

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN CARRERAS AGRONÓMICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Sostenibilidad y productividad en maíz forrajero: efectos de la fertilización orgánica y biotecnologías de suelo

Por:

Ernesto Ordaz Correa

TESIS

Presentada como requisito para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRÓNICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Sostenibilidad y productividad en maíz forrajero: efectos de la fertilización orgánica y biotecnologías de suