y la calidad de los residuos de cultivos pueden afectar el proceso de descomposición de los residuos de cultivos y producir efectos negativos. Por lo tanto, se debe establecer la teoría del retorno sistemático de residuos de cultivos para garantizar la salud del suelo.

6.10. Bibliografía

- Acevedo, E. 2003. Sustentabilidad en cultivos anuales: cero labranzas, manejo de rastrojos. Santiago, Chile: LOM.
- Ali A, Ghani MI, Haiyan D. 2020. Garlic substrate induces cucumber growth development and decreases Fusarium wilt through regulation of soil microbial community structure and diversity in replanted disturbed soil. *Int J Mol Sci.*21(17):20.
- Ali A, Ghani MI, Haiyan D. 2020. Garlic substrate induces cucumber growth development and decreases Fusarium wilt through regulation of soil microbial community structure and diversity in replanted disturbed soil. *Int J Mol Sci.*21(17):20.
- Ali U, Shaaban M, Bashir S. 2020. Effect of rice straw, biochar and calcite on maize plant and Ni bio-availability in acidic Ni contaminated soil. *J Environ Manage.*259:109674
- Alsafadi, K., Mohammed, S.A., Ayugi, B., Sharaf, M. & Harsányi, E. (2020) Spatial-temporal evolution of drought characteristics over Hungary between 1961 and 2010. *Pure and Applied Geophysics*, 177(8), 3961–3978. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02449-5>.
- Arocena, J.M. and Opio, C., 2003. Prescribed fire induced changes in properties of sub-boreal forest soils. *Geoderma*, 113: 1-16.
- Assunta, M.P., Giacomo, G., Sergio, L., Stefano, D. and Piero, P., 2004. Effect of fire on soil C, N and microbial biomass. INRA, EDP Sciences 2004, France. *Agronomy for Sustainable Development*, 24: 47-53.
- Bao HY, Wang JF, Li J. 2019. Effects of corn straw on dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons and potential application of backpropagation artificial neural network prediction model for PAHs bioremediation. *Ecotoxicol Environ Safety.*;186:109745.
- Beuchelt, T.D., C.T. Camacho Villa, L. Göhring, V.M. Hernández Rodríguez, J. Hellin, K. Sonder, and O. Erenstein. 2015. Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Biomass use trade-cereal. Cropping Systems Implications Developments World* 134:61–75. doi:10.1016/j.agsy.2014.09.003.

- Bodi, M.B., Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. and Cerda, A., 2011. The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma*, 160: 599–607.
- Boerner, R.E.C., Hart, S. and Huang, J., 2009. Impacts of Fire and Fire Surrogate treatments. *Ecological Applications*, 19(2): 338-358.
- Bohn, H.L, McNeal, B.L. and O'Connor, G.A., 2001. *Soil Chemistry*. 3rd Edition. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA.
- Boonlertnirun K and Jompuk C., 2011. Nitrogen use Efficiency and Low Nitrogen Tolerance in Waxy Corn. *Khon Kaen Agriculture Journal*. 39, 231-240.
- Brady, N.C. and Weil, R.R., 1999. *The Nature and Properties of Soils*. 12th Edition. Upper Saddle River, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
- Brankatschk G, Finkbeiner M. 2015. Modeling crop rotation in agricultural LCAs — challenges and potential solutions. *Agric Syst*.138:66–76.
- Butterly CR, Baldock JA, Tang C.2012. The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant Soil*.366(1–2):185–198.
- Campbell, G.S, Jungbauer, Jr.J.D, Bristow, K.L. and Hungerford, R.D., 1995. Soil temperature and water content beneath a surface fire. *Soil Science*; 159: 363-74.
- Cao QJ, Li G, Yang FT.2021. Eleven-year mulching and tillage practices alter the soil quality and bacterial community composition in Northeast China. *Arch Agron Soil Sci*. 2021;1–16. DOI:10.1080/03650340.2021.1890719.
- Castillo, F. & Navarro, H., 2007. Evaluación de cinco especies vegetales como cultivos de cobertura en valles altos de México. *Revista fitotecnia mexicana*, pp. 97-119.
- Certini, G., 2005. Effect of fire on properties of soil . A review. *Oecologia*, 143: 1-10.
- Chen HD, Chen XL, Qin YQ. 2017. Effect of torrefaction on the properties of rice straw high temperature pyrolysis char: pore structure, aromaticity and gasification activity. *Bioresour Technol*.228:241–249.

- Chen S, Xu CM, Yan JX.2016. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: an 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China. *Agric, Ecosyst & Environ.*2016;223:261–269
- Cherubin MR, Oliveira DMD, Feigl BJ.2018. Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: a review. *Sci Agric.*75(3):255–272.
- Choromanska, U. and DeLuca, T.M., 2002. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: Evaluation of post-fire effects. *Soil Biology and Biochemistry*, 34, 263-271.
- De Luis, M.; González J.C. y Raventós J. 2003. Efectos erosivos de una lluvia torrencial en suelos afectados por quemas experimentales de diferente severidad. *Cuaternario y Geomorfología* 17 (3-4): 57 - 67.
- Debano, L; Neary, D. y FFOLLIOTT, P. 2005. *Wildland Fire in Ecosystems. Effects of Fire on Soil and Water: Soil Physical Properties.* USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. pp: 29-51.
- Devkota NR and Rerkasem B., 2000. Effects of Cutting on the Nitrogen Economy and Dry Matter Yield of Lablab Grown Under Monoculture and Intercropped with Maize in Northern Thailand. *Experimental Agriculture*. 36, 459-468.
- Dockersmith, I., Giardina, C. & Sandford, R. J., 2000. Persistence of tree related patterns in soil nutrients following slash -and- burn disturbance in the tropics. *Plant and Soil*, Volumen 247, p. 220.
- Doerr, S., Shakesby, R.A. and MacDonald, L.H., 2008. Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion. pp. 197-224, In: Cerda, A. and Robichaud, P.R. (eds.), *Fire Effects on Soils and Restoration Strategies.* Science Publishers, Inc., Enfield, New Hampshire, USA.
- Doerr, S., Woods, S. and Martin, D., 2009. Natural background' soil water repellency in conifer forests of the north-western USA: Its prediction and relationship to wildfire occurrence. *Journal of Hydrology*, 371(1-4): 12-21.

- Dong SD, Wan SQ, Kang YH. 2021. Different mulching materials influence the reclamation of saline soil and growth of the *Lycium barbarum* L. under drip-irrigation in saline wasteland in northwest China. *Agr Water Manage.*247:10.
- Elferink, M., and F. Schierhorn. 2016. Global demand for food is rising. Can we meet it? *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/2016/04/globaldemand-for-food-is-rising-can-we-meet-it>.
- El-Mergawi RA. 2019. Suitability of high doses of phenolic acids for controlling *Corchorus olitorius* and *phalaris minor* weeds. *Gesunde Pflanz.*71(4):261–269.
- Elyamine AM, Moussa MG, Afzal J. 2019. Modified rice straw enhanced cadmium (II) immobilization in soil and promoted the degradation of phenanthrene in co-contaminated soil. *Int J Mol Sci.*20(9):17.
- Emerson, W.W., 1995. Water retention, organic carbon and soil texture. *Australian Journal of Soil Research*, 33:241-251.
- Fernandez, I, Cabaneiro, A. and Carballas, T., 1997. Organic matter changes after a wildfire in an atlantic forest soil and comparison with laboratory soil heating. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(1): 1-11.
- FHIA (Fundación Hondureña de Investigación Agrícola). 2011. Guía sobre prácticas de conservación de suelos. Proyecto Promoción de Sistemas Agroforestales de Alto Valor con Cacao en Honduras. http://www.fhia.org.hn/downloads/guia_conservacion_de_suelos.pdf.
- Flores, G., 2005. Manejo de humedad del suelo en zonas secas, Honduras: Secretaría de Agricultura y Ganadería (SAG).
- Fontaine D, Eriksen J, Sørensen P.2020. Cover crop and cereal straw management influence the residual nitrogen effect. *Eur J Agron.*118:126100.
- Gao F, Hu J, Ren BZ. 2020. Improving soil properties and grains yield of winter wheat and summer corn under residue management strategies. *Agron J.*112 (5):4287–4302.
- García, V. (2003). Evaluación de un modelo predictivo sobre el efecto de la temperatura y humedad en la descomposición de rastrojo de trigo. *Agricultura Técnica*.

- García-Marco, S. and González-Prieto, S., 2008. Short- and medium- term effects of fire and fire-fighting chemicals on soil micronutrient availability. *The Science of Total Environment*, 407: 297-303.
- Giller K.E., Beare M.H., Lavell P., Izac and Swift M.J., 1997. Agricultural Intensification, Soil Biodiversity and Agro Ecosystem Function. *Applied Soil Ecology* 6, 3-16.
- Giovannini, G., Lucchesi, S. and Giachetti, M., 1990. Effect of heating on some chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 149, 344-350.
- GOH, K. M., & Kumar, K. 2000. Crop Residues and Management Practices: Effects on Soil Quality, Soil Nitrogen Dynamics, Crop Yield and Nitrogen Recovery. *Advances in Agronomy*.
- Gozubuyuk, Z., Sahin, U. & Celik, A. (2020) Tillage and Irrigation Impacts on the Efficiency of Fossil Fuel Utilization for Hungarian Vetch Production and Fuel-Related CO₂ Emissions. *Environmental Engineering Science*, 37(3), 201–213. <https://doi.org/10.1089/ees.2019.0302>.
- Grzyb A, Wolna-Maruwka A, Niewiadomska A. 2020. Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. *Agronomy*.10(12):18.
- Gudynas, E. & Ghione, S., 2010. Agricultura y ganadería, biodiversidad, cambio climático: estrechamente vinculados. *LEISA revista de agroecología*, p. 26.4.
- Guo ZB, Liu H, Hua KK. 2018. Long-term straw incorporation benefits the elevation of soil phosphorus availability and use efficiency in the agroecosystem. *Span J Agric Res.*;16(3):12
- Hal Tenhoff, H. (2005). Manual de efectos del Fuego y Evaluación de Daños. uso y manejo de fuego en áreas agrícolas y forestales del departamento de Petén. Proyecto FAO TCP/GUA/2903.
- Harrison, P., 2002. Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. Informe resumido, Roma, Italia: FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- Hauck, C., 1974. Introducción. En: La agricultura migratoria y la conservación de suelos en África. s.l.:FAO. Boletín de suelos, pp. 1-5.

- Hernández, I. y López, D. 1999. Efectos de la quema sobre el ciclo del fósforo en una sabana de trachypogon. *Ecotropicos* 12(1): 3-8.
- Hernández, T.;García, C. y Reinhardt, I. 1997. Short-term effect of wildfire on the chemical, biochemical and microbiological properties of Mediterranean pine forest soils. *Biology and Fertility of soils* 25:109-116.
- Hubbert, K.R. and Oriol, V., 2005. Temporal fluctuations in soil water repellency following wildfire in chaparral steeplands, southern California. *International Journal of Wildland Fire*, 14: 439-447.
- Huffman, E.L., MacDonald, L.H. and Stednick, J.D., 2001. Strength and persistence of fire-induced soil hydrophobicity under ponderosa and lodgepole pine, Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, 15: 2877-2892.
- Huo LL, Meng HB, Tian YS. 2012. Experimental study on physical property of smashed crop straw. *Trans Chin Soc Agric Eng.*28(11):7.
- Jin ZQ, Shah TR, Zhang L. 2020. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice–wheat rotation system: a review. *Food and Energy Secur.*;9(2):13.
- Jin ZQ, Shah TR, Zhang L.2020. Effect of straw returning on soil organic carbon in rice–wheat rotation system: a review. *Food and Energy Secur.*9(2):13.
- Jorge, R., 2015. Técnica para el mejoramiento y acondicionamiento de los rastrojos. INIA.
- Ketterings, Q.M. and Bigham, J.M., 2000. Soil color as an indicator of slash-and-burn fire severity and soil fertility in Sumatra, Indonesia. *American Journal of Soil Science Society*, 64: 1826-1833.
- Lal, R. (1997). Long-term tillage and maize monoculture effects on a tropical Alfisol in western Nigeria. I. Crop yield and soil physical properties. *Soil Till. Res.*
- Leighton-Boyce, G., Doerr, S.H., Walsh, R.P.D., Shakesby, R.A., Ferreira, A.J.D., Boulet, A. and Coelho, C.O.A., 2003. Spatio-temporal patterns of soil water repellency in Portuguese eucalyptus forests and implications for slope hydrology. pp. 111-116, In: Servant, E., Najem, W., Leduc, C. and Shakeel, A. (eds.), *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*. IAHS Publication 278.

- Letey, J., 2001. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency. *Hydrological Processes*, 15:2867-2875.
- Li GH, Chen HZ. 2014. Synergistic mechanism of steam explosion combined with fungal treatment by *phellinus baumii* for the pretreatment of corn stalk. *Biomass Bioenergy*.67:1–7
- Li, T., Baležentis, T., Makutėnienė, D., Streimikiene, D. & Kriščiukaitienė, I. (2016) Energy-related CO2 emission in European Union agriculture: Driving forces and possibilities for reduction. *Applied Energy*, 180, 682–694. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.03>.
- Lqbal A, Shah F, Hamayun M. 2019. Plants are the possible source of allelochemicals that can be useful in promoting sustainable agriculture. *Fresenius Environ Bull*.28(2A):1052–1061.
- Malobane ME, Nciizah AD, Mudau FN.2020. Tillage, crop rotation and crop residue management effects on nutrient availability in a sweet sorghum-based cropping system in marginal soils of South Africa. *Agronomy*.10(6):13. .
- Marcos, E., Tarrega, R. and Luis, E., 2007. Changes in a Humic Cambisol heated (100-500 °C) under laboratory conditions: The significance of heating time. *Geoderma*, 138: 237-243.
- Martínez, F. (2002). *Gestión y tratamiento de residuos agrícolas*.Infoagro.
- Maturana, M., & Acevedo, E. (2003). *Cambios en la fertilidad del suelo asociados a cero labranza*. Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta. Santiago: Universidad de Chile.
- Migongo, E., 2013. ¿Cómo obtener ventajas ecológicas y económicas simultáneamente?: La creación de cercas vivas de nopal en Ecuador, Loja: UNESCO.
- Mohammed, S., Gill, A.R., Alsafadi, K., Hijazi, O., Yadav, K.K. & Khan, A.H. (2021) An overview of greenhouse gases emissions in Hungary. *Journal of Cleaner Production*, 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127865>.

- Neary, D.G., Ryan, K.C. and DeBano, L.F., 2008. Wildland Fire in Ecosystems: Effects of Fire on Soils and Water. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, USA.
- Nie SA, Lei XM, Zhao LX. 2018. Fungal communities and functions response to long-term fertilization in paddy soils. *Appl Soil Ecol.*130:251–258.
- Nwadialo, B.E. and Mbagwu, J.S.C., 1991. An analysis of soil components active in microaggregate stability. *Soil Tech.*, 4: 343-350.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F. & Erasmi, S. (2016) Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 76(3), 327–352. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002>.
- Oguntunde, P.G., Fosu, M., Ajayi, A.E. and Giesen, N., 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol. Fertil. Soils*, 39: 295-299.
- Otte BA, Rice CP, Davis BW. 2020. Phenolic acids released to soil during cereal rye cover crop decomposition. *Chemoecology*.30(1):25–34.
- Palansooriya KN, Shaheen SM, Chen SS. 2020. Soil amendments for immobilization of potentially toxic elements in contaminated soils: a critical review. *Environ Int.*134:105046.
- Pan XY, Shi RY, Hong ZN.2020. Characteristics of crop straw-decayed products and their ameliorating effects on an acidic Ultisol. *Arch Agron Soil Sci.* 2020;1–14. DOI:10.1080/03650340.2020.1805104.
- Pan XY, Xu RK, Nkoh JN. 2021. Effects of straw decayed products of four crops on the amelioration of soil acidity and maize growth in two acidic Ultisols. *Environ Sci and Pollut Res Int.*28(5):5092–5100.
- Perry, J. y otros, 2016. How natural Forest Conversion Affects Insect Biodiversity in the Peruvian Amazon: Can Agroforestry Help?. *Forests*, 7(4), p. 82.
- Pinochet, D. 2004. Fósforo Olsen y su relación con la nutrición de los cultivos en los agroecosistemas chilenos. Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos. Universidad Austral de Chile.

- Platis, D.P., Anagnostopoulos, C.D., Tsaboula, A.D., Menexes, G.C., Kalburtji, K.L. & Mamolos, A.P. (2019) Energy analysis, and carbon and water footprint for environmentally friendly farming practices in agroecosystems and agroforestry. *Sustainability*, 11(6), 1664. <https://doi.org/10.3390/su11061664>.
- Reichert, J.M. and Darrell, L., 1994. Aggregate stability and rain-impacted sheet erosion of air-dried and prewetted clayey surface soils under intense rain. *Soil Science*, 158(3): 159-169.
- Rezig FAM, Mubarak AR, Ehadi EA. 2013. Impact of organic residues and mineral fertilizer application on soil–crop system: II soil attributes. *Arch Agron Soil Sci.*;59(9):1245–1261.
- Rigon JPG, Franzluebbbers AJ, Calonego JC. 2020. Soil aggregation and potential carbon and nitrogen mineralization with cover crops under tropical no-till. *J Soil Water Conser.*75(5):601–609.
- Rodríguez, J. 2001. Fertilización de los cultivos. Santiago, Chile. LOM. 117p.
- Rodríguez. (1993). La fertilización de los cultivos, un Método racional. Santiago: Universidad Católica de Chile.
- SAG, S. d. A. y. G., 2006. Manejo de Rastrojos y Labranza Conservacionista. En: Honduras: Tecnologías alternativas para pequeños agricultores agrarios.
- Schnitzler F, Lavorenti A, Berns AE. 2007. The influence of maize residues on the mobility and binding of benazolin: investigating physically extracted soil fractions. *Environ Pollut.*147(1):4–13.
- Singh G, Dhakal M, Yang L. 2020. Decomposition and nitrogen release of cover crops in reduced- and no-tillage systems. *Agron J.*;112(5):3605–3618.
- Singh, D., Herlin, I., Berroir, J.P., Silva, E.F. and Simoes Meirelles, M., 2004. An approach to correlate NDVI with soil color for erosion process using NOAA/AVHRR DATA. *Advances in Space Research*, 33:328-332.
- Song XL, Sun RJ, Chen WF. 2020. Effects of surface Straw mulching and buried straw layer on soil water content and salinity dynamics in saline soils. *Can J Soil Sci.*100(1):58–68.

- Su Y, Kwong RWM, Tang WL. 2021. Straw return enhances the risks of metals in soil?. *Ecotoxicol Environ Safety*.207:111201.
- Su Y, Lv JL, Yu M. 2020. Long-term decomposed Straw return positively affects the soil microbial community. *J Appl Microbiol*.128(1):138–150.
- Su Y, Yu M, Xi H. 2020. Soil microbial community shifts with long-term of different straw return in wheat-corn rotation system. *Sci Rep*.10(1):6360
- Terefe Wondafrash, Mariscal, S.I., Gomez, M.V. and Espejo, S.R., 2005. Relationship between soil colour and temperature in the surface horizon of Mediterranean soils: A laboratory study. *Soil Science*, 170(7): 495-503.
- Terefe Wondafrash, Mariscal, S.I., Peregrina, F. and Espejo, R., 2008. Influence of heating on various properties of six Mediterranean soils: A laboratory study. *Geoderma*, 143: 273-280.
- Tessum, C.W., Hill, J.D. & Marshall, J.D. (2014) Life cycle air quality impacts of conventional and alternative light-duty transportation in the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(52), 18490–18494. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406843111>.
- Ulery, A.L., Graham, R.C. and Amrhein, C., 1993. Wood ash composition and soil pH following intense burning. *Soil Science*, 156: 358-364.
- Vélez, A., Guevara, G., Gómez, H. & Ovando, J., 2013. Rastrojo manejo, uso y mercado en el centro y sur de Mexico. En: Mexico: CIMMYT.
- Wang XL, Yang ZL, Liu X. 2020. The composition characteristics of different crop straw types and their multivariate analysis and comparison. *Waste Manag*.110:87–97.
- Wei HR, Wang YZ, Jin Z. 2021. Utilization of straw-based phenolic acids as a biofungicide for a green agricultural production. *J Biosci Bioeng*.131(1):53–60.
- Xiang LL, Sheng HJ, Xu M. 2019. Reducing plant uptake of a brominated contaminant (2,2',4,4'tetrabrominated diphenyl ether) by incorporation of maize straw into horticultural soil. *Sci Total Environ*.663:29–37.

- Xinghua, Li, Shuxiao W., Lei D., Jiming H., Chao L., Yaosheng C., and Liu Y., 2007. Particulate and Trace Gas Emissions from Open Burning of Wheat Straw and Maize Stover in China. *Environment Science Technology*. 41, 6052-6058.
- Xu J, Zong MH, Fu SY.2016. Correlation between physicochemical properties and enzymatic digestibility of rice straw pretreated with cholinium ionic liquids. *ACS Sustain Chem Eng*.4(8):4340–4345.
- Xu P, Sun CX, Ye XZ. 2016. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil. *Ecotoxicol Environ Safety*.132:94–100.
- Xu X, Pang DW, Chen J.2018. Straw return accompany with low nitrogen moderately promoted deep root. *Field Crops Res*.221:71–80.
- Yadav D, Vishwakarma AK, Sharma NK. 2021. Sustaining the properties of black soil in Central India through crop residue management in a conservationagriculture-based soybean–wheat system. *Land Degrad & Dev*.;16.
- Yang HS, Li YF, Zhai SL. 2020. Long term ditch-buried straw return affects soil fungal community structure and carbon-degrading enzymatic activities in a rice-wheat rotation system. *Appl Soil Ecol*.155:9.
- Yao L, Sa RL, Fan F. 2020. Allelochemicals: effects on growth characteristics of maize seeds and seedlings. *Chin Agric Sci Bull*.36(6):1–4.
- Zermeño, I., Pingarroni, A. & Martínez, M., 2016. Agricultural land-use diversity and forest regeneration potential in human-modified tropical landscapes. *Agriculture, Ecosystems, Volumen 230*, p. 210–220.
- Zhang H, Yang YX, Mei XY. 2020. Phenolic acids released in maize rhizosphere during maize-soybean intercropping inhibit phytophthora blight of soybean. *Front Plant Sci*.11:886.
- Zhang HY, Pang HC, Zhao YG.2020. Water and salt exchange flux and mechanism in a dry saline soil amended with buried straw of varying thicknesses. *Geoderma*365:9.

Zhang SJ, Zhang G, Wang DJ.2021. Abiotic and biotic effects of long-term straw retention on reactive nitrogen runoff losses in a rice–wheat cropping system in the Yangtze Delta region. *Agric, Ecosyst & Environ.*305:10.

Zhao SC, Li KJ, Zhou W. 2016. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China. *Agri& Ecosyst Environ.*216:82–88.

Zhao XL, Yuan GY, Wang HY. 2019. Effects of full Straw incorporation on soil fertility and crop yield in rice-wheat rotation for silty clay loamy cropland. *Agronomy.*9(3):12.

Capítulo VII. Industrialización del maíz.

Fernando Espinoza Espinoza

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-7854-8389>

Enrique Salazar Llorente

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-1699-042X>

Dayaneth Rivera Troya

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-7837-8423>

Jhon Izquierdo Moran

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0003-4233-4597>

7.1. Introducción

El cultivo del maíz tuvo su origen, con toda probabilidad, en América Central, especialmente en México, de donde se difundió hacia el norte hasta el Canadá y hacia el sur hasta la Argentina. La evidencia más antigua de la existencia del maíz, de unos 7 000 años de antigüedad, ha sido encontrada por arqueólogos en el valle de Tehuacán (México) pero es posible que hubiese otros centros secundarios de origen en América (Preetha and Stalin, 2014).

La supervivencia del maíz más antiguo y su difusión se debió a los seres humanos, quienes recogieron las semillas para posteriormente plantarlas. A finales del siglo XV, tras el descubrimiento del continente americano por Cristóbal Colón, el grano fue introducido en

Europa a través de España. Se difundió entonces por los lugares de clima más cálido del Mediterráneo y posteriormente a Europa septentrional. Mangelsdorf y Reeves (1939) han hecho notar que el maíz se cultiva en todas las regiones del mundo aptas para actividades agrícolas y que se recoge en algún lugar del planeta todos los meses del año. Crece desde los 58° de latitud norte en el Canadá y Rusia hasta los 40° de latitud sur en el hemisferio meridional. Se cultiva en regiones por debajo del nivel del mar en la llanura del Caspio y a más de 4 000 metros de altura en los Andes peruanos. (INFOCAMPO, 2014)

El maíz representa una cantidad significativa de alimentos diarios en la mayoría de las regiones en desarrollo. Se le conoce como oro amarillo debido a su utilidad como alimento de humanos y animales, también sirve como materia prima básica como ingrediente de miles de productos industriales que incluyen almidón, aceite, proteínas, bebidas alcohólicas, edulcorantes alimentarios, industrias farmacéuticas, cosmética, de películas, textil, de goma, de embalaje y papel, etc. (Preetha and Stalin, 2014). En general, el 35 % de la producción de maíz se utilizó para el consumo humano, el 25 % para alimentos para animales y el 25 % para alimentos para aves de corral y otro 15% es para uso en productos industriales como almidón, alcohol y semillas (Harris *et al.*, 2007).

A diferencia de los otros cultivos de cereales, el maíz es una hierba C4, eficiente en la utilización de agua, nutrientes y CO₂ para producir carbohidratos que se almacenan en las hojas, tallos y se cosechan como grano. Es uno de los cultivos de campo más eficientes en la producción de una cantidad superior de materia seca (MS) por unidad de área (Mosera *et al.*, 2005). En consecuencia, el maíz se convierte en el elemento principal en la dieta de muchas personas en los trópicos, el grano es utilizado para la alimentación animal en la región templada, así como nuevos productos para muchos otros fines, incluido el uso reciente como materia prima para biocombustibles.

La industrialización ha provocado un aumento de los productos agrícolas, tanto materias primas como industrializados. El procesamiento rápido de alimentos ha creado tiempo suficiente para la liberación humana, la participación en el mercado laboral y el cuidado de los niños (Reardon *et al.*, 2019). Esto ha resultado en una reducción de la tasa de mortalidad y un aumento de la tasa de natalidad, lo que ha provocado un fuerte aumento de la población y una gran demanda de recursos. Según Dowswell *et al.* (2019), 20 millones de toneladas de maíz se utilizan para almidón, 10 millones de toneladas se utilizan para la producción de combustible de etanol, 3 millones para cereales y productos horneados, 0,7 millones para

ventas de cereales y semillas híbridas. Como resultado de su precio reducido en comparación con otros cultivos, el maíz se ha utilizado como fórmulas alimenticias en la crianza de animales.

El maíz es de alto valor nutricional y ha sido considerado materia prima para muchas producciones industriales (Adiaha *et al.*, 2016). Esto incluye la producción de biometano, bioplásticos, fabricación de papel, embalaje y muchos aditivos. El sector agrícola contribuye sustancialmente a la creación de empleo y la comercialización internacional (Rekha y Singh, 2018). El efecto de cualquier tecnología en la agricultura debe evaluarse frente a la producción del producto, las ganancias, la salud y el efecto ambiental (Reardon *et al.*, 2019). Los alimentos muy procesados han provocado obesidad, diabetes y varios problemas de salud, de ahí la necesidad de asegurar la fortificación de los alimentos con suficientes nutrientes (Reardon *et al.*, 2019).

La cantidad y calidad de los alimentos se han visto amenazadas por condiciones ambientales desfavorables. Para satisfacer las necesidades de la alta población, se debe aumentar la cantidad de alimentos sin poner en peligro la calidad. En busca de una solución, el maíz ha sido el cultivo elegido por los investigadores (Otsuka y Muraoka, 2017). Según Abate *et al.*, (2015), luego de considerar factores que pueden ser utilizados para combatir la seguridad alimentaria, se eligió al maíz como el mejor cereal para ser cultivado en Etiopía. Explicó además que, en términos de consumo de calorías, el maíz es el alimento básico más importante. Otsuka y Muraoka (2017) reconocieron al maíz como el cereal más importante, considerando su producción y consumo. El desarrollo del sector agrícola es necesario para reducir la pobreza y garantizar la alimentación. La necesidad de asegurar los alimentos debe reforzarse con la revolución verde que aumentaría drásticamente el rendimiento de los cultivos de manera sostenible. Por lo tanto, el maíz que se cultiva fácilmente y posee muchos nutrientes tiene el potencial de combatir la inseguridad alimentaria a nivel mundial. El cultivo de maíz redujo la tasa de pobreza y mejoró la vida de los agricultores locales, especialmente en los países en desarrollo Adiaha *et al.*, (2016).

Se han realizado varios estudios sobre el maíz debido a su importancia económica. El maíz es uno de los pocos cultivos que ha llamado la atención de los investigadores en el área de mejoramiento genético (Badu-Apraku y Fakorede, 2017). Aparte de su importancia, los investigadores eligen trabajar con maíz porque es adecuado para cultivar y fácil de recopilar datos (Chen *et al.*, 2015). Teniendo en cuenta la previsión de la revolución industrial, es

necesario elaborar su papel y señalar cómo se puede cultivar de forma respetuosa con el medio ambiente.

7.2. Importancia del maíz

Desde la revolución verde el crecimiento económico mundial de este cereal ha ido en aumento, la producción de maíz ocupa el primer lugar en América Latina y África, mientras que en Asia ocupa el tercer lugar después del arroz y el trigo (Dowswell *et al.*, 2019). La demanda y la oferta de maíz a nivel mundial para productos alimentarios y no alimentarios están en aumento. Anualmente, se utilizan 15 millones de toneladas métricas (MMT) para alimentación animal, 4,25 MMT para uso industrial, 1,36 MMT se utilizan como alimento (Yadav *et al.*, 2016). Considerando su valor para uso doméstico, industrial y económico (Adiaha *et al.*, 2016), invertir en el aumento de la producción de maíz es una oportunidad para cualquier país. El maíz se cultiva en 170 países utilizando 184 M de ha de tierra con una producción de alrededor de 1016 MMT (Food Agricultural Organization of the United Nations ,2017).

El maíz es una palabra de origen indio caribeño, significa “lo que sustenta la vida”, en las civilizaciones maya y azteca tuvo un importante papel en sus creencias religiosas, festividades y nutrición. Estas civilizaciones afirmaban que la carne y la sangre estaban formadas por maíz. El maíz es milho en portugués, maïs en francés, maize o corn en inglés, maheende, mahindi o mase en África del Norte y Central, surratul-makkah en árabe (de makka - grano de Meca), makka en hindú, mukka en rajathani, makai en diversas zonas de Asia, entre ellas Nepal (Brites *et al.*, 2007).

7.3. El maíz como materia prima

Según Barba, (2017) el maíz se consume en muchas formas distintas, desde la sémola para polenta y pan de maíz al maíz para rosetas y productos como los copos de maíz. El grano se fermenta para elaborar ogi en Nigeria y otros países de África, y se descascara, degermina y precuece para elaborar arepas en Colombia y Venezuela.

En Egipto es muy común la elaboración de aish merahra, un pan plano de maíz que se sazona con alholva y se fermenta mediante una levadura de masa agria. La harina fina de maíz se emplea para hacer una masa blanda, a la que se mezcla un 5 por ciento de semillas de alholva molidas, pues se cree que la hierba aumenta el contenido de proteínas, mejora la

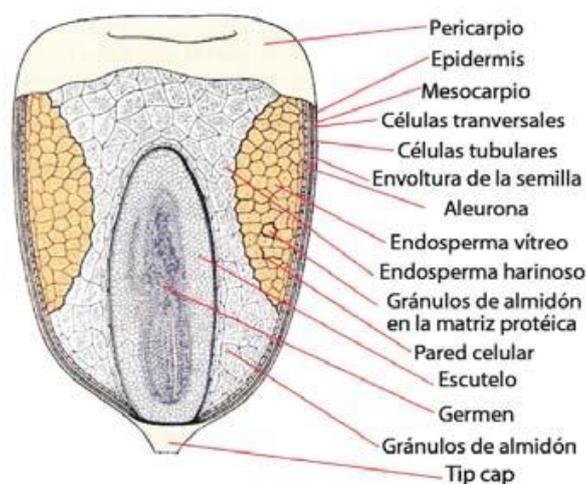
digestibilidad y alarga el periodo de almacenamiento posible del pan. La fermentación se inicia con masa agria y dura toda la noche. Por la mañana, se fabrican con la masa una especie de panecillos blandos y redondos que se dejan durante 30 minutos a «prueba». Antes de meterlos en el horno, se convierten los panes en discos grandes y planos. El aish merarhra se mantiene fresco de siete a diez días si se guarda en recipientes herméticos. En el Líbano se consume un producto similar llamado markouk. (Calero, 2021)

Hay muchas maneras interesantes y aceptables de elaborar el maíz que, a condición de que se presenten como productos atractivos y de fácil preparación, podrían contrarrestar en alguna medida la tendencia a un mayor consumo de alimentos derivados del trigo en los países consumidores de arepas y tortillas, así como en otros lugares. (Gobierno de México, 2016).

7.4. Composición del grano de maíz

La planta de maíz es uno de los mayores productores de la naturaleza, es una fábrica de alta capacidad para convertir eficientemente grandes cantidades de energía lumínica del sol en energía química estable. Esta energía se almacena como celulosa, aceite y almidón en la planta de maíz y su grano. Aproximadamente 4 meses después de la siembra, un solo grano produce de 300 a más de 800 granos. Los granos de maíz se desarrollan a través de la acumulación de los productos de la fotosíntesis, la absorción de las raíces y el metabolismo de la planta en la inflorescencia femenina llamada mazorca (Vikal y Chawla, 2014).

Consta de cuatro estructuras físicas principales: endosperma, germen o embrión, cubierta exterior de la semilla o pericarpio y la capa de la punta (tejido muerto que se encuentra donde el grano se une a la mazorca) como se muestra en la Figura. 1. El pericarpio es la capa



externa que se caracteriza por un alto contenido de fibra cruda, principalmente hemicelulosa, celulosa y lignina.

Figura 1. Sección transversal del grano de maíz.

Fuente: Pomeranz (1987)

El endospermo es el componente más grande (80–85 %), seguido del germen (9–10 %) y el pericarpio (5–6 %). Se compone principalmente de almidón (70 %), seguido de pequeñas concentraciones (8–10 %) de proteína (Prasanna *et al.*, 2001). El contenido de grasa del endospermo es relativamente bajo, está compuesto por un gran número de células, cada una llena de gránulos de almidón incrustados en una matriz continua de proteína. La pared celular se compone de polisacáridos no amiláceos (β -glucano y arabinoxilano), proteínas y ácidos fenólicos. Los cuerpos proteicos están compuestos casi en su totalidad por una fracción proteica rica en prolamina conocida como zeína. El grano de maíz tiene dos tipos de endospermo: harinoso y córneo. El endospermo harinoso contiene gránulos de almidón sueltos que rodean la parte central, mientras que el endospermo córneo tiene gránulos de almidón más pequeños y apretados hacia la periferia. El germen contiene altas concentraciones de grasa (33 %) y niveles relativamente altos de proteína (18–19 %) y minerales (Watson, 1987). El aceite de germen es relativamente estable debido a la presencia de antioxidantes naturales y muy apreciado para el consumo humano debido a su composición de ácidos grasos, que consiste principalmente en ácidos oleico y linoleico. El maíz contiene varios bioactivos constituyentes, tales como carotenoides, antocianinas y compuestos fenólicos que tienen muchas propiedades que promueven la salud y previenen enfermedades.

7.5. Calidad Nutricional del Maíz

Mejorar la calidad nutricional de los cultivos de cereales es particularmente importante, ya que los beneficios pueden extenderse fácilmente a cientos de millones de personas de la manera más rápida y eficaz sin cambiar los hábitos alimenticios tradicionales. La población mundial consume maíz como alimento básico, cuya calidad nutricional depende a su vez de la composición química de varios componentes de su grano. Dado que el endospermo representa el componente más grande, la calidad del grano de maíz depende en gran medida de su composición química (Vikal y Chawla, 2014).

Calidad de la proteína

La calidad de la proteína desde la perspectiva de la nutrición, es un término comparativo que se utiliza para describir qué tan bien una proteína alimentaria, cumple con los requisitos del cuerpo y por lo tanto, qué tan útil es la proteína para el sistema biológico. Esto está determinado por los componentes básicos que componen la proteína, llamados aminoácidos. Entre los 20 aminoácidos primarios, nueve se consideran "esenciales" ya que no pueden ser sintetizado por nuestro cuerpo y por lo tanto debe provenir de la dieta. La proteína de mejor calidad es aquella que proporciona un patrón de aminoácidos esenciales muy parecido al de las proteínas tisulares. Por lo general, las proteínas de la leche y del huevo sirven como proteínas de referencia, debido a su calidad superior. Según las recomendaciones de la Consulta conjunta de expertos FAO/OMS (2012), la composición de aminoácidos esenciales (mg/g de proteína) de la proteína de referencia necesaria para niños de 2 a 5 años es la siguiente: lisina 58, treonina 34, triptófano 11, metionina + cisteína 25. Se han introducido varios métodos para medir la calidad de las proteínas, incluido el valor biológico (BV), la utilización neta de proteínas (NPU) y la tasa de eficiencia de proteínas (PER). Sin embargo, la calidad de la proteína del maíz es pobre debido a las deficiencias de dos aminoácidos esenciales principales, la lisina y el triptófano y al exceso de leucina en la proteína del endospermo de su grano (Osborne y Mendel 1914). La proteína del endospermo se clasifica en varias fracciones como albúmina (3 %), globulina (3 %), zeína/prolamina (60 %) y glutelina (34 %). En función de su solubilidad, propiedades genéticas y masas moleculares aparentes, las zeínas se han clasificado en γ - (22 y 19 kDa), las más abundantes β - (14 kDa), δ - (27 y 16 kDa) y ϵ - zeína (10 kDa) (Wilson *et al.*, 1981). La fracción δ -zeína es rica en cisteína, mientras que las fracciones γ y β son ricas en metionina.

Generalmente en el maíz normal, la fracción de zeína contiene mayor proporción de leucina (18,7 %), fenilalanina (5,2 %), isoleucina (3,8 %), valina (3,6 %) y tirosina (3,5 %), pero bajas cantidades de otros aminoácidos esenciales como treonina (3 %), histidina y cisteína (1 %), metionina (0,9 %) y lisina (0,1 %), pero carece de triptófano. La fracción proteica no zeína es equilibrada y rica en lisina y triptófano. La alta proporción de zeínas en el endospermo es la razón principal de la mala calidad de la proteína del maíz (Vasal, 2000).

El descubrimiento del gen opaque-2 y su asociación con un mayor contenido de lisina y triptófano en el endospermo del maíz condujo al comienzo del desarrollo de QPM (Mertz *et al.*, 1964). Se desarrollaron mutantes con alto contenido de lisina, como opaque-2, y se introdujeron en maíz normal, lo que provoca un aumento del doble en los niveles de lisina

y triptófano. Además, la fracción de zeína o prolamina deficiente en lisina se reduce drásticamente en aproximadamente un 50 %, mientras que otras fracciones, como las albúminas, las globulinas y las glutelinas que son ricas en lisina, muestran un marcado aumento. El maíz opaque-2 de endospermo blando fue por lo tanto, evolucionado. Sin embargo, las variedades de maíz opaque-2 no pudieron volverse populares debido a la textura blanda y calcárea de sus granos, su inferioridad en términos de rendimiento y desempeño agronómico y susceptibilidad a la infestación de insectos y este fue el gran revés para los investigadores involucrados en el desarrollo de maíz mejorado nutricionalmente. Sin embargo, más tarde se han observado algunos endospermos parcialmente duros o granos “modificados” que poseen las concentraciones deseadas de aminoácidos esenciales. El maíz opaco 2 modificado con endospermo duro se conoce como QPM.

Carbohidratos

El principal carbohidrato del grano de maíz es el almidón, que aporta aproximadamente el 70 % del peso del grano. De hecho, el maíz es uno de los mayores productores de almidón. La molécula de almidón es un homopolímero de unidades repetitivas de anhidroglucosa unidas por enlaces glucosídicos β , el grupo aldehído de una unidad se une químicamente a un grupo hidroxilo en la siguiente unidad a través de enlaces hemiacetales. Los enlaces 1,4 producen moléculas de almidón de cadena lineal llamadas amilosa, mientras que los enlaces 1,6 sirven como punto de ramificación en moléculas de almidón de cadena ramificada llamadas amilopectina. La composición del almidón en el maíz está controlada genéticamente. En el maíz normal, la amilosa constituye el 25-30 % del almidón y la amilopectina hasta el 70-75 %. Existe una amplia variabilidad genética en maíz con respecto al perfil de almidón. Sobre la base de la composición del almidón, el maíz se clasifica en tres clases: (1) maíz ceroso, que contiene casi un 100 % de almidón de amilopectina; (2) maíz con alto contenido de amilosa, con almidón que contiene un contenido de amilosa entre 40 % y 70 %; y (3) maíz azucarado, que contiene menos almidón, pero un mayor nivel de sacarosa (Nelson y Pan, 1995). También se reporta maíz con amilosa de hasta 85 % (amilo maíz). Estas variantes tienen diferentes aplicaciones industriales, el maíz ceroso tiene un gran interés en la industria alimentaria, mientras que la industria textil requiere preferentemente maíz con alto contenido de amilosa. Se ha informado que el almidón mutante ceroso es más cristalino que los almidones de cereales regulares (Singh *et al.*, 2003; Vandeputte *et al.*, 2003). El almidón dietético varía mucho en cuanto a la digestibilidad y sus efectos sobre la utilización de otros nutrientes, el maíz posee una amplia variabilidad

genética con respecto a la digestibilidad de su molécula de almidón. El almidón se clasifica en tres grupos dependiendo de la tasa de liberación y absorción de glucosa en el tracto gastrointestinal: almidón de digestión rápida (RDS), almidón de digestión lenta (SDS) y almidón resistente (RS).

RDS es el grupo de almidones que pueden ser rápidamente hidrolizados por enzimas digestivas; SDS es el grupo que se digiere a un ritmo relativamente lento (Englyst *et al.*, 1992). Sin embargo, una parte no se digiere en el intestino delgado y llega al intestino grueso (colon) donde es fermentado por la microflora intestinal que produce ácidos grasos de cadena corta como productos finales que se sabe que promueven la función óptima de las vísceras. (Topping y Clifton, 2001). Esta porción no digerible de almidón se conoce como almidón resistente. El almidón de maíz ceroso se digiere más rápidamente que el almidón con alto contenido de amilosa, lo que se atribuye a una mayor superficie por molécula de amilopectina que de amilosa. Muchos beneficios para la salud, como la mejora del metabolismo del colesterol y la reducción del riesgo de diabetes tipo II y cáncer de colon, se han asociado con el consumo de RS (Hoebler *et al.*, 1999).

Los principales usos alimentarios del almidón incluyen edulcorantes, complementos de elaboración de cerveza, productos químicos/farmacéuticos, agentes de control de la viscosidad en conservas, productos de confitería a base de almidón y aplicaciones de panadería. Las aplicaciones industriales no alimentarias incluyen adhesivos en papel y materiales de construcción y recubrimientos y aprestos en textiles y productos de papel (Kulp, 2000). La aplicación del almidón en diversas industrias está determinada principalmente por sus propiedades funcionales, como viscosidad, hinchamiento, solubilidad, gelatinización, pegajosidad y retrogradación, que varían considerablemente de un cultivo a otro y con influencias ecológicas y agronómicas (Riley *et al.*, 2006). Las propiedades funcionales de dos importantes fuentes botánicas de almidones, el maíz y la mandioca para las industrias del almidón de África Oriental y encontraron aplicaciones en diferentes industrias. La mayor parte del almidón de maíz se extrae del grano mediante un proceso de molienda húmeda junto con otros subproductos (Yuan *et al.*, 2007).

Posteriormente, la fracción de almidón puede procesarse mediante procedimientos químicos o bioquímicos para mejorar su aplicabilidad en alimentos y productos industriales. Por ejemplo, los almidones oxidados se usan en almidones de lavandería y en la fabricación de papel. Las dextrinas (calentamiento en seco y tostado del almidón con o sin un catalizador

ácido o alcalino y un proceso conocido como dextrinización) se utilizan ampliamente como pastas de fraguado rápido en productos de papel. Los productos instantáneos, como los pudines instantáneos, se producen a partir de la pregelatinización de los almidones. Los almidones se tratan con enzimas para producir edulcorantes de maíz con alto contenido de fructosa que se encuentran en los refrescos, también se puede fermentar para producir alcohol. El almidón se puede derivatizar mediante varios agentes que reaccionan con grupos hidroxilo, derivados de reticulación, estabilización y otros derivados según las propiedades funcionales requeridas, como una mayor capacidad de combinación de agua, retrogradación impedida, etc. (Jackson, 1992; Kulp, 2000). Además, como el almidón es totalmente biodegradable, se puede usar para desarrollar bioplásticos en forma de material de empaque, artículos de servicio de comida rápida, etc.

El grano de maíz también posee algunos carbohidratos complejos, el contenido de carbohidratos complejos del grano de maíz proviene del pericarpio, la tapa de la punta, las paredes celulares del endospermo y en menor medida, las paredes de las células germinales. El salvado de maíz se compone de 75 % de hemicelulosa, 25 % de celulosa y 0,1 % de lignina en peso seco (Van Soest *et al.*, 1979). Estos constituyentes, aunque no digeribles, ayudan en el normalizado del proceso digestivo. Otros carbohidratos son azúcares simples presentes como glucosa, sacarosa y fructosa en cantidades que van del 1 % al 5 % del peso del grano. Los granos inmaduros contienen niveles relativamente altos de azúcares y menos cantidades de otros componentes nutricionales que se acumulan durante el desarrollo (Boyer y Shannon, 1982). El contenido de azúcar es el componente más reconocible de la calidad del maíz dulce, ya que el maíz dulce se come en una etapa inmadura de desarrollo (Evensen y Boyer, 1986).

Composición del aceite

El aceite se limita principalmente al germen, que proporciona alrededor del 85 % del aceite de grano total. El resto del aceite se dispersa en fracciones de endospermo y cáscara. El aceite de maíz se usa principalmente para cocinar y tiene un alto punto de humo, lo que lo hace valioso para freír (Katragadda *et al.*, 2010). También es un ingrediente clave en algunas margarinas. El aceite es un subproducto importante de la industria del almidón. El maíz normal proporciona alrededor del 2 al 6 % de aceite, mientras que el maíz con alto contenido de aceite contiene más del 6 % de aceite (Lambert, 2001). El maíz con alto contenido de aceite difiere en la composición del grano ya que se encuentra que el tamaño del germen es más grande en comparación con el maíz normal. Dado que la mayor parte del aceite lo aporta

el germen, el aumento del contenido de aceite en el maíz es directamente proporcional al tamaño del germen (Motto *et al.*, 2005). Sin embargo, el aumento del tamaño del germen está asociado con la reducción del almidón, ya que tanto el aceite como el almidón tienen una correlación negativa (Yang *et al.*, 2013). Los genotipos de maíz con concentraciones más altas de aceite son de interés para muchos engordadores de ganado, principalmente debido al valor calorífico más alto del grano.

El aceite de maíz es valorado por sus bajos niveles de ácidos grasos saturados, es decir en promedio 11 % de ácido palmítico y 2 % de ácido esteárico. Por otro lado, contiene altos niveles de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), principalmente ácido linoleico (24 %), y pequeñas concentraciones de linolénico ácido. El aceite de maíz juega un papel importante en la nutrición humana. Los PUFA ayudan a regular el colesterol en la sangre y reducen la presión arterial elevada (Dupont *et al.*, 1990). El aceite de maíz es una rica fuente de ácido linoleico que es un ácido graso esencial que el cuerpo no puede sintetizar. El término "ácido graso esencial" se refiere a los ácidos grasos necesarios para los procesos biológicos.

Se sabe que solo dos ácidos grasos son esenciales para los humanos: el ácido alfa-linolénico (un ácido graso omega-3) y el ácido linoleico (un ácido graso omega-6). La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y la Organización Mundial de la Salud recomiendan entre un 2 % y un 4 % de energía en forma de ácidos grasos esenciales, con un 3 % adicional de energía para las mujeres embarazadas o lactantes. Una cucharada de aceite de maíz es suficiente para satisfacer el requerimiento diario de ácidos grasos esenciales de un niño o un adulto saludable. El aceite de maíz también es reconocido como una excelente fuente de tocoferoles. Los tocoferoles funcionan como antioxidantes y proporcionan una buena fuente de vitamina E. Al igual que los ácidos grasos esenciales, la vitamina E también representa un componente esencial de la dieta humana, ya que no se puede sintetizar en el cuerpo. Es una clase de antioxidantes fuertes que protegen los ácidos grasos poliinsaturados en las membranas contra la degradación por especies reactivas de oxígeno como el ozono, el oxígeno singulete, los peróxidos y los hiperóxidos. Por lo tanto, la actividad antioxidante de los tocoferoles es importante no solo desde el punto de vista de la salud sino también en términos de calidad del aceite, ya que ayuda a aumentar su vida útil al retrasar el desarrollo de la rancidez. Los cuatro principales tocoferoles que se encuentran en el aceite de maíz son alfa, beta, gamma y delta-tocoferol. En el aceite de maíz comercialmente disponible, el gamma tocoferol es el más abundante, seguido del alfa-tocoferol y delta-tocoferol. El tocoferol que muestra el mayor efecto antioxidante es el

deltatocoferol, mientras que el alfa-tocoferol tiene la mayor actividad de vitamina E (Dormann, 2003).

Pigmentos naturales

El color del maíz varía de blanco a amarillo, rojo, azul, morado, etc. Los granos de maíz de pigmento azul, morado y rojo son ricos en antocianinas con propiedades antioxidantes bien establecidas y propiedades bioactivas (Adom y Liu, 2002). El contenido de antocianinas, carotenoides y fenoles en el maíz varía con el color. La mayor concentración de pigmentos de antocianina en el maíz está presente en la porción del pericarpio, mientras que la capa de aleurona contiene pequeñas cantidades (Moreno *et al.*, 2005).

El maíz exhibe una variación natural considerable para carotenoides del grano con algunos genotipos acumulando hasta 66,0 $\mu\text{g/g}$ (Harjes *et al.*, 2008). Los carotenoides predominantes en los granos de maíz en orden decreciente de concentración son luteína, zeaxantina, β -caroteno, β -criptoxantina y β -caroteno. El maíz amarillo tiene más carotenoides que el maíz harinoso. En general, los carotenoides provitamina A constituyen solo el 10-20 % del total de carotenoides en el maíz, mientras que el 30-50 % lo representan la zeaxantina y la luteína cada uno. En el maíz típico, las concentraciones de carotenoides provitamina A, es decir, β -caroteno, β -caroteno y β -criptoxantina, varían de 0 a 1,3, 0,13 a 2,7 y 0,13 a 1,9 nmol/g, respectivamente (Kurilich y Juvik, 1999).

También se sabe que el maíz contiene una amplia gama de ácidos fenólicos, el ácido ferúlico es un fitoquímico importante en el maíz y su concentración varía en los diferentes tipos de maíz. El maíz rico en carotenoides contiene una mayor cantidad de ácido ferúlico total en comparación con el maíz blanco, amarillo, rojo y azul. La mayor parte del ácido ferúlico del maíz está presente en forma ligada (Adom y Liu, 2002). La mayor parte de los compuestos fenólicos (ácidos fenólicos, flavonoides y aminas conjugadas) se concentran en las capas de pericarpio y aleurona, así como en el germen, con trazas en el endospermo (Sen *et al.*, 1994).

Composición mineral

La deficiencia de hierro es el trastorno nutricional más común y extendido en el mundo, además de afectar a un gran número de niños y mujeres en los países en desarrollo, es la única deficiencia de nutrientes que también prevalece significativamente en los países industrializados. Las cifras son asombrosas: dos mil millones de personas (más del 30 % de la población mundial) padecen anemia, muchas debido a la deficiencia de hierro y en áreas de escasos recursos, esto se ve agravado con frecuencia por enfermedades infecciosas. Puede

retardar el desarrollo mental y la capacidad de aprendizaje y deteriorar crecimiento físico durante la niñez y la adolescencia, mientras que en los adultos reduce la capacidad de realizar trabajo físico (Bouis, 2002). La deficiencia de zinc, otro micronutriente común, reduce la absorción intestinal de grasas y vitaminas liposolubles, incluido el retinol (Ahn y Koo 1995a, b; Kim *et al.*, 1998). De manera similar, otros elementos minerales, incluidos el calcio, el cobre, el magnesio, el manganeso, el fósforo y el potasio, también se consideran esenciales para diversas actividades fisiológicas, incluido el crecimiento y desarrollo de los huesos, los dientes, la sangre, los nervios, la piel; síntesis de vitaminas, enzimas y hormonas; así como para el funcionamiento saludable del sistema nervioso, la circulación sanguínea, la regulación de fluidos, la integridad celular, la producción de energía y la contracción muscular (MacDowel, 2003).

La composición mineral de los granos de cereales puede verse afectada por una serie de factores, como el tipo y la fertilidad del suelo, la humedad del suelo, los factores ambientales, el genotipo del cultivo y las interacciones entre los nutrientes (Arnold *et al.*, 1977; Feila *et al.*, 2005). Existe una amplia variabilidad natural para varios minerales en el germoplasma de maíz. Menkir (2008) evaluó un amplio conjunto de líneas endogámicas adaptadas al trópico para concentraciones de minerales. El mejor endogámico las líneas identificadas en cada ensayo tenían un 32–78 % más Fe y 14–180 % más Zn que su promedio de prueba en años. Los dos primeros ejes de componentes principales, que representaron el 55–64 % de la variación total en las concentraciones minerales del grano, estratificó las líneas endogámicas en cada ensayo en cuatro grupos en función de las diferencias en sus composiciones minerales del grano. Ninguna de las correlaciones de Fe y Zn con Mn, Cu, Ca, Mg, K, P y S fueron significativas y negativas en los diversos ensayos, mientras que las correlaciones de Fe con Zn fueron positivas y significativas. Ullah *et al.*, (2010) también analizaron la composición mineral de granos de diez variedades de maíz e informaron el rango de Na (540,30–620,41 ppm), K (2915–3471 ppm), Ca (410–590 ppm), Fe (38,02–56,14 ppm), Zn (37,05–52,4 ppm), Mg (985,2–1125,3 ppm) y Cu (11,02–14,25 ppm). Los cereales sin refinar contienen altos niveles de fitato (mioinositol hexafosfato), que es un poderoso inhibidor de la absorción de hierro y zinc tanto en adultos (Egli *et al.*, 2004) como en niños (Davidsson *et al.*, 2004). Cualquier reducción del fitato en la dieta puede tener un efecto positivo en la absorción de zinc (Lonnerdal, 2002) y la absorción de hierro (Mendoza *et al.*, 1998).

7.6. Biofortificación del Maíz

A nivel mundial, se estima que aproximadamente un tercio de los niños en edad preescolar y el 15 % de las mujeres embarazadas tienen deficiencia de vitamina A (OMS, 2009). El problema se vuelve más severo particularmente en los países en desarrollo cuyas poblaciones pobres dependen de un solo cultivo básico para su sustento, por ejemplo, África y el Sudeste Asiático tienen la mayor carga de deficiencia de vitamina A (OMS, 2009). Las consecuencias de la deficiencia de vitamina A incluyen ceguera, reducción del crecimiento de los niños y aumento de la morbilidad y la mortalidad (Rice *et al.*, 2004; Maida *et al.*, 2008). Además, la interacción del contenido de vitamina A con el contenido de hierro y zinc ha sido bien documentado (Hess *et al.*, 2005). El metabolismo del hierro se ve afectado negativamente por la deficiencia de vitamina A en la dieta y el hierro no se incorpora de manera efectiva a la hemoglobina (Hodges *et al.*, 1978). La co-ocurrencia de hierro y vitamina A, se han encontrado deficiencias en bebés en Sudáfrica (Oelofse *et al.*, 2002), niños en edad preescolar en las Islas Marshall (Palafox *et al.*, 2003), niños en edad escolar en Costa de Marfil (Hess, 2003) y mujeres embarazadas en India, Nepal y Malawi (Pathak *et al.*, 2003; Dreyfuss *et al.*, 2000). De manera similar, se ha considerado que la ingesta de zinc es inadecuada para aproximadamente el 30 % de la población en 46 países africanos (Hotz y Brown, 2004). La deficiencia de zinc, como ya se ha comentado, reduce la absorción intestinal de grasas y vitaminas liposolubles, incluida la vitamina A retinol en ratas.

La biofortificación es el desarrollo de cultivos básicos ricos en micronutrientes utilizando las mejores prácticas de mejoramiento tradicionales y la biotecnología moderna. Para aportar la vitamina A y los micronutrientes, particularmente las deficiencias de hierro y zinc de las áreas rurales de los países en desarrollo, la biofortificación de los principales cultivos alimentarios básicos de las respectivas áreas o países es la única forma factible, ya que esto garantizará mejor la focalización y el cumplimiento. Como el tercer cultivo alimentario básico de cereales más importante del mundo, el maíz califica como un cultivo adecuado para la biofortificación. Antes de idear una estrategia para mejorar los carotenoides provitamina A y los microelementos de hierro y zinc nutrientes en el maíz, una cuestión que debe abordarse es la cantidad objetivo para la biofortificación. Esto está relacionado con la biodisponibilidad o la fracción de un nutriente ingerido que queda disponible para el cuerpo para su utilización en funciones fisiológicas o para almacenamiento (Fraser y Bramley 2004). Existen numerosos factores que influyen en la biodisponibilidad, después de considerar todos estos factores se ha decidido que se requieren al menos 15 μg de β -

caroteno/g de peso seco del grano, 60 mg/kg de hierro y 55 mg/kg de zinc para que el maíz biofortificado tenga un impacto en la nutrición (Graham *et al.*, 1999).

7.7. Valor añadido

Una definición amplia de valor agregado es agregar económicamente valor a un producto y formar características más aceptadas en el mercado. La adición de valor en el maíz tiene un gran potencial. Hay varios productos de maíz con valor agregado, que no solo aumentan los ingresos agrícolas, sino que también brindan empleo a jóvenes rurales y mujeres campesinas.

El maíz se ha utilizado para el desarrollo de productos tradicionales, productos horneados, productos extruidos, alimentos precocinados, alimentos infantiles, alimentos saludables, refrigerios, alimentos salados, alimentos especiales, etc., que pueden satisfacer las necesidades nutricionales de las personas vulnerables (Kawatra y Sehgal, 2007). Se han desarrollado varios productos de valor agregado a partir de maíces especiales teniendo en cuenta los distintos grupos de edad y sus requisitos.

7.8. Alimentos de maíz fermentado

Los alimentos fermentados se consideran alimentos sabrosos y saludables preparados a partir de materias primas crudas o calentadas y apreciados por sus atributos como sabor agradable, aroma, textura, mejores propiedades de procesamiento y mejor digestibilidad. El maíz es una buena fuente de fibra dietética y proteínas y es muy bajo en grasas y sodio. El endospermo consta de aproximadamente un 70 % de almidón incrustado en una matriz proteica que convierte al maíz en un excelente sustrato para fermentación. El maíz se procesa, fermenta y consume de diversas formas. Algunos de los productos de maíz fermentado incluyen Chicha (una bebida alcohólica clara, amarillenta, efervescente, con un contenido de alcohol entre 2 % y 12 %, más popular en América del Sur y Central), Tesguino (una bebida alcohólica similar a una papilla preparada a partir de maíz o jugo de tallo de maíz comúnmente consumido en el norte y noroeste de México), Umqombothi (una bebida alcohólica rosada, opaca y suave con sabor a yogur con una consistencia ligera, preparada con maíz y sorgo popular en la población sudafricana), Busaa (una bebida alcohólica opaca de Kenia cerveza de maíz con 2 a 4 % de etanol y 0.5 a 1 % de ácido láctico), atole (un producto tipo papilla agria del sur de México), pozol (masa de maíz fermentada en forma de bolas de varias formas y tamaños, que es una receta importante del sureste de México) (Vikal y Chawla, 2014).

7.9. Maíz Especial

Los fitomejoradores han alterado a través de la genética el contenido de almidón, proteína y aceite del maíz para satisfacer mejor las necesidades de la población humana, los criadores de ganado, la industria alimentaria y otros usuarios industriales del maíz. Como resultado de sus modificaciones de los tipos de dientes ordinarios, se han creado nuevos granos especiales, que incluyen maíz dulce, ceroso, alto en amilosa, alto en aceite y maíz tierno. El maíz dulce y el maíz tierno son dos tipos especiales importantes que están ganando gran popularidad en los últimos tiempos. El maíz dulce es una variedad de maíz con alto contenido de azúcar. A diferencia de otros maíces normales, que se cosechan cuando los granos están secos y maduros, el maíz dulce se cosecha cuando los granos están inmaduros y se come como verdura. El maíz dulce estándar inmaduro se considera deseable cuando los granos son succulentos debido a un reces mutante Gen *sive sugary-1 (su-1)* que retarda la conversión de azúcar en almidón durante el desarrollo del endospermo. En comparación, la sacarosa producida en las hojas a partir de la fotosíntesis en el maíz dentado se transmite a los granos en desarrollo, donde se convierte rápidamente en dextrina (un polisacárido soluble en agua no dulce) y luego en almidón. El gen *sugary-1* ralentiza este proceso (Vikal,2014).

El maíz tierno es la mazorca joven, cosechada cuando los estigmas acaban de emerger y no se ha producido la fertilización. El maíz baby es una hortaliza muy deliciosa y nutritiva y ha sido considerada como un producto agrícola de alto valor en los mercados nacionales e internacionales. Está libre de los efectos nocivos de los pesticidas ya que el maíz tierno está cubierto herméticamente con cáscara y debido a la cosecha temprana; está libre de plagas y enfermedades dañinas. Se han desarrollado una serie de productos con valor adicional a partir de maíz enano, y existe una amplia gama de desarrollo y promoción de productos de valor agregado a partir de maíz enano (Vikal,2014).

7.10. Industrialización del grano de maíz

El maíz es una materia prima importante para la producción de una serie de productos industriales como almidón, aceite, etanol, malta y alimento de animales. Dos tipos de procesos industriales son comunes para el procesamiento del maíz: la molienda en húmedo y la molienda en seco. La molienda húmeda implica la separación de los granos en sus componentes constituyentes, como germen, salvado (fibra), proteína y almidón. En este proceso, los granos se sumergen o remojan en agua durante 24 a 48 horas para facilitar la

separación de los componentes del grano. Luego, estos componentes se eliminan secuencialmente a través de una serie de procesos industriales para obtener los productos finales. El germen es removido y procesado para la extracción de aceite que luego es purificado y vendido para consumo humano. El salvado (componentes de fibra) se utiliza en la alimentación animal. Tanto el almidón como el gluten se separan mediante procesos de centrifugación. El maíz es una materia prima industrial importante para la producción de almidón que se utiliza en una serie de industrias, como la industria papelera, la industria textil, la industria farmacéutica, la industria alimentaria y la industria del cuero. Puede procesarse aún más para sintetizar una serie de componentes, como dextrosa, fructosa y jarabes de maíz con alto contenido de fructosa (Vikal,2014).

La harina de gluten de maíz es un subproducto que se vende al sector avícola como alimento rico en proteínas. En el proceso de molienda en seco, todo el grano se convierte en harina (Butzen y Haefele 2008). El proceso de molienda en seco generalmente se emplea para la producción de etanol a partir de maíz. En este proceso, los granos se muelen y se mezclan con agua para formar una pasta llamada “puré” que se cocina más durante la cual el almidón se convierte enzimáticamente en azúcares. Los azúcares se fermentan a etanol mediante la adición de levadura adecuada. El etanol se extrae y los restos sólidos se secan para producir granos secos de destilería solubles (DDGS) que se utilizan como ingrediente rico en proteínas en la dieta animal.

Una parte significativa del maíz producido se utiliza para la producción de biocombustibles en los EE. UU. En India, los formuladores de políticas están considerando seriamente la exploración del maíz para la síntesis de biocombustibles para satisfacer la demanda cada vez mayor de combustibles para el tráfico vehicular. La creciente producción de maíz en todo el mundo ha hecho necesario encontrar procesos industriales económicamente viables para su conversión a etanol para su uso como biocombustible. Otro uso importante del maíz podría ser su conversión en malta para la producción de cerveza. En la actualidad, el maíz se utiliza como complemento junto con la cebada, que es el cereal más preferido para el malteado (Vikal,2014).

Industria procesadora

El maíz es utilizado, básicamente, en cuatro procesos industriales molienda por vía húmeda o per vía seca, fermentación y destilación y fábricas de alimentos balanceados. Esta clasificación no es mutuamente excluyente, dado que en una misma organización se pueden

producir simultáneamente, productos de molienda y de fermentación. Si la fermentación es una industria aparte, una parte de la fuente de carbohidratos podrá originarse tanto en la molienda húmeda como en la seca.

La mayor parte de incremento en la utilización industrial del maíz, se ha producido en los países desarrollados, especialmente en los Estados Unidos. En dicho país, según las estimaciones oficiales, la utilización de maíz en 1997/98 para jarabe de maíz de alto contenido de fructosa (HFCS), almidón y etanol representó aproximadamente el 20% de la utilización total. Se estima que en 1997/98 el volumen de maíz utilizado para la producción de HFCS ha aumentado un 7% debido principalmente a una fuerte demanda de los fabricantes de bebidas sin alcohol, que se cuentan entre los principales usuarios. El maíz utilizado para fabricar edulcorantes (tales como la glucosa y la dextrosa) aumentó en un 2% en dicho periodo. El maíz utilizado para la producción de almidón aumentó en un 2% debido a la fuerte demanda de las compañías de papel y de los fabricantes de materiales de construcción. El maíz utilizado para producir etanol alcanzó un nivel máximo en 1997/98. (Fassio, 2000).

Procesamiento por vía húmeda

El principal objetivo de la molienda húmeda, es la producción de almidón puro de maíz y varios productos derivados del almidón, la demanda de maíz por la molinería en Estados Unidos aumentó en 30 años de 0 a 11 % del total del maíz utilizado (Mascia y Troyer, 1998). El maíz ha sido especialmente atractivo para la manufactura de almidón y edulcorantes pero el proceso de molienda húmeda, no sólo por su precio y disponibilidad, sino también porque el almidón es fácilmente recuperado con alto rendimiento y pureza. Un estudio realizado por la Asociación de Refinadores de Maíz de Estados Unidos reveló que el supermercado promedio poseía más de 1000 Items alimenticios que tenían como ingredientes productos o derivados de la molienda húmeda de maíz (Watson, 1987).

Para la separación de las diferentes partes del grano, se utiliza un proceso que depende mucho del agua. Además, se emplean procesos enzimáticos o químicos para convertir al almidón en jarabes y azúcares. Los componentes remanentes del grano pelado, los embriones, proteínas y pericarpio, constituyen subproductos valiosos y son utilizados principalmente, para la producción de aceite de maíz y alimentos. En este proceso todos los constituyentes del grano son recuperados y utilizados.

Los granos de maíz enteros y limpios se maceran en una solución ligeramente acidificada durante 33-36 horas, a una temperatura de entre 48 y 50°C. El agua que contiene la fracción solubilizada (corn steep) se separa y una vez secada constituye el «gluten feed» junto con el salvado. El maíz reblandecido y húmedo es molturado para separar el embrión por flotación o hidrociclones, una vez separado el germen es lavado y secado como paso previo a la recuperación del aceite. Al germen al que se le ha extraído el aceite, se denomina harina de germen de maíz o bagazo de maíz, que puede ser utilizado directamente en alimentación animal sin ningún procesamiento, dado que representa sólo una pequeña fracción del grano, normalmente se agrega al gluten feed (Fassio, 2000).

El remanente del grano de maíz, compuesto por almidón, gluten y salvado, es molido para pulverizar las partículas del endosperma, luego de tamizadas, las partículas remanentes, principalmente el endosperma y pericarpio gruesos (salvado) son aisladas para su comercialización una vez secadas (fibra; o son mezcladas con la fracción de corn steep condensada formando el gluten feed, luego de la remoción de estas partículas más gruesas, la fina suspensión remanente de almidón y gluten (proteína) pasa a máquinas centrifugadoras de alta velocidad, donde el almidón al ser más pesado, se separa de las partículas más livianas de gluten. El gluten una vez secado constituye el producto denominado gluten meal que posee 70% de proteína, con un rendimiento de 5.5 a 6.0% del maíz en base seca (Watson, 1988).

El almidón ha sido entonces, completamente separado de otros constituyentes del grano y está listo para el secado y posterior procesamiento en otros productos de almidón seco, conversión a jarabe y azúcar. El almidón es recuperado en forma purificada en un rendimiento de 37 a 69 % de la materia seca del maíz con una eficiencia de recuperación de 93 a 96% del contenido de almidón (Watson 1988).

Recientemente se han desarrollado varias técnicas y modificaciones para el proceso de molienda húmeda, que podrían ser adoptados por la industria, incluyendo la utilización de membranas y varios procedimientos cortos de embebido para la utilización en pequeños molinos modulares, la aplicación de las membranas en la industria de molinería húmeda ha ido creciendo particularmente rápido, especialmente en la refinera de jarabes (Eckhoff, 1998).

Procesamiento por vía seca

El objetivo de procesamiento en seco del maíz es separar las diferentes partes del grano; reteniendo la máxima cantidad de almidón duro como trozos discretos con la menor contaminación posible de grasa fibra y almidón harinoso. La molienda seca produce básicamente, endosperma de maíz en un rango de tamaños de partículas. En contraste con la molienda húmeda, este proceso es relativamente simple y son pocos los productos obtenidos. Principalmente a harina de maíz para «polenta». las sémolas de distinta granulometría, la mazamorra (grano desgerminado, partido y pulido) y los grits utilizados por la industria cervecera y en la fabricación de alimentos para desayuno y “snacks” (Fassio, 2000).

En el viejo proceso de molienda el grano entero de maíz era molido entre piedras rotativas próximas para producir una harina similar a la de trigo. Generalmente, el embrión no era removido antes de la molienda porque su presencia mejoraba el sabor. Sin embargo, la calidad se ve perjudicada por la presencia de manchas oscuras debido a las partículas remanentes del salvado y por el alto contenido de aceite, que provoca el enranciamiento dificultando el almacenamiento prolongado. Hoy en día, antes de la molienda, se realiza un proceso de desgerminación que separa al grano en tres categorías generales de materias primas: germen, cáscara y endosperma para la producción de grits, meal y harina (Fassio, 2000).

Como primer paso se realiza la limpieza de grano, para remover los granos rotos y material extraño y luego se condiciona a 20- 24% de humedad para aflojar a cáscara y germen de endosperma. Luego el grano es desgerminado molido cernido y aspirado, separado al endosperma en diferentes rangos de tamaño, desde grits largos a harina y meal, y separando al germen y cáscara para el posterior procesado.

Según Hil *et al.*, (1991) aproximadamente un 50% del peso total procesado se transforma en grits (el producto más grueso) para la utilización en la industria cervecera, «snacks» y cereales de desayuno, sobre todo, corn flakes mediante el cocinado, arrollado y tostado. Los grits y meal también se utilizan para realizar platos de maíz. La meal y harina son utilizadas para panes y varios otros productos de panadería. Los subproductos incluyen los embriones (utilizados para la extracción de aceite) y pericarpios separados. El residuo de los embriones y el pericarpio se utilizan como ingredientes de raciones.

El aceite se remueve de la reacción germen por el mismo proceso que en la molienda húmeda. Sin embargo, como la separación de germen es menos eficiente; la cantidad de aceite recuperado por tonelada de maíz es de alrededor de 1/3 a 1/2 de la obtenida en el proceso húmedo. El aceite sin refinar del proceso seco, tiene un menor contenido de ácidos grasos que el del húmedo.

La mayoría de las industrias que elaboran el maíz en seco prefieren el grano anaranjado de almidón semiduro, vitreo, que no tenga demasiado almidón blando en la punta. Cuando hay abundante oferta se observa en el mercado nacional un cierto castigo a los maíces amarillos. En general los tipos de maíz duro, con mayor rendimiento de “grits son más adecuados para la molienda seca y los dentados que poseen mayor velocidad de humectación y rendimiento de almidón serían los preferidos para la molienda húmeda (Eyhérbáide y Gómez, 1996).

7.11. Conclusiones

Los productos de valor agregado preparados a base de maíz no solo son nutritivos sino también fáciles de preparar. Teniendo en cuenta el perfil nutricional del maíz, el desarrollo de estos productos no solo diversificará los usos del maíz, sino que también será beneficioso para la salud humana, especialmente para combatir la desnutrición. Existe la necesidad de desarrollar y popularizar entre las amas de casa productos de valor agregado a base de maíz y maíz de calidad proteica para que incluyan estas preparaciones en su dieta diaria. El desarrollo de productos industriales y la deshidratación, congelación y enlatado de maíz tierno pueden ser asumidos como actividad empresarial por parte de los empresarios. La mayor utilización de maíz alentará a los agricultores a mejorar la producción de maíz, lo que indirectamente puede ayudar a mejorar los estándares económicos de los agricultores. También se requieren esfuerzos hacia la comercialización de productos de valor agregado a base de maíz a través de grupos de autoayuda, industrias alimentarias, etc.

7.12. Bibliografía

Abate, T., Shiferaw, B., Menkir, A., Wegary, D., Kebede, Y., Tesfaye, K., et al. (2015). Factors that transformed maize productivity in Ethiopia. *Food Security* 7, 965–981. doi: 10.1007/s12571-015-0488-z

- Adiaha, M., Agba, O., Attoe, E., Ojikpong, T., Kekong, M., Obio, A., et al. (2016). Effect of maize (*Zea mays* L.) on human development and the future of man-maize survival: a review. *World Sci. News* 59, 52–62.
- Adom KK, Liu RH (2002) Antioxidant activity of grains. *J Agric Food Chem* 50:6182–6187.
- Ahn J, Koo SI (1995a) Effects of zinc, and essential fatty acid deficiencies on the lymphatic absorption of vitamin A and secretion of phospholipids. *J Nutr Biochem* 6:595–603.
- Ahn J, Koo SI (1995b) Intraduodenal phosphatidylcholine infusion restores the lymphatic absorption of vitamin A and oleic acid in zinc-deficient rats. *J Nutr Biochem* 6:604–612.
- Arnold JM, Bauman LF, Aycock HS (1977) Interrelations among protein, lysine, oil, certain mineral element concentrations, and physical kernel characteristics in two maize populations. *Crop Sci* 17:421–425.
- Badu-Apraku, B., and Fakorede, M. (2017). Maize in Sub-Saharan Africa: importance and production constraints, in *Advances in Genetic Enhancement of Early and Extra-Early Maize for Sub-Saharan Africa*, eds Badu-Apraku, B., and Fakorede, M., (Cham: Springer), 3–10.
- Barba, M. (2017). THINKBING. Obtenido de <https://blogthinkbig.com/maiz-materia-biocombustibles>.
- Bouis EH (2002) Plant breeding: a new tool for fighting micronutrient malnutrition. *J Nutr* 132:491S–494S.
- Boyer CD, Shannon JC (1982) The use of endosperm genes for sweet corn improvement. In: Janick J (ed) *Plant breeding reviews*, vol 1. AVI Publishing, Westport, pp 139–154.
- Brites, C., Haros, C., Trigo, M & Islas, R. (2007). Maíz in *De tales harinas, tales panes: granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica*.
- Butzen S, Haefele D (2008) Dry-grind ethanol production from corn. *Crop Insights* 18:01–05.

- Calero, C. (2021). CALERO. Obtenido de <https://www.calero-group.com/proceso-de-transformacion-del-maiz/>.
- Chen, D., Lan, Z., Hu, S., and Bai, Y. (2015). Effects of nitrogen enrichment on belowground communities in grassland: Relative role of soil nitrogen availability vs. soil acidification. *Soil Biol. Biochem.* 89, 99–108. doi: 10.1016/j.soilbio.2015.06.028.
- Davidsson L, Ziegler EE, Kastenmayer P, van Dael P, Barclay D (2004) Dephytinisation of soyabean protein isolate with low native phytic acid content has limited impact on mineral and trace element absorption in healthy infants. *Br J Nutr* 91:287–293.
- Dormann P (2003) Corn with enhanced anti-oxidant potential. *Nat Biotechnol* 21:1015–1016.
- Dowswell, C. R., Paliwal, R. L., and Ronald, P. C. (2019). *Maize in the Third World*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Dowswell, C. R., Paliwal, R. L., and Ronald, P. C. (2019). *Maize in the Third World*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Dreyfuss ML, Stoltzfus RJ, Shrestha JB, Pradhan EK, LeClerq SC, Khatry SK, Shrestha SR, Katz J, Albonico M, West KP Jr (2000) Hookworms, malaria and vitamin A deficiency contribute to anemia and iron deficiency among pregnant women in the plains of Nepal. *J Nutr* 130:2527–2536.
- Dupont J, White PJ, Carpenter MP, Schaefer EJ, Meydani SN, Elson CE, Woods M, Gorbach SL (1990) Food uses and health effects of corn oil. *J Am Oil Nutr* 9:438–470.
- ECKHOFF, S.R. 1998, Recent advances in corn wet millng. In Program Proceedings of the Corn Utilization & Technology Conference (1998, St Lois Missouri) p. 5-8.
- Egli I, Davidsson L, Zeder C, Walczyk T, Hurrell R (2004) Dephytinisation of a complementary food based on wheat and soy increases zinc, but not copper, apparent absorption in adults. *J Nutr* 134:1077–1080.
- Englyst HN, Kingman SM, Cummings JH (1992) Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. *Eur J Clin Nutr* 46:S33–S50.

- Evensen KB, Boyer CD (1986) Carbohydrate composition and sensory quality of fresh and stored sweet corn. *J Am Soc Hortic Sci* 111:734–739, FAO statistical yearbook 2012. World Food and Agriculture. <http://www.fao.org/docrep/015/i2490e/i2490e00.htm>.
- Eyherabide, G.; Gómez. L.G. 1996 Situación y avances del subprograma maíz INTA - Argentina In *Memorias, IV Reunión de Coordinadores Suramericanos de Programas de Maíz* (1996, Cali. Colombia). Ed. by De León y Narro p. 6-17.
- FAO Statistical Yearbook (2012) World food and agriculture. <http://www.fao.org/docrep/015/i2490e/i2490e00.htm>.
- Fassio, A., Cozzolino, D., Bonjour, V., Pascal, A., Condón, F., & Delucchi, I. (2000). Maíz: variabilidad genética y usos alternativos del grano. INIA Serie Técnica.
- Feila S, Mosera B, Jampatongb S, Stampa P (2005) Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by preanthesis drought and rate of nitrogen fertilization. *Crop Sci* 45:516–523.
- Food Agricultural Organization of the United Nations (2017). Production Quantity of Maize, Green by Country. Available online at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>.
- Fraser PD, Bramley PM (2004) The biosynthesis and nutritional uses of carotenoids. *Prog Lipid Res* 43:228–265.
- GOBIERNO DE MÉXICO. (2016). Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/industrializacion-del-maiz-mas-alla-de-la-tortilla-40879>.
- Graham R, Senadhira D, Beebe S, Iglesias C, Monasterio I (1999) Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Res* 60:57–80.
- Harjes CE, Rocheford TR, Bai L, Brutnell TP, Kandianis CB, Sowinski SG, Stapleton AE, Vallabhaneni R, Williams M, Wurtzel ET, Yan J, Buckler ES (2008) Natural genetic variation in lycopene epsilon cyclase tapped for maize biofortification. *Science* 319:330–333.

- Harris, D., Rashid, A., Miraj, G., Arif, M. y Shah, H. (2007). Cebado de semillas “en la finca” con solución de sulfato de zinc: una forma rentable de aumentar los rendimientos de maíz de los agricultores de escasos recursos. *Investigación de cultivos de campo*, 102(2), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.005>.
- Hess SY (2003) Interactions between iodine and iron deficiencies. Thesis/Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, DissETHNo.15002.
- Hess SY, Thurnham DI, Hurrell RF (2005) Influence of provitamin A carotenoids on iron, zinc and vitamin A status. *HarvestPlus Technical Monograph series 6*. HarvestPlus, Washington, DC, pp 28.
- Hill, L.; Paulsen, M.; Bouzaher, A.; Patterson, M. Bender, K.; Kirleis.A. 1991 Economic evaluation of quality characteristics in the dry milling of corn North Central Regional Research Publication 330 Illinois Agricultural Experimental Station Bulletin 804. 52p.
- Hodges RE, Sauberlich HE, Canham JE, Wallace DL, Rucker RB, Mejia LA, Mohanram M (1978) Hematopoietic studies in vitamin A deficiency. *Am J Clin Nutr* 31:876–885.
- Hoebler C, Karinthe A, Chiron H, Champ M, Barry JL (1999) Bioavailability of starch in bread rich in amylose: metabolic responses in healthy subjects and starch structure. *Eur J Clin Nutr* 53:360–366.
- Hotz C, Brown K (2004) Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. *Food Nutr Bull* 25(1):194–195.
- INFOCAMPO. (05 de 12 de 2014). Obtenido de <https://www.infocampo.com.ar/aplicaciones-del-maiz-en-la-industria-alimentaria/>.
- Jackson DS (1992) G92-1115 corn quality for industrial uses. Historical materials from University of Nebraska-Lincoln Extension. Paper 748. <http://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/748>.
- Katragadda HR, Fullana AS, Sidhu S, CarbonellBarrachina A A (2010) Emissions of volatile aldehydes from heated cooking oils. *Food Chem* 120:59–65.
- Kawatra A, Sehgal S (2007) Value-added products of maize. Report of the national conference on doubling maize production, IFFCO Foundation, New Delhi, pp 76–85.

- Kim ES, Noh SK, Koo SI (1998) Marginal zinc deficiency lowers the lymphatic absorption of alpha-tocopherol in rats. *J Nutr* 128:265–270
- Kulp K (2000) Handbook of cereal science and technology, 2nd edn. Revised and Expanded, CRC Press, Boca Raton, p 808.
- Kurilich AC, Juvik JA (1999) Quantification of carotenoid and tocopherol antioxidants in *Zea mays*. *J Agric Food Chem* 47:1948–1955.
- Lambert RJ (2001) High-oil corn hybrids. In: Hallauer AR (ed) Specialty corns, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, pp 131–154.
- Lonnerdal B (2002) Phytic acid–trace element (Zn, Cu, Mn) interactions. *Int J Food Sci Tech* 37:749–758.
- Maida JM, Mathers K, Alley CL (2008) Pediatric ophthalmology in the developing world. *Curr Opin Ophthalmol* 19:403–408.
- Mascia P.N.; Troyer, A.F. 1993. Designing rails for the corn processing industry In Program Proceedings of the Corn Utilization & Technology Conference (1998 St. Louis, Missouri) p 123-131.
- Mendoza C, Viteri F, Lonnerdal B, Young KA, Raboy V, Brown KH (1998) Effect of genetically modified, lowphytic acid maize on absorption of iron from tortillas. *Am J Clin Nutr* 68:1123–1127.
- Menkir A (2008) Genetic variation for grain mineral content in tropical-adapted maize inbred lines. *Food Chem* 110:454–464.
- Mertz ET, Bates LS, Nelson OE (1964) Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science* 145:279–280.
- Moreno YS, Hernandez DR, Velazquez AD (2005) Extraction and use of pigments from maize grains (*Zea mays* L.) as colorants in yogurt. *Arch Latinoam Nutr* 55:293–298
- Mosera, S., Jampatongb, B., Stampa, P (2005) Composición mineral de los granos de variedades de maíz tropical afectada por la sequía preantesis y la tasa de fertilización con nitrógeno. *Crop Sci* 45:516–523.

- Motto M, Hartings H, Laura M, Rossi V (2005) Gene discovery to improve quality related traits in maize. In: Tuberosa R, Phillips RL, Gale M(eds) Proceedings of the international congress “In the wake of double helix: from the green revolution to the gene revolution”, Avena media, Bologna, pp 173–192, 27–31 May 2005.
- Nelson O, Pan D (1995) Starch synthesis in maize endosperms. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol* 46:475–496.
- Oelofse A, Van Raaij JM, Benade AJ, Dhansay MA, Tolboom JJ, Hautvast JG (2002) Disadvantaged black and coloured infants in two urban communities in the Western Cape, South Africa differ in micronutrient status. *Public Health Nutr* 5:289–294.
- Otsuka, K., and Muraoka, R. (2017). A green revolution for sub-Saharan Africa: past failures and future prospects. *J. Afr. Econ.* 26, 73–98. doi: 10.1093/jae/ejx010.
- Palafox NA, Gamble MV, Dancheck B, Ricks MO, Briand K, Semba RD (2003) Vitamin A deficiency, iron deficiency, and anemia among preschool children in the Republic of the Marshall Islands. *Nutrition* 19:405–408.
- Pathak P, Singh P, Kapil U, Raghuvanshi RS (2003) Prevalence of iron, vitamin A, and iodine deficiencies amongst adolescent pregnant mothers. *Indian J Pediatr* 70:299–301.
- Pomeranz Y. 1987. *Modern cereal science and technology*. VCH Publishers, Inc. Nueva York, USA. Pág. 29-30.
- Prasanna BM, Vasal SK, Kassahun B, Singh NN (2001) Quality protein maize. *Curr Sci* 81:1308–1319.
- Preetha, P S , Stalin P (2014). Response of Maize to Soil Applied Zinc Fertilizer under Varying Available Zinc Status of Soil. *Indian Journal of Science and Technology*, 7 : 939-944.
- Reardon, T., Echeverria, R., Berdegúe, J., Minten, B., Liverpool-Tasie, S., Tschirley, D., et al. (2019). Rapid transformation of food systems in developing regions: highlighting the role of agricultural research & innovations. *Agric. Syst.* 172, 47–59. doi: 10.1016/j.agsy.2018.01.022.

- Rekha, R., and Singh, P. (2018). Futures trading of maize in India: a tool for price discovery and risk management. *Int. Res. J. Agric. Econ. Stat.* 9, 113–119. doi: 10.15740/HAS/IRJAES/9.1/113-119.
- Rice AL, West KP, Black RE (2004) Vitamin A deficiency. In: Ezzati M, Lopez AD, Rodgers A, Murray CJL (eds) *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors*, vol 1. World Health Organization, Geneva.
- Riley C, Wheatley A, Asemota H (2006) Isolation and Characterization of starch from eight *Dioscorea alata* cultivars grown in Jamaica. *Afr J Biotechnol* 15 (17):1528–1536.
- Sen A, Bergvinson D, Miller S, Atkinson J, Gary FR, Thor AJ (1994) Distribution and microchemical detection of phenolic acids, flavonoids, and phenolic acid amides in maize kernels. *J Agric Food Chem* 42:1879–1883.
- Singh N, Singh J, Kaur L, Sodhi NS, Gill BS (2003) Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. *Food Chem* 81:219–231.
- Topping DI, Clifton PM(2001) Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistant starch and nonstarch polysaccharides. *Physiol Rev* 81:1031–1064.
- Ullah I, Ali M, Farooqi A (2010) Chemical and nutritional properties of some maize (*Zea mays* L.) varieties grown in NWFP, Pakistan. *Pak J Nutr* 9 (11):1113–1117.
- Van Soest PJ, Fadel J, Sniffen CJ (1979) Discount factors for energy and protein in ruminant feeds. In: *Proceedings, Cornell nutrition conference for feed manufacturers*, Ithaca, Cornell University, pp 63–75.
- Vandeputte GE, Vermeylen R, Geeroms J, Delcour JA (2003) Rice starches. III. Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture. *J Cereal Sci* 38:61–68.
- Vasal SK (2000) The quality protein maize story. *Food Nutr Bull* 21:445–450.
- Vikal Y, Chawla JS (2014). Molecular interventions for enhancing the protein quality of maize. In: Chaudhary D et al (eds) *Maize: nutrition dynamics and novel uses*. Springer, Berlin, pp 49–61.

- Watson SA (1987) Structure and composition. In: Watson SA, Ramstad PE (eds) Corn: chemistry and technology. American Association of Cereal Chemists, St Paul, pp 53–82.
- Watson, S.A.; Ramstad, P.E. 1987. Corn Chemistry and technology American Association of Cereal Chemist, Inc. Sí Paul Minnessota, USA 499 p.
- Wilson CM, Shewry PR, Miflin BJ (1981) Maize endosperm proteins compared by sodium dodecyl gel electrophoresis and isoelectric focussing. *Cereal Chem* 58:275–281.
- Yadav, O., Prasanna, B., Yadava, P., Jat, S., Kumar, D., Dhillon, B., et al. (2016). Doubling maize (*Zea mays*) production of India by 2025-challenges and opportunities. *Indian J. Agric. Sci.* 86, 427–434.
- Yang G, Dong Y, Li Y, Wang Q, Shi Q, Zhou Q (2013) Verification of QTL for grain starch content and its genetic correlation with oil content using two connected RIL populations in high oil maize. *PlosOne* 8(1):e53770. doi:10.1371/journal.pone.0053770.
- Yuan Y, Zhang L, Dai Y, Yu J (2007) Physicochemical properties of starch obtained from *Dioscorea nipponica* Makino comparison with other tuber starches. *J Food Eng* 82:436–442.

Capítulo VIII. Maíz Forrajero.

Juan Carlos Gómez Villalva

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-3310-3722>

Fernando Javier Cobos Mora

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-8462-9022>

Hugo Javier Alvarado Álvarez

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0002-4400-5941>

Roberto Carlos Medina Burbano

Universidad Técnica de Babahoyo

<https://orcid.org/0000-0001-5552-0175>

8.1. Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) es una planta C4 que se caracteriza por tener una alta tasa de actividad fotosintética y un alto potencial para producir carbohidratos por unidad de superficie. Fue el primer cereal en ser modificado tecnológicamente para mejorar su cultivo, lo que llevó a una revolución agrícola en muchas partes del mundo. El maíz es el cereal con el mayor rendimiento por hectárea y el segundo en producción total, sólo superado por el trigo. Es considerado de gran importancia económica a nivel mundial, ya sea como alimento humano (uno de los granos más antiguos conocidos), como alimento para el ganado o como fuente de numerosos productos industriales. A nivel mundial en los últimos 5 años, la producción promedio durante este período fue de 900 millones de toneladas (Maizar, 2015).

En los últimos años, la demanda de nuevas formas de energía ha aumentado debido a los altos precios del petróleo, lo que ha llevado a muchos países a exigir el uso de energías renovables como la bioenergía obtenida de cultivos y desechos. Los biocombustibles han experimentado un rápido crecimiento y entre ellos, el etanol que representa el 90% del suministro mundial de biocombustibles líquidos, que se obtiene principalmente de la caña de azúcar y del maíz. Esto ha convertido al maíz además de fuente alimenticia en una de las fuentes de energía renovables más importantes del mundo (Chaudhary *et al.*, 2014).

El maíz es cultivado en una amplia variedad de ambientes y es el cultivo más extendido en el mundo. Se cultiva desde los 58° de latitud norte en Canadá y Rusia hasta los 40° de latitud sur en Argentina y Chile. En cuanto a la altitud, el maíz se cultiva en altitudes medias,

aunque también se puede cultivar debajo del nivel del mar. Según la altitud y el ambiente en el que se cultive, el maíz se clasifica en dos tipos: el maíz tropical, que se cultiva en ambientes cálidos entre la línea ecuatorial y los 30° de latitud sur y norte; y el maíz de zona templada, que se cultiva en climas más fríos a más de 34° de latitud sur y norte. Los maíces que se cultivan entre los 30° y 34° de latitud norte y sur se conocen como maíces subtropicales (Paliwal, 2001).

La economía de la producción ganadera depende en gran medida de la calidad del forraje nutritivo para los animales. La alimentación con forrajes verdes en comparación con los concentrados reduce sustancialmente el costo de producción. Para una óptima producción, se requieren alrededor de 40 kg de forraje verde para alimentar por animal por día. Sin embargo, existe un enorme déficit entre la oferta y la demanda de forraje verde en muchos países. Actualmente, existe alrededor de un 63 % de deficiencia de forraje verde y un 23,5 % de forraje seco (Singh, 2009). Por lo tanto, para satisfacer las necesidades de la población de ganado en constante aumento, es necesario aumentar la producción y la productividad del forraje. Sin embargo, el aumento del cultivo de cereales y cultivos comerciales contribuyó a la disminución de la superficie dedicada al cultivo de forraje. Existe una enorme presión del ganado sobre el total de piensos y forrajes disponibles, ya que la tierra disponible para la producción de forrajes ha ido disminuyendo. Además, los forrajes verdes son ricos y la fuente más barata de carbohidratos, proteínas, vitaminas y minerales para animales lecheros. Por lo tanto, al proporcionar cantidades suficientes de forraje, en lugar de concentrados costosos, a los animales lecheros, el costo de producción de leche puede reducirse considerablemente.

8.2. Origen del maíz

El maíz es un cultivo altamente diverso que tiene su origen en Mesoamérica, específicamente en México y Guatemala. Se cree que proviene de la zona central o sur de México. La mayoría de los genetistas están de acuerdo en que el maíz se deriva del Teosintle (*Zea perennis*), ya que comparten un alto parentesco cromosómico y son aptos para el entrecruzamiento, lo que permite obtener híbridos fértiles entre ellos (Acosta, 2009).

De acuerdo a Farinango (2015), el maíz tendría tres centros de origen:

a) Asiático: se habría originado en Asia, precisamente en la región del Himalaya del cruzamiento entre *Coix spp* y *Andropogóneas*;

b) Andino: Bolivia, Perú y Ecuador son países donde se produjo el cultivo de maíz.

c) Mexicano: El maíz ha estado presente durante muchos años junto a una gran variedad de especies. Los incas lo utilizaban como fuente de alimentación debido a sus propiedades y lo celebraban durante la siembra y cosecha. Según la historia, los campesinos han logrado conservar y mejorar las características del maíz, incluyendo su color, forma, tamaño y variedades, dependiendo de las condiciones agroecológicas del lugar donde se cultiva (Ortega (2014)).

8.3. Clasificación taxonómica del maíz

Según Ortega (2014), el maíz tiene la siguiente clasificación taxonómica:

Reino: Plantae

División: Magnoliophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales´

Familia: Poaceae

Subfamilia: Panicoideae

Tribu: Andropogoneae

Género: *Zea*

Especie: *Zea mays* L

Morfología del maíz

Raíz. Puede alcanzar hasta 2 m de profundidad y extenderse en un diámetro de 1.2 m, dependiendo este desarrollo de las condiciones de cultivo. Según su apareamiento y estructura se reconocen tres clases de raíces:

- Raíces germinativas o temporales
- Raíces permanentes; que nutren a la planta (INIAP, 2011)

Tallo. El tallo lo constituye una caña maciza de altura variable, provisto de varios nudos, sin ramificación lateral (INIAP, 2011)

Hojas. Las hojas son lineales, con nervadura paralela, y están formadas por una vaina, cuello y la lámina foliar. Crecen en la parte superior de los nudos y tienen pubescencia. Tienen un borde liso y una punta afilada, y pueden medir más de un metro de largo (Caibor, 2016)

Flor. El maíz es una planta monoica, es decir, con flores de diferentes géneros en el mismo individuo. La inflorescencia masculina, conocida como panícula, panoja o espiga, se encuentra en la punta de la planta y está compuesta por un eje central llamado raquis y ramas laterales. A lo largo del eje central se encuentran los pares de espiguillas, dispuestos de forma política, mientras que en las ramas se encuentran en arreglo dístico. Cada espiguilla está protegida por dos brácteas o glumas, que a su vez contienen las flores apareadas. Cada florecilla tiene tres estambres que producen granos de polen (Perrin, 2018).

En promedio, una antera produce alrededor de 2.800 granos de polen. Si se considera una sola planta, podría producir aproximadamente 5 millones de granos de polen. Las inflorescencias femeninas, llamadas mazorcas, se encuentran en las yemas axilares de las hojas. Son espigas cilíndricas compuestas por un raquis central llamado olote, en el que se insertan las espiguillas de forma paralela. Cada espiguilla tiene dos flores pistiladas, una fértil y otra abortiva. Las flores pistiladas tienen un ovario único con un pedicelo unido al raquis, y un estilo largo y estigmático donde germina el polen. La autopolinización ocurre en un 2-5% de los casos, mientras que en el 95-98% restante se da la polinización cruzada (Perrin & Jock, 2018).

Fruto. En la mazorca, cada semilla o grano es un fruto independiente llamado cariósipide, que se inserta en el raquis cilíndrico o olote. La cantidad de granos producidos por mazorca está limitada por el número de hileras y granos por hilera en la mazorca. El número de líneas por mazorca varía entre 10 y 25, mientras que el número de granos por línea puede variar de 18 a 42. Por lo tanto, hay una gran variedad de granos por mazorca dependiendo de la variedad cultivada (INIAP, 2011).

8.4. Plantas con metabolismo C4

El maíz es una planta de origen templado con un alto potencial de rendimiento debido a su alta tasa de fotosíntesis, que puede llegar hasta los 50-60 mg de CO²/dm²/h. Esta planta es conocida por ser muy productiva, ya que una sola semilla puede producir de 600 a 1,000 granos. Además, el maíz se distingue de otros cultivos por su concentración de anhídrido carbónico, su apertura estomática y su eficiente uso del agua. Esto se debe a que el maíz es

una planta de las llamadas C4, ya que su producto primario es la fijación del carbono en ácidos dicarboxílicos con una estructura de cuatro carbonos. Su temperatura óptima se encuentra cerca de los 25-30°C (Reta *et al.*, 2002).

El proceso fotosintético C4 del maíz le permite tener una respuesta continua al aumento de la radiación hasta la luz completa con bajos niveles de foto-respiración, lo que lo hace muy adecuado para altas temperaturas y altas intensidades de luz en las zonas tropicales. Otros factores ambientales que afectan la eficiencia de conversión (EC) del maíz son el agua y la disponibilidad de nutrientes. Las tasas máximas de fotosíntesis del maíz tropical se encuentran entre 30° y 40°C (Reta *et al.*, 2002).

La temperatura tiene un efecto relativamente pequeño en la eficiencia de conversión (EC) del maíz dentro del rango de 20° a 40°C, pero temperaturas fuera de este rango de adaptación del cultivar (por debajo de 15°C o por encima de 44°C para el maíz tropical de tierras bajas) también pueden reducir la EC. Un cultivo de maíz sin estrés sembrado a altas densidades puede interceptar alrededor del 55% de la radiación total recibida durante el período de cultivo. Se han informado eficiencias de conversión para cultivos de maíz sin estrés que van desde 1,2 a 1,6 gramos de biomasa (INTAGRI, 2018).

Al igual que otras plantas, el maíz tiende a mantener un equilibrio funcional entre la masa de raíces (debajo del suelo) y la masa verde de tallos y hojas (sobre el suelo). Si un recurso del suelo como el agua o los nutrientes es limitante, más materias asimiladas se trasladarán al sistema radical y el crecimiento de las raíces será favorecido en comparación con el crecimiento del resto de la planta. Si la radiación es el factor limitante del crecimiento debido a la sombra o la nubosidad, más materias asimiladas se dedican al crecimiento de la parte aérea y la relación raíz-tallo disminuye (Reta *et al.*, 2002).

8.5. Fenología del cultivo de maíz

El desarrollo del maíz incluye una serie de fases o etapas que corresponden al crecimiento de nuevos órganos. Este proceso comienza con la germinación de la semilla y termina con la formación del fruto y se divide en dos etapas: el crecimiento vegetativo (V) y el crecimiento reproductivo (R) (Zambrano, 2018).

De acuerdo a Zambrano (2018), las etapas de crecimiento pueden agruparse en cuatro grandes períodos, según muestra la Tabla 1:

Tabla 1. Etapas de crecimiento del maíz.

Etapas	Días	Características
VE	5	El coleóptilo emerge en la superficie del suelo
VI	9	Es visible el cuello de la primera hoja de la planta
V2	12	Es visible el cuello de la segunda hoja
Vn		Es visible el cuello de la hoja número “n” (es igual al número definitivo de hojas que tiene la planta, fluctúa entre 16 y 22. En la floración se habrán perdido las 4 a 5 hojas de más abajo)
VT	55	Es completamente visible la última de la panoja
RO	57	Antesis o floración masculina, el polen se comienza a arrojar, son visibles los estigma
R1	59	Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se puede
R2	71	ver el embrión
R3	80	Etapa lechosa
R4	90	Etapa masosa, el embrión tiene aproximadamente la mitad del ancho del grano
R5	102	Etapa dentada, la parte superior de los granos se llena con almidón sólido y cuando el genotipo es dentado, en los tipos tanto cristalinos como dentados es visible una “línea de leche” cuando se observa el grano desde el costado
R6	112	Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano. La humedad del grano es generalmente de alrededor del 35%.

Fuente: Oñate, (2016)

Las etapas de crecimiento, de acuerdo a Intagri (2017) son:

Fase vegetativa: Este período comienza cuando se siembra y termina justo antes de que aparezcan las estructuras reproductivas de la planta. Durante esta etapa, cualquier daño al follaje o a las raíces es muy grave y pone en peligro la supervivencia de las plántulas. En esta fase, la mayor parte de la energía de la planta se utiliza para formar follaje, lo que hace que la planta tenga cierta tolerancia a la pérdida de follaje debido a los ataques de plagas.

Fase reproductiva: Esta fase comienza cuando se puede ver la espiga del maíz y termina cuando el cultivo alcanza su madurez fisiológica. Durante esta etapa, se presentan plagas como el picudo, la araña roja y el gusano elotero. La presencia de plagas durante el crecimiento vegetativo del maíz tiene un impacto en la fase reproductiva de la planta, lo que puede llevar a grandes pérdidas en el rendimiento debido a la disminución del suministro de fotosintatos para el crecimiento de los granos.

8.6. Maíz como forraje

El maíz (*Zea mays*) es uno de los cultivos más importantes que tiene una mayor adaptabilidad a diversas condiciones agroclimáticas. En Ecuador, es el tercer cultivo alimentario más importante después del arroz y el trigo. Es el cultivo de mayor productividad por día. La producción de maíz en Ecuador es aproximadamente 500000 ha, siendo el único cultivo sembrado por todo el territorio nacional. Para el 2018 la superficie sembrada de maíz duro y seco a nivel nacional fue 383 399 ha, concentrándose en la provincia de Los Ríos 45.4 %3 (INEC, 2018). También es un cultivo excelente en términos de producción de biomasa. Dado que la producción y la productividad del maíz están aumentando, la disponibilidad de biomasa a partir del maíz también está aumentando en la misma magnitud. La paja de maíz se ha utilizado como alimento para animales desde hace mucho tiempo. La calidad forrajera del maíz verde se considera mejor entre los cultivos forrajeros no leguminosos. El maíz se considera forraje ideal porque crece rápidamente, produce altos rendimientos, es sabroso, rico en nutrientes y ayuda a aumentar el peso corporal y la calidad de la leche en el ganado (Sattar *et al.*, 1994). Como forraje para el ganado, el maíz es excelente, altamente nutritivo y sostenible (Iqbal *et al.*, 2006).

El maíz es un producto versátil que se utiliza en una amplia variedad de formas, como cereal, grano, alimento para animales y en procesos industriales. Según un estudio, el 66% de la cosecha de maíz es destinada a la alimentación animal, el 20% es consumido directamente, el 8% se utiliza en la industria para producir alimentos y otros productos y el 6% se usa como semilla o se pierde. Además, el maíz es un alimento esencial debido a su alto contenido calórico y proteico y se utiliza tanto en la alimentación humana como en la producción de forraje, ensilaje y harina en la industria (Blanco, 2017).

Los forrajes verdes son el componente más importante en la cría de animales, ya que proporcionan alimento económico y nutritivo para el ganado. La economía de la producción de leche depende principalmente de la disponibilidad de forrajes verdes nutritivos. El maíz está clasificado como uno de los mejores forrajes no leguminosos. Se considera forraje ideal porque crece rápidamente, produce alta biomasa, es palatable, rico en nutrientes y ayuda a aumentar el peso corporal y la calidad de la leche en el ganado. Como forraje para el ganado, el maíz es una fuente excelente, altamente nutritiva y sostenible (Iqbal *et al.*, 2006). Además, el maíz se cultiva durante todo el año y también está libre de componentes anti-calidad. Contiene altas concentraciones de proteínas y minerales y posee una alta digestibilidad

(Gupta *et al.*, 2004). Es una planta alta y frondosa que tiene rendimientos de biomasa del orden de 400–500 q/ha. El maíz verde es rico en proteínas y posee cantidades suficientes de azúcares solubles necesarios para un ensilaje adecuado. El maíz de especialidad, como el maíz dulce y el maíz enano, tiene un doble propósito, ya que proporciona forraje junto con el maíz para propósitos especiales. El maíz también posee excelentes características de ensilaje ya que contiene cantidades suficientes de azúcares solubles necesarios para una fermentación adecuada (Allen *et al.*, 2003). En un estudio reciente realizado en la Dirección de Investigación de Maíz, se produjo un excelente ensilaje a partir de tallos de maíz tierno (después de la cosecha de maíz tierno) después de 45 días de ensilaje (datos no publicados).

8.7. Forrajes Verdes

La producción de forraje verde es la actividad más desafiante en la industria láctea. No solo reduce el costo de la alimentación, sino que también mantiene a los animales saludables, reduce las deficiencias de micronutrientes y aumenta la producción de leche. Los forrajes suelen contener concentraciones relativamente altas de celulosa, hemicelulosas y lignina, así como cantidades variables de proteínas y carbohidratos no fibrosos. Los animales lecheros obtienen nutrientes, es decir, energía, proteína, fibra, minerales, vitaminas y agua de los forrajes para el mantenimiento de su organismo y un rendimiento óptimo. Hay muchas variedades de forrajes de leguminosas y no leguminosas disponibles para el cultivo. Las características ideales de las buenas variedades de forraje son corta duración, alto potencial de biomasa, forraje nutritivo y sabroso, idoneidad para la conservación y concentraciones insignificantes de componentes antinutricionales. Los forrajes verdes se pueden dividir ampliamente en dos categorías, a saber, leguminosas y no leguminosas (Chaudhary *et al.*, 2014).

8.8. Calidad del forraje

La calidad del forraje se define de varias maneras, pero a menudo no se comprende bien. Aunque importante, la calidad de la edad a menudo recibe mucha menos consideración de la que merece. La calidad del forraje se puede definir como la medida en que el forraje tiene el potencial para producir una respuesta animal deseada. La nutrición animal adecuada es esencial para altas tasas de ganancia, amplia producción de leche, reproducción eficiente y ganancias adecuadas. Sin embargo, la calidad del forraje varía mucho entre y dentro de los cultivos forrajeros. El análisis del contenido de nutrientes de los forrajes puede ser útil para

determinar si la calidad es adecuada y guiar la suplementación adecuada de la ración. En los últimos años, los avances en la cría de plantas y animales, la introducción de nuevos productos y el desarrollo de nuevos enfoques de gestión han hecho posible aumentar el rendimiento animal. Sin embargo, para que esto se realice, debe haber un enfoque adicional en la calidad del forraje. Muchos factores influyen en la calidad del forraje. Algunos de estos incluyen la palatabilidad (si los animales comen el forraje), el consumo (cuánto comerá el animal), la digestibilidad (la medida en que el forraje se absorbe a medida que pasa por el tracto digestivo de un animal), el contenido de nutrientes, anti-calidad componentes (taninos, nitratos, alcaloides, cianoglucósidos, oxalatos, estrógenos y micotoxinas), y por último el rendimiento animal, que es la prueba definitiva de la calidad del forraje (Chaudhary *et al.*, 2014).

8.9. Calidad forrajera del maíz

Las características deseables del forraje incluyen alto rendimiento de materia seca, alta concentración de proteína, alta concentración de energía (alta digestibilidad), alto potencial de consumo (bajo contenido de fibra) y concentración óptima de materia seca en la cosecha para una fermentación aceptable del forraje (Carter *et al.*, 1991). El maíz es un cultivo forrajero ideal ya que es de crecimiento rápido, alto rendimiento, apetecible y nutritivo. Entre los forrajes no leguminosos cultivados, el maíz es el cultivo más importante que se puede producir durante todo el año en condiciones de riego. Está libre de cualquier componente antinutricional y se considera un valioso cultivo forrajero. Contiene altas concentraciones de proteínas y minerales y posee alta digestibilidad (Chaudhary *et al.*, 2014).

8.10. Ensilado de Maíz

La conservación de forrajes es un elemento clave para las explotaciones ganaderas de rumiantes productivas y eficientes. Eso permite un mejor suministro de alimento de calidad cuando la producción de forraje es baja o inactiva. La conservación de forrajes también proporciona a los agricultores un medio para conservar el forraje cuando la producción es limitada y más rápida que su adecuada utilización por parte de los animales de pastoreo. Esto evita que el crecimiento exuberante se vuelva demasiado maduro. En consecuencia, la conservación del forraje proporciona un nivel más uniforme de forraje de alta calidad para los rumiantes. El ensilaje tiene muchas ventajas sobre los otros métodos para la conservación

de nutrientes, particularmente de forrajes. El ensilaje es el material producido por la fermentación controlada de nutrientes bajo condiciones anaeróbicas. condición. El proceso de fermentación se rige por los microorganismos presentes en la hierba fresca para mantener las condiciones anaeróbicas y desalentar el crecimiento de clostridios con una pérdida mínima de nutrientes (Chaudhary *et al.*, 2014).

El maíz es un cultivo excelente para ensilar, posee alto valor energético. Para una fermentación adecuada, el cultivo debe poseer cantidades suficientes de humedad y carbohidratos solubles que se convierten en ácido láctico durante el proceso de fermentación. El maíz cultivado con fines de forraje verde y maíz tierno posee la humedad y los azúcares solubles necesarios y por lo tanto, es el más adecuado para el ensilado. El ensilaje de maíz está adquiriendo más importancia en las raciones de leche. El maíz es valorado por su alto rendimiento y capacidad para hacer un excelente ensilaje y se puede cosechar en una sola operación sin pérdida significativa de hojas. Las vacas alimentadas con ensilaje de maíz produjeron más leche y consumieron más materia seca del ensilado en ambos ensayos que aquellas alimentadas con ensilaje de sorgo. El ensilaje de maíz se utiliza ampliamente para las vacas lecheras lactantes que requieren alimentación de alta energía para la máxima producción de leche (Marsalis *et al.*, 2010).

8.11. Valor nutricional

La calidad nutricional en un ensilado depende de su valor nutritivo, que está relacionado directamente a su composición química y de la calidad de conservación que viene definida por los productos finales de la fase de fermentación (Mier y Monroy, 2017).

Almidón: El almidón es el principal componente químico del maíz y representa un 72% del peso del grano. También contiene otros carbohidratos, como glucosa, sacarosa y fructuosa, en cantidades que varían entre el 1% y el 3% del grano. (David, 2008).

El contenido de almidón en los granos varía desde 45% en avena a 72% en maíz (base materia seca). En cambio, en los forrajes el almidón varía de < 15% en la alfalfa a valores como 35% en ensilaje de maíz. Por otro lado, la fermentación del almidón en el rumen es extremadamente variable, con un margen que va desde <50% a > 90%., lo cual es función del tiempo de retención de las partículas que permanecen en el rumen (Demagnet, 2014).

El almidón es muy importante para la nutrición de las vacas lecheras, especialmente para aquellas de alta producción. Pertenece a la fracción nutricional de los alimentos conocida

como Carbohidratos No Fibrosos (CNF), junto con los azúcares simples, fibra soluble (pectinas) y β - glucanos, por otro lado, es el almidón la fracción más importante de este grupo de nutrientes. A medida que el contenido de almidón aumenta en la dieta y, por ende, el contenido de fibra baja en ella, el consumo de materia seca también aumenta. No obstante, se debe tener en cuenta un límite máximo de almidón que permita mantener un rumen saludable (Demagnet, 2014).

Materia seca. En general, el maíz forrajero suele tener una concentración de materia seca que va de 30% a 45%. Se ha demostrado que el rendimiento total de materia seca proviene principalmente de las mazorcas, que aportan un 60%, y de las hojas y tallos, que aportan un 35% (Cabrales *et al.*, 2007).

Proteína cruda. Según estudios, las concentraciones óptimas de proteína cruda en maíz forrajero deben mantenerse en un rango de 7% a 14% para satisfacer las necesidades proteicas de los animales (Elizondo, 2017). Se sabe que el aporte de proteína del maíz forrajero es bajo cuando se cosecha en estadios de madurez avanzada debido a que, a medida que avanza la madurez, la proteína disminuye hasta alcanzar un punto de estabilización alrededor del 8% en el estadio de grano lechoso (Soto *et al.*, 2004).

Fibra cruda. Se ha reportado que los porcentajes de fibra bruta en el maíz forrajero, generalmente, oscilan entre 20% y 35% en estado fermentativo. En las variedades de maíz que no se ensilan, los porcentajes de fibra cruda en base seca varían desde el 33% al 51%. El ensilaje de maíz es característico por su alto aporte de energía metabolizable debido al contenido de carbohidratos solubles, principalmente en la mazorca. Estos niveles de carbohidratos permiten obtener un forraje de alto valor energético. Se espera que la energía metabolizable de los híbridos de maíz al momento de la cosecha sea superior a 2,7 Mcal/kg (Callacná *et al.*, 2014). Además, Klein (1988) reporta valores de energía metabolizable de 2,56 Mcal/kg MS para la planta entera y de 3,15 Mcal/kg MS en mazorcas en estado de grano pastoso a duro.

Extracto etéreo. Las hojas y tallos de maíz tienen concentraciones de extracto etéreo que oscilan entre 3% y 8% y dependen del ecotipo y la agrotécnica del cultivo (Gómez *et al.*, 2015). El forraje de maíz aporta grandes cantidades de grasas y ácidos grasos a la dieta de los rumiantes (Harfoot y Hazlewood, 1988). Los forrajes contienen lípidos en forma de ácidos grasos poliinsaturados esterificados y su concentración no supera el 1,5% de la

materia seca, mientras que las grasas libres se utilizan con mayor frecuencia en el engorde bovino, ya que se obtienen de varias fuentes de grasa (Plascencia *et al.*, 2005).

Cenizas. Las cenizas encontradas en el maíz tienen concentraciones superiores al 20% en hojas y cercanas al 13% en tallos (Elizondo, 2017), pero Vargas (2008) indica que la planta de maíz tiene una concentración mínima de cenizas del 2% durante las etapas de crecimiento vegetativo. La ceniza es el residuo que queda después de la incineración de la materia orgánica, y también está compuesta de minerales y contaminantes inorgánicos (García *et al.*, 2019). Sin embargo, el alto porcentaje de cenizas diluye la digestibilidad debido a la gran cantidad de minerales que contienen (Bragachini *et al.*, 2011).

Minerales: El germen provee un 78% de todos los minerales del grano, por el cual el mineral más abundante es el fósforo (David, 2008).

Vitaminas: El germen del maíz contiene dos vitaminas solubles en grasa: la provitamina A (carotenoide) y la vitamina E. Las vitaminas solubles en agua se encuentran en la cáscara del grano de maíz, como la tiamina y la riboflavina (David, 2008).

Fibra detergente neutro (FDN): Es la porción del alimento que es estimulado por la masticación del animal (Bragachini *et al.*, 2011).

La FDN es la ración de una muestra insoluble al detergente neutro, que está principalmente compuesta de lignina, hemicelulosa, celulosa y sílice, también conocida como pared celular. Se cree que a medida que aumenta la FDN, disminuye el consumo de MS (Agritotal, 2015).

Fibra detergente: La FDA está compuesta por celulosa, lignina y otros componentes como nitrógeno y minerales. Su importancia radica en su digestibilidad, y también contiene cenizas y compuestos nitrogenados (Bragachini *et al.*, 2011).

Lignina: La lignina es un componente del maíz que puede tener un impacto negativo en la disponibilidad nutricional de la FDN. Además, obstaculiza la digestión de los polisacáridos de la pared celular debido a que actúa como barrera protectora para las enzimas microbianas (Francesa, 2017).

8.12. Uso de maíz forrajero en Ecuador

En Ecuador, el maíz se cultiva tanto para el consumo propio como para el mercado interno del país. Entre los tipos de maíz cultivados se encuentran el amarillo harinoso, el blanco

harinoso y el blanco amorochado. La mayor parte de la producción de maíz es de tipo amarillo duro, principalmente destinada a la agroindustria, especialmente para la alimentación de aves. Los agricultores suelen utilizar semillas híbridas y variedades mejoradas de alto rendimiento para obtener buenos resultados (Peñaherrera, 2011). En los últimos años, el uso del maíz como ensilaje para alimentar el ganado ha estado creciendo.

El maíz es una excelente opción para utilizar como ensilaje debido a su alto potencial de producción de materia seca y a su alta concentración energética, además de ser muy apetecible para los animales. Esto permite cubrir el déficit forrajero durante todo el año, lo que a su vez permite mantener la carga animal (Salinas, 2011). Uno de los principales beneficios de utilizar el maíz como ensilaje es que no requiere ningún tipo de tratamiento previo al proceso de ensilado, ya que tiene excelentes características para ser cortado directamente. Además, su cosecha es rápida y sus costos de acaparamiento son bajos. El ensilaje de maíz también se destaca por tener un alto contenido de materia seca en forma de grano, entre el 40% y el 50% (Romero y Aronna, 2004).

El ensilado es un proceso de conservación del forraje húmedo que permite mantener su valor nutritivo durante el almacenamiento. En las ganaderías modernas, se cortan los forrajes en la etapa en la que su rendimiento y su valor nutritivo son máximos y se ensilan para garantizar un suministro constante de alimento durante todo el año (Garcés, 2010). El ensilado permite la conservación de forrajes con alto contenido de humedad que se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas. Este proceso permite mantener la calidad nutritiva del forraje en un 90%, protegiéndolo del aire, la luz y la humedad externa. El ensilaje permite el uso inmediato del forraje con pérdidas mínimas de nutrientes y sin alterar su palatabilidad para los animales, sin producir sustancias tóxicas que puedan afectar su salud. (Macay, 2015). El uso de ensilaje de lo utiliza como balance proteico en la dieta para cubrir las necesidades de alimento que requiere el ganado.

Con el avance de la tecnología, es posible obtener mejores rendimientos de maíz, que pueden alcanzar entre 50 y 60 toneladas por hectárea en épocas de sequía, lo que resulta muy rentable para los agricultores. Cuando se realiza el corte del maíz de manera adecuada, su concentración de energía es de 2,45 Mcal EM/Kg MS, que proviene del almidón, el grano y la fibra (Santini, 2013).

8.13. Metodología de Ensilaje

El ensilaje es un proceso para conservar el forraje, que luego se utiliza como un subproducto agroindustrial con un alto contenido de humedad entre el 60% y el 70%. Este proceso de conservación se basa en la compresión del forraje, la eliminación del aire y la fermentación en un ambiente anaeróbico, lo que permite el crecimiento de bacterias que ayudan a acidificar el forraje (Wagner *et al.*, 2016). El ensilaje de maíz tiene en el proceso los siguientes pasos:

a) Cosecha o corte para ensilaje: El maíz está influenciado por su entorno y debe tener un porcentaje adecuado de materia seca entre el 30% y el 35%. Si el porcentaje es menor, no habrá acumulado suficientes carbohidratos y habrá problemas al almacenarlo en el silo. Si el porcentaje es mayor, habrá madurado demasiado y afectará la calidad y la digestibilidad del maíz. Se recomienda realizar el corte del maíz alrededor de los 80 y 90 días después de la siembra (Linares, 2016).

Si se corta el maíz en buen estado, se obtendrá un 30-35% de materia seca y un 75% de humedad, lo que permite obtener una mayor cantidad de forraje de alta calidad. Sin embargo, si se realiza un corte tardío, el porcentaje de materia seca puede aumentar hasta el 60%, lo que indica una calidad inferior en el forraje y un deterioro en sus tallos y hojas (Méndez, 2017).

b) Tamaño y uniformidad del picado para un buen silo: Para aprovechar al máximo el forraje, es importante picarlo adecuadamente en trozos de aproximadamente 1,5 cm, con el grano bien dividido y un 7-12% de partículas de más de 2,5 cm, pero nunca mayores a 8-10 cm, ya que los animales pueden mostrar preferencia por ciertos trozos en los comedores (Cattani *et al.*, 2010).

El tamaño del ensilado es muy importante para aprovecharlo como forraje, ya que las partículas deben tener un tamaño de 6 a 12 mm para eliminar el oxígeno de manera más eficiente en comparación con los trozos más gruesos (Romero y Aronna, 2004). Es importante que el tamaño del picado tenga un 50% de masa con partículas de 2 a 0,8 cm. El volumen del picado es importante porque facilita la disponibilidad de los carbohidratos fermentados del forraje, lo que a su vez facilita la compactación y aumenta el peso del animal. Si el picado es demasiado grande, dificulta aún más la compactación, lo que deja

más oxígeno en el forraje y aumenta la temperatura, lo que a su vez provoca una mala fermentación y un forraje de mala calidad (Piñeiro, 2006).

c) Enfundado: si se utilizan fundas para el ensilaje, es esencial que la bolsa quede herméticamente sellada, ya que cualquier entrada de aire iniciaría procesos de fermentación y acidificación que llevarían al desarrollo de hongos y bacterias en el ensilado. Se recomienda utilizar bolsas gruesas de calibre No. 3 para garantizar una mejor entrada de humedad en forma de vapor. Con esto, se puede garantizar que al cabo de 30 días de ensilado, el material se almacenará durante muchos años sin perder su valor nutritivo (Lino, 2014).

d) Uso de máquina para ensilar: La máquina para ensilar debe tener una potencia de 510 HP (que es la potencia media de las picadoras comercializadas en Argentina en la actualidad), está equipada con un cabezal rotativo de 6 metros de ancho de corte y tiene un rendimiento de 130-150 toneladas de materia verde por hora, lo que equivale al rendimiento promedio de un cultivo de 30 toneladas de materia verde por hectárea (sorgo-maíz). Su capacidad de trabajo en la superficie es de 4-5 hectáreas por hora (Montecor, 2017).

Ensiladora Manual EM-4: Este tipo de ensiladora es ideal para empacar y almacenar el forraje de manera sencilla y económica, con un alto rendimiento y facilidad de uso. Además, es fácil de operar y su bajo peso mejora el ensilaje del forraje.

e) Almacenamiento del ensilado: El almacenamiento de granos secos, sanos y limpios consiste en mantener los granos libres de impurezas para evitar el ataque de hongos, bacterias, insectos y ácaros y minimizar el daño. Si se guardan sin alteraciones físicas y fisiológicas, los granos mantienen sus sistemas de conservación durante el almacenamiento. (Casini, 2009).

Es importante controlar el almacenamiento del maíz para la alimentación de los animales para asegurar su calidad en el interior del silo. El almacenamiento seguro del grano generalmente se realiza en condiciones óptimas con una humedad del 13% y una temperatura de 15°C (Álvarez, 2016).

Tabla 2. Proceso de ensilaje.

Etapa 1: Fermentación aeróbica	Empieza en el picado y almacenado del maíz
Etapa 2: Fermentación anaeróbica	Eliminación de oxígeno en el proceso de conservación esta fase dura 1-2 días
Etapa 3: Fermentación anaeróbica	Produce ácido láctico a partir de materia orgánica ensilada, el pH baja hasta llegar 4,0 duración 14 días
Etapa 4: Estabilidad del ensilado y suministro a las vacas	Fase final donde el ensilado necesita reposar y estabilizarse

Fuente: Monsanto, (2017)

8.14. Calidad del ensilaje

La calidad del ensilaje está determinada principalmente por el estado físico, es decir, el color y el olor. El ensilaje de buena calidad debe ser de color marrón claro y tener olor a vinagre. El ensilado mal fermentado tendrá un color oscuro y mal olor debido a la producción de ácido butírico. Químicamente debe tener las siguientes características: (i) pH inferior a 4,2 (ii) nitrógeno amoniacal de N total, menos del 10 % del N total; (iii) ácido butírico, menos del 0,2 %; y (iv) ácido láctico 3–12 % (Chaudhary *et al.*, 2014). Los productos finales de la fermentación del ensilaje a menudo se monitorean para evaluar la calidad del ensilaje, y la composición de los “ensilajes normales” se presenta en la Tabla 3.

Por lo tanto, se puede concluir que el maíz es un excelente cultivo que podría utilizarse efectivamente como alimento para animales. El maíz desempeña un papel importante en la perspectiva socioeconómica de la población rural, ya que su cultivo cumple el doble propósito de la agricultura y la ganadería. El ensilaje de maíz podría ser de gran ayuda para reducir la escasez de forraje verde y proporcionar un impulso muy deseado al sector lácteo.

Tabla 3. Productos finales comunes de la fermentación del ensilado.

Artículo	Positivo 0 negativo	Comportamiento)
PH	+	El pH bajo inhibe la actividad bacteriana
Ácido láctico	+	Inhibe la actividad bacteriana al bajar el pH
Ácido acético	—	Asociado con fermentaciones indeseables
	+	Inhibe las levaduras responsables del deterioro aeróbico

Ácido butírico	—	Asociado con la degradación de proteínas, formación de toxinas y grandes pérdidas de MS y energía
Etanol	—	Indicador de fermentación de levadura no deseada y altas pérdidas de MS
Amoníaco	—	Los niveles altos indican una descomposición excesiva de proteínas
Nitrógeno insoluble en detergente ácido (ADIN)	—	Los niveles altos indican proteínas dañadas por el calor y bajo contenido de energía.

Fuente: Chaudhary *et al.*, (2014)

8.15. Costo de producción de maíz ensilado

En Ecuador, no existen muchos registros precisos sobre la producción de maíz ensilado. Sin embargo, muchos investigadores y productores tienen valores estimados basados en factores como el clima, la época de siembra, el presupuesto y el tipo de tecnificación utilizada en la hacienda. La producción de maíz para forraje se maneja de manera similar a la producción de maíz para choclo, aunque los costos pueden variar. Según los datos del INIAP (2010), el costo promedio de producción de maíz para choclo en Cuenca es de \$1,796.91/ha. En la zona tropical, el costo promedio de producción es de \$822.00, con una cosecha entre los 68 y 69 días o entre los 84 y 85 días (Macay, 2015).

Los rendimientos de los híbridos de maíz pueden variar dependiendo del uso para el que se destinen, ya sea para forraje o para grano. Algunos híbridos de maíz para forraje verde pueden tener rendimientos de hasta 50 toneladas por hectárea, mientras que la producción destinada para grano tiene una media de 5,2 toneladas por hectárea (Gaytán *et al.*, 2009).

Para obtener un buen maíz para ensilaje es necesario que tenga un contenido de materia seca entre el 35% y el 38%, ya que esto aumentaría la producción por hectárea y reduciría los costos. Además, esto contribuiría a aumentar la energía metabolizable del maíz, que es aprovechada en la alimentación del ganado vacuno (Cattani, 2009). En Ecuador, los ganaderos suelen pagar entre \$4.00 y \$5.50 por 45 kilogramos de forraje aproximadamente. Estos valores se dan en las provincias de Zamora, Loja y El Oro. Por una tonelada métrica de forraje, el valor suele estar alrededor de \$55.00 dólares. (El Mercurio, 2013).

8.16. Clima y suelo

Suelo. El maíz puede crecer en una amplia variedad de suelos, siempre y cuando se utilicen los cultivares y técnicas de cultivo adecuados. Los suelos más adecuados para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con alta capacidad de retención de agua. El maíz, en general, crece bien en suelos con pH entre 5,5 y 7,8, pero fuera de este rango puede haber toxicidad o carencia de ciertos elementos debido a la disponibilidad reducida de ellos. Si el pH es inferior a 5,5, puede haber problemas de toxicidad por aluminio y manganeso, además de carencia de fósforo y magnesio. Si el pH es superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos), puede haber carencia de hierro, manganeso y zinc. Los síntomas en el campo de un pH inadecuado, en general, se asemejan a los problemas de micro nutrientes (Deras, 2012).

Temperatura. La temperatura es uno de los principales factores que afecta el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz y tiene un impacto en los diferentes estadios fenológicos. El aumento de la temperatura ambiental favorece el crecimiento y desarrollo ontogénico de la planta, siempre y cuando no sobrepase la temperatura óptima (Granados y Sarabia, 2013). El aumento de la temperatura acelera la respiración celular en la planta de maíz, y la respiración de mantenimiento proporciona energía a los procesos que no contribuyen directamente al aumento de biomasa y peso de la planta. La fotosíntesis y la respiración son lentas a temperaturas más bajas y aumentan a medida que se incrementa la temperatura, pero disminuyen cuando la temperatura sube demasiado (Lutt *et al.*, 2019).

El desarrollo fenológico del cultivo de maíz depende de la temperatura y del fotoperíodo (Andrade, 1992). La acumulación térmica se mide en unidades calor y permite determinar la duración del ciclo de desarrollo (Ruiz *et al.*, 1998). Es importante conocer la oferta térmica del lugar donde se establece el cultivo para poder tomar medidas que permitan completar el ciclo de desarrollo del cultivo, lo que incluye la selección de ecotipos con requerimientos térmicos específicos en función de la disponibilidad térmica del lugar (Arista *et al.*, 2018).

La acumulación de biomasa en las plantas es una característica genética que es fácilmente afectada por los factores ambientales y su interacción (Manrique y Bartholomew, 1991). La distribución de biomasa entre los diferentes órganos de la planta durante el desarrollo depende de la dinámica de crecimiento y de la tasa de distribución de los fotoasimilados, que están influenciados por el área foliar, los nutrientes disponibles y las condiciones climáticas (Heemst, 1986).

Radiación solar. En el maíz, la radiación interceptada varía dependiendo del ambiente (época del año, nubosidad) y de la capacidad de las plantas para interceptar la radiación fotosintéticamente activa (RFA), así como de las prácticas de manejo y del ecotipo. Los factores que afectan la radiación interceptada acumulada durante todo el ciclo de cultivo son la fertilización nitrogenada y la densidad poblacional de plantas, debido a su impacto en la canopia del cultivo (Contreras *et al.*, 2012).

8.17. Exigencias hídricas

El cultivo de maíz requiere una cantidad media de 500 a 800 mm de agua, que debe distribuirse adecuadamente durante las fases fenológicas de la planta. Las fases más importantes son la floración y la llenado de granos, en las que se necesita la mayor cantidad de agua para obtener la máxima producción posible. La cantidad de agua necesaria para el cultivo de maíz depende en gran medida de las condiciones climáticas, aunque no es un factor determinante en la producción (García, 2015).

El agua es uno de los factores más importantes para el crecimiento adecuado del maíz. Es necesario proporcionarla en el momento oportuno. Un estrés hídrico durante la floración o al inicio del llenado de granos tendrá un impacto más fuerte que en las primeras etapas del cultivo de maíz. Este estrés, causado por un déficit de agua durante el periodo de floración, puede reducir el rendimiento en un 6-13% por cada día de déficit (Mineral, 2012).

Además de proporcionar la cantidad adecuada de humedad en el suelo, es importante regular la intensidad del riego en las diferentes fases fenológicas del cultivo de maíz. En condiciones de saturación, las raíces pueden tener dificultades para obtener simultáneamente los nutrientes y el agua que necesitan, ya que ésta actúa como conductor. Se debe tener en cuenta la sinergia entre el aire y la cantidad de agua en el suelo, así como las posibles pérdidas de agua por filtración y percolación (FAO, 2016).

Hay diferentes sistemas de riego que se pueden utilizar en el cultivo de maíz, y cada uno varía en cuanto a la intensidad de aplicación del agua. Por ejemplo, en el riego por surcos, la frecuencia del riego debe ser baja para evitar la saturación del suelo. En el riego por aspersión, la frecuencia debe ser alta o baja dependiendo de las condiciones climáticas y del tipo de aspersor utilizado. Por otro lado, en el riego por goteo, la frecuencia debe ser alta (Glanze, 2015).

8.18. Ecofisiología del maíz

Fenología. La fenología es el cambio visible durante el desarrollo de la planta que está determinado por el ambiente. En el maíz, la etapa vegetativa se define por los estadios fenológicos a medida que produce nuevas hojas hasta la aparición de la panoja, y en la etapa reproductiva se define desde la floración femenina hasta la madurez fisiológica. Es importante evaluar el efecto del clima en el maíz al explorar el papel de las variables climáticas en la fenología del maíz. La temperatura es la variable más crítica en el desarrollo fenológico, y cada planta tiene un rango específico de temperaturas para su desarrollo llamado temperaturas cardinales, que incluye un límite superior e inferior (umbral) y un óptimo, lo que determina la duración de una fase fenológica (Hatfield y Dold, 2018).

Acumulación térmica. El crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz está regulado principalmente por la temperatura. Esto puede afectar los cambios visibles que ocurren durante el desarrollo de la planta, conocidos como fenología. La temperatura también afecta la duración del ciclo ontogénico debido a los requerimientos necesarios de cada estadio fenológico. Los ecotipos de maíz típicamente requieren una temperatura base de 5 a 12 °Cd para crecer, pero en climas tropicales este requerimiento puede aumentar. La velocidad de aparición de hojas también está relacionada con la temperatura y se mide en términos de grados día de crecimiento (°Cd), que se calcula a partir de la suma de la diferencia entre la temperatura media y la temperatura base del cultivo durante un estadio fenológico determinado (Hatfield y Dold, 2018).

Índice de Área Foliar (IAF). El Índice de Área Foliar (IAF) mide la cantidad y distribución del área foliar por unidad de superficie de suelo ocupada. Es importante porque nos dice la cantidad de luz solar que una planta es capaz de interceptar, su capacidad fotosintética y su tasa de respiración y transpiración. El IAF tiene una alta relación con el rendimiento de biomasa seca antes de la floración y está determinado por la densidad de población. A mayor densidad de población, hay un mayor área foliar y mayor número de hojas por metro cuadrado, lo que permite un mayor aprovechamiento de la luz, agua y nutrientes y un mayor crecimiento de la planta (Olivas *et al.*, 2013).

El Índice de Área Foliar es una medida de la cantidad y distribución del área foliar en un cultivo de maíz. Esta medida es importante porque afecta la capacidad de la planta para interceptar la radiación solar, su capacidad fotosintética, su transpiración y respiración foliar. La duración del IAF antes de la floración tiene una alta relación con el rendimiento de

biomasa seca y está determinada por la densidad de población del cultivo. Una mayor densidad de población permite un mayor área foliar y un mayor número de hojas por metro cuadrado, lo que a su vez permite un mayor aprovechamiento de la radiación solar, el agua, la luz y los nutrientes. La eficiencia en el uso de la radiación se refiere a la relación entre la radiación solar fotosintéticamente activa y la biomasa producida y se encuentra en un rango de 2 a 3,4 g por mega julio. Un índice de área foliar adecuado en el cultivo de maíz que logre una intercepción del 95% de la luz solar se podría estimar entre el 4,2 al 4,5 según el estado foliar del cultivo (Suárez y Gerónimo, 2012).

La tasa de acumulación de materia seca es la cantidad de biomasa seca que se produce por unidad de área por unidad de tiempo en un cultivo de maíz. Esta tasa se mide tomando muestras de la planta a intervalos regulares y calculando el aumento en su peso seco entre una muestra y la siguiente. La intercepción de la radiación solar por las hojas es un factor importante en la producción de fotoasimilados, que son luego transportados a diferentes órganos de la planta y contribuyen al aumento de la tasa de acumulación de biomasa seca. (Gardner *et al.*, 1985).

Interacción ecotipo- ambiente. La interacción del ambiente con el ecotipo genera variación en el rendimiento de los cultivos. La interacción entre el ecotipo de maíz y el ambiente puede afectar el rendimiento del cultivo. Los cambios en las condiciones climáticas pueden tener un impacto en el comportamiento diferencial de distintos ecotipos de maíz. La estabilidad de un ecotipo se refiere a su capacidad de adaptarse de manera consistente a diferentes condiciones ambientales. La respuesta del rendimiento del cultivo a los estímulos ambientales puede ser positiva o negativa. Los rasgos ecofisiológicos medidos antes de la floración, como la emergencia y el crecimiento temprano, también pueden afectar el rendimiento. (Cruz y Regazzi, 2001; Hortelano *et al.*, 2013; Afriyie *et al.*, 2018).

El maíz es un cultivo que puede adaptarse a una gran variedad de suelos, siempre y cuando se utilicen los tipos de cultivares y técnicas de cultivo adecuados. Los suelos ideales para el cultivo del maíz son los de textura media, fértiles, bien drenados, profundos y con una alta capacidad de retención de agua. El maíz suele crecer bien en suelos con un pH entre 5,5 y 7,8, pero fuera de este rango se puede producir toxicidad o falta de ciertos elementos. Si el pH es inferior a 5,5, a menudo hay problemas de toxicidad debido al aluminio y al manganeso, así como falta de fósforo y magnesio. Cuando el pH es superior a 8 (o superior a 7 en suelos calcáreos), suele haber falta de hierro, manganeso y zinc. Los síntomas en el

campo de un pH inadecuado, en general, se parecen a los problemas de micro nutrientes. (Mendoza *et al.*, 2018; Zaragoza *et al.*, 2019; Reif *et al.*, 2005).

8.19. Densidad de siembra

El clima, el riego y la densidad de población son algunos de los factores que han afectado el rendimiento del cultivo de maíz a lo largo del tiempo. Al analizar estos factores, se han desarrollado mejoras técnicas para aumentar la productividad del maíz. Una de las decisiones que debe tomar el agricultor es la densidad poblacional, es decir, la cantidad de plantas a sembrar en un terreno determinado. Muchas veces, el agricultor no sabe cómo aplicar la densidad poblacional de manera adecuada.

Para determinar la densidad de siembra adecuada, es necesario tener en cuenta la variedad o híbrido de maíz que se va a cultivar, ya que cada uno tiene un desarrollo morfológico diferente. La cantidad de plantas también es importante para obtener un buen rendimiento, ya que un buen crecimiento permite que la planta reciba luz y evita la aparición de hongos y ácaros debido al viento. Una mala elección de la densidad de siembra puede reducir la productividad en un 10-40%, mientras que una alta densidad poblacional puede ocasionar competencia entre nutriciones, lo que resulta en el aborto de granos o plantas adultas estériles, es decir, sin producción. (INTAGRI, 2018).

Con el tiempo, la arquitectura de las plantas de maíz ha cambiado significativamente, lo que ha llevado a un cambio en las densidades poblacionales. Los híbridos desarrollados han permitido obtener plantas más uniformes, lo que ha mejorado la adaptación de las densidades poblacionales. Esto ha ayudado a reducir el acame de las plantas, a disminuir el desperdicio de insumos y a reducir la evaporación y el crecimiento de malezas, lo que a su vez ha llevado a una menor competencia por nutrientes y a mazorcas más grandes. En nuestros campos, tenemos una densidad de siembra de 80 cm entre calles y 20 cm entre plantas, lo que nos permite un desarrollo óptimo de la planta y una población total de 62500 plantas por hectárea, dependiendo de la cantidad de horas de luz y del tipo de suelo (Perrin & Jock, 2018).

8.20. Conclusiones

- El maíz forrajero puede ser cultivado con éxito en muchos lugares, pero su calidad y valor nutricional pueden variar debido a factores como la variedad, la fertilización, el ataque de plagas o enfermedades, etc.
- El maíz forrajero es una buena opción para complementar la alimentación de los rumiantes, ya que proporciona energía que estimula el metabolismo ruminal. Además, es una importante fuente de carbohidratos no estructurales que pueden mejorar el rendimiento animal, tanto en el mantenimiento de las condiciones corporales como en la producción de leche.

8.21. Bibliografía

Acosta, R. (2009). El cultivo de maíz, su origen y clasificación. El maíz en Cuba. Cultivos Tropicales, 113-120.

Afriyie, C., Sarkodie, J., Nketiah, J., Francisco, P., & Obeng, E. (2018). Determine the Relationship between the Performance of the Maize Varieties and Their MultiEnvironment Status. Asian Journal of Research in Crop Science, 1-9.

Agritotal, 2015. Forrajes de calidad. [En línea] Available at: <http://www.agritotal.com/nota/forrajes-de-calidad/>.

Allen MS, Coors JG, Roth GW (2003) Corn silage. In: Buxton DR, Muck R, Harrison J (eds) Silage science and technology. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, pp 547–608

Álvarez, J., 2016. ¿Cuáles son los planes de control necesarios para el almacenamiento de maíz en un silo metálico?. [En línea] Available at: <https://siloscordoba.com/es/blog-es/almacenaje-degrano/almacenamiento-de-maiz-silo-metalico/>.

Andrade, F. (1992). Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Balcarce, Buenos Aires, Argentina: Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA).

Arista, J., Quevedo, A., Zamora, B., Bauer, R., Sonder, K., & Lugo, O. (2018). Temperaturas base y grados días desarrollo de 10 accesiones de maíz de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 9(5), 1023-1033.

Blanco, 2017. Manejo oportuno de los arvenses en sus relaciones interespecificas con los cultivos del maíz (*Zea mays* L.) del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en un sistema sucesional. La Habana: Editorial Universitaria. ISBN 978-959-16-3767-3 Available at:

<https://ebookcentral.proquest.com/lib/upsesp/reader.action?docID=5214259&query=Clasificaci%25C3%25B3n%2Btaxon%25C3%25B3mica%2Bdel%2Bcultivo%2Bde%2Bma%25C3%25ADz%2B>.

Bragachini, M., Gallardo, M., Peireti, J., Bianco, M., & Cattani, P. (2011). Forrajes conservados de alta calidad y aspectos relacionados al manejo nutricional. Manual Teórico N6.: INTA –PRECOP II.

Cabrales, R., Montoya, R., & Rivera, J. (2007). Evaluación agronómica de 25 genotipos de maíz (*Zea maíz* L) con fines forrajeros en el valle del Sinú medio. Revista MVZ Córdoba, 1054-1060.

Caibor, B. (2016). Determinación de dosis óptima fisiológica y económica de nitrógeno en dos híbridos de maíz (*Zea mays* L.), en la zona de Boliche. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Guayaquil, 68 p.

Callacná, M., León, Z., & Mendoza, G. (2014). Características nutritivas del ensilaje mixto de maíz chala (*Zea mays* L.) y broza de esparrago (*Asparragus officinalis*) con melaza – urea e inóculo bacterial como suplemento alimenticio para cabras en manejo semi extensivo. SCIENDO, 40-50.

Carter PR, Coors JG, Undersander DJ, Albrecht KA, Shaver RD (1991) Híbridos de maíz para ensilaje: una actualización. Roth. En: Procedimiento. de la conferencia anual de investigación de maíz y sorgo, 46th. Chicago Asociación Americana de Comercio de Semillas, Washington DC. págs. 141–164 Chaudhary DP, Kumar.

Casini, C., 2009. Conservación de Granos, Almacenamiento tradicionales y en bolsas

Cattani P, 2009. ¿Maíz Pasado?, no se preocupe no es tan grave producir. s.l.:s.n. Cattani, P., Bragachini, M. & Peiretti, J., 2010. El tamaño de picado como factor de calidad en el silo. [En línea] Available at: <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/cosecha/tamanoDePicado.asp>.

Cattani P, 2009. ¿Maíz Pasado?, no se preocupe no es tan grave producir. s.l.:s.n.

- Chaudhary, DP, Jat, SL, Kumar, R., Kumar, A., Kumar, B. (2014). Calidad forrajera del maíz: su conservación. En: Chaudhary, D., Kumar, S., Langyan, S. (eds) Maíz: dinámica nutricional y nuevos usos. Springer, Nueva Delhi. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1623-0_13.
- Contreras , A., Martínez, C., & Estrada , G. (2012). Eficiencia en el uso de la radiación por híbridos de maíz de valles altos México. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 161–169.
- Cruz , D., & Regazzi, A. (2001). Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Universidade Federal de Vicosa (2da. ed.). Vicosa, Minas Gerais, Brasil: UFV.
- David B. (2008). Manuales para educación agropecuaria. Maíz. Área: producción vegetal 10. Mexico- Trillas. Tercera edición. ISBN: 978-968-24-8101-7.
- Deras, H. (2012). Guia técnica: El cultivo de maíz . El Salvador: CENTA.
- Demagnet, F.R., 2014. Manual de Especies Forrajeras. Plan Lechero Watt's, CORFO, Universidad de La Frontera. Osorno, Chile. 163 p.
- EL MERCURIO, 2013. Precios de forrajes y ensilajes de maíz para ganaderos, s.l.: s.n
- Elizondo, J. (2011). Influencia de la variedad y la altura de cosecha sobre el rendimiento y valor nutritivo de maíz para ensilaje. *Agronomía Costarricense*, 35(2), 105-111.
- Elizondo, J. (2017). Producción de biomasa y calidad nutricional de tres forrajes cosechados a dos alturas. *Agronomía Mesoamericana*, 329-340.
- Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua [Internet]. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2018. Recuperado a partir de: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/encuesta-de-superficie-y-produccion-agropecuaria-continua-bbd/> [Links].
- FAO. (2016). Forraje verde hidropónico. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación, 55.
- Farinango, D., 2015. “primer ciclo de mejoramiento genético de maíz (*Zea mays* L.)“. [En línea] Available at: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4266/1/13T0810.pdf>.

- Francesca, U., 2017. La Fibra en Forrajes Tropicales. Parte 1.- Factores que afectan su Digestibilidad. [En línea] Available at: La Fibra en Forrajes Tropicales. Parte 1.- Factores que afectan su Digestibilidad.
- Garcés, 2010. Ensilaje como fuente de alimentación para el ganado. [En línea] Available at: <http://www.lasallista.edu.co/fxcul/media/pdf/Revista/Vol1n1/06671%20Ensilaje%20como%20fuente%20de%20alimentaci%C3%B3n%20para%20el%20ganado.pdf>.
- García , Á., Thiex, N., Kalscheur, K., Tjardes, K., & Dakota, S. (2019). Interpretación del análisis del ensilaje de maíz. Recuperado el 14 de Abril de 2020, de Dairy Cattle: <https://dairy-cattle.extension.org/>.
- García, A. (2015). Efecto de abonos orgánicos en el rendimiento y calidad del forraje verde hidropónico. México.
- Gardner, F., Brent, R., & Mitchel, R. (1985). Carbon fixation by crop canopies. En I. S. Press, *Physiology of Crop Plants* (págs. 31-57). Iowa: Iowa State University Press.
- Gaytán, Martínez, Mayek, N., 2009. Rendimiento de Grano y Forraje en Híbridos de Maíz y su Generación Avanzada Pag: 295 -304. s.l.:s.n
- Glanze, P. (2015). El maíz de grano, producción mecanizada de maíz y granos en las regiones tropicales y subtropicales. Ediciones Euroamericanas. Klaus Thiele. México, 125p.
- Gómez, A., Sanginés, L., Hernández, J., & Benítez, J. (2015). Evaluación químico proximal de ensilado de maíz (variedad DK2034) en diferentes tiempos de fermentación. *EDUCATECONCIENCIA*, 63-68.
- Granados, R., & Sarabia, A. (2013). Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 435-446.
- Gupta BK, Bhardwaj BL, Ahuja AK (2004) Nutritional value of forage crops of Punjab. Punjab Agricultural University Publication, Ludhiana.
- Harfoot, C., & Hazlewood, G. (1988). Lipid metabolism in the rumen. (P. Hobson, Ed.) Elsevier Applied Science, 285-322.

- Hatfield, J., & Dold, C. (2018). Climate Change Impacts on Corn Phenology and Productivity. En J. Hatfield, & C. Dold, Corn - Production and Human Health in Changing Climate (págs. 95-114). IntechOpen.
- Heemst, H. (1986). The distribution of dry matter during growth of a potato crop. Potato Res, 29, 55-66.
- Hortelano , R., Villaseñor, H., Martínez, E., Rodríguez , M., Espitia, E., & Mariscal, L. (2013). Estabilidad de variedades de trigo recomendadas para siembras de temporal en los Valles Altos de la Mesa Central. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 4(5), 713-725.
- INIAP, 2010. Ficha Técnica de producción Variedad de Maíz Blanco 103, Repositorio digital, Cuenca: s.n.
- INIAP. (2011). Manejo Integrado del cultivo de maíz suave. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, Módulo IV.
- INTAGRI, 2017. la fenología del maíz y su relación con la incidencia de plagas. [En línea] Available at: <https://www.intagri.com/articulos/fitosanidad/la-fenologia-del-maiz-y-su-relacion-con-la-incidencia-de-plagas>.
- INTAGRI. (2018). Densidad de siembra en el cultivo de maíz. Obtenido de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/densidadde-siembra-en-elcultivo-de-maiz>.
- INTAGRI. 2018. Plantas C3, C4 y CAM. Serie Nutrición Vegetal, Núm. 125. Artículos Técnicos de INTAGRI. México. 5 p.
- Iqbal A, Ayub M, Zaman H, Ahmed R (2006) Impact of nutrient management and legume association on agroqualitative traits of maize forage. Pak J Bot 38:1079–1084.
- Klein, F. (1988). Avena y maíz para ensilaje. En: “Seminario para agricultores sobre conservación de forrajes para uso animal”. Osorno, Chile: Instituto de Investigación Agropecuarias (INIA). Estación Experimental Remehue.
- Linares, J., 2016. Maíz mejor momento de corte de planta entera?. [En línea] Available at: <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/foros/maiz-mejormomento-corte-t26586/>.

- Lino, A. (2014) Ensilaje en bolsas, alternativa para pequeños ganaderos. [En línea] Available at: <https://padrecitozesati.files.wordpress.com/2015/02/ensilaje-enbolsas.pdf>.
- Lutt, N., Jeschke, M., & Strachan, S. (2016). High Night Temperature Effects on Corn Yield. Recuperado el 29 de junio de 2019, de PIONEER: <https://www.pioneer.com/home/site/us/agronomy/library/night-temperatureeffects-corn-yield/>.
- Macay, M., 2015. Tesis de grado Identifico uno entre cuatro Híbridos de Maíz, para ser utilizado como para alimentación de ganado lechero en el Cantón Nobol de la Provincia del Guayas. [En línea]. Available at: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/4104/1/T-UCSG-POS-MSPA7.pdf>.
- Maizar. (2015). Estadísticas maíz/sorgo. Disponible en: <http://www.maizar.org.ar/estadisticas.php>.
- Manrique, L., & Bartholomew, D. (1991). Growth and yield performance of potato grown at three elevations in Hawaii: II. Dry matter production and efficiency of partitioning. *Crop Sci*, 367–372.
- Marsalis MA, Angadi SV, Contreras-Govea FE (2010) Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crop Res* 116:52–57.
- Méndez, M., 2017. Poetencial forrajero de cuatro variedades costarricenses de maíz (*Zea mays*) evaluadas a diferentes densidades de siembra en Santa Lucia, Barva de Heredia. [En línea] Available at: https://www.repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/14189/Tesis%20Lista.%200Recomendaciones%20Tri,%20Tut.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR1KXAEfFS_y7P8zutppfoPGOtb67OTBgub5LUimpYhCsHdXIRi3szArCBY.
- Mendoza, E., Bravo, M., Muñoz, C., Diaz, L., & Carpio, C. (2018). Evaluación de la calidad nutricional de los ensilajes en bolsa de los híbridos de maíz Somma y Trueno aplicando dos aditivos en la zona de Colimes. *Espirales*, 2(15), 137-153.
- Mier, M., & Monroy, A. (2017). Caracterización del valor nutritivo y estabilidad aeróbica de ensilados en forma de microsilos para maíz forrajero. Quito, Ecuador: PUCE.

- Mineral. (2012). Solución hidropónica. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú.
- Monsanto (2017). Manejo del ensilado de maíz. Manejo del cultivo. [En línea] Available at: <https://www.dekalb.es/maiz-silo/manejo-del-cultivo-de-maiz/manejodel-ensilaje-de-maiz>.
- Montecor, 2017. Tecnología de picado para ensilado de cultivo de maíz. [En línea] Available at: <http://henificaciondeprecision.com/picadoras-tecnologia-ensilado-maiz/>.
- Olivas, P., Oberbauer, D., Clark, M., Ryan, J., O’Brein, J., & Ordóñez, H. (2013). Comparison of direct and indirect methods for assessing leaf area index across a tropical rain forest landscape. *Agricultural and Forest Metereology*, 177, 110-116.
- Oñate L., 2016. "Duración de las etapas fenológicas y profundidad radicular del cultivo de maíz (zea mays) var. Blanco harinoso criollo, bajo las condiciones climáticas del cantón cevallos" [En línea] Available at: http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/18305/1/Tesis116%20%20Ingenier%C3%ADa%20Agron%C3%B3mica%20-CD%20371.pdf?fbclid=IwAR1yx3NdCffiECHMtvEG6jQs_Piu_UgeevTsowejILXe-4xyjmsIg8UjwM.
- Ortega, I. (2014). Maíz I (Zea mays). En E. Urría, *Reduca (Biología)* (págs. 151-171). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
- Ortigoza, J., López, C., & Gonzalez, J. (2019). Guía técnica cultivo de maíz. San Lorenzo: FCA, UNA.
- Paliwal R.L. (2001). Tipos de maíz. *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*.
- Peñaherrera, D., 2011. Manejo integrado de Maíz de altura. [En línea] Available at: http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/3302/1/iniapscpm190.pdf?fbclid=IwAR3x7jIo_BxnWP7XqsiKG1V-U7uH4d2xBEGKBNefdLX5TocfHPQ5RdG1LcM.
- Perrin, R. J. (2018). From Agronomic Data Farmer Recommendations. An Economic Training Manual. CIMMYT: Mexico, D.F, <http://www.cimmyt.org>.
- Perrin, R., & Jock, A. (2018). From Agronomic Data Farmer Recommendations. An Economic Training Manual. CIMMYT: Mexico, D.F, <http://www.cimmyt.org>.

- Piñeiro, G., 2006. cuidados en la confección de los silos de maíz. [En línea] Available at: <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/silos-de-maizt26655.htm>.
- Plascencia, A., Mendoza, G., Vásquez, C., & Avery, R. (2005). Factores que influyen en el valor nutricional de las grasas utilizadas en las dietas para bovinos de engorda en confinamiento. *Interciencia*, 30(3), 134-142. Recuperado el 15 de abril de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442005000300006&lng=es&tlng=es.
- Reif, J., Hallauer, A., & Melchinger, A. (2005). Heterosis and heterotic patterns in maize. *Maydica*, 50, 215-223.
- Reta S D., J. Carrillo S., A. Gaytán M., E. Castro M. y J. A. Cueto W. 2002. Guía para cultivar maíz forrajero en surcos estrechos. INIFAP-CIRNOCCELALA. Matamoros, Coahuila. México.
- Romero, L. & Aronna, S., 2004. Siembra de maíz para ensilaje. [En línea] Available at: <http://rafaela.inta.gov.ar/info/documentos/cfc/doc2.pdf>.
- Ruíz , C., Sánchez , J., & Goodman, M. (1998). Base temperature and heat unit requirement of 49 mexican maize races. *Maydica*, 43, 277-282.
- Salinas, 2011. Caracterización de cultivares. Maíz sorgo. 1ª ed. 70 p. ISBN 978-987-62-9. Available at: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/upsesp/reader.action?docID=3198367&query=Fibra%2Bdetergente%2B%25C3%2581cido%2B%2528FDA%2529%2Ben%2Bmaiz>.
- Santini, F., 2013. Uso de maíz en sus varios en la alimentación de vacunos para carne en pastoreo y feedlot. [En línea] Available at: <https://www.agrositio.com.ar/noticia/53092-uso-del-maiz-en-sus-varios-tipos-en-la-alimentacion-de-vacunos-para-carne-en-pastoreo-y-feedlot>.
- Sattar MA, Haque MF, Rahman MM (1994) Cultivos intercalados de maíz con arroz al voleo en diferentes espacios entre hileras. *BangladeshJ Agric Res* 19:159–164.

- Singh KA (2009) Feed and fodder development issues and options. In: Das N, Misra AK, Maurt SB, Singh KK, Das MM (eds) Forage for sustainable livestock production. SSPH, New Delhi, pp 1–12.
- Soto, P., Jhan, E., & Arredondo, S. (2004). Mejoramiento del porcentaje de proteína en maíz para ensilaje con el aumento y parcialización de la fertilización nitrogenada. *Agricultura Técnica*, 64(2), 156-162. doi:10.4067/S0365-28072004000200004.
- Suárez, A., & Geronimo, L. (2012). Intercepcion de radiacion fotosinteticamente activa como factor determinante de densidad optima en cultivares de maíz (*Zea mays* L.). INTA.
- Vargas, C. (2008). Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agronomía Mesoamericana*, 233-240.
- Wagner, B., Asencio, V. & Caridad, J., 2016. Conservación del forraje. [En línea] Available at: <http://190.167.99.25/digital/Idiaf.Ensilaje.1.pdf>.
- Zambrano, C., 2018. FASES DE CRECIMIENTO DE MAÍZ. [En línea] Available at: <http://agrocarloz zambrano.blogspot.com/2018/01/fases-de-crecimientodel-maiz.html>.
- Zaragoza, J., Tadeo, M., Espinoza, A., Lopez, C., Garcia, J., Zamudio, B., . . . Rosado, F. (2019). Rendimiento y calidad de forraje de híbridos de maíz en Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10 (01), 101-111.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO



EDITORIAL
UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE BABAHOYO



ISBN: 978-9942-606-14-3



9 789942 606143

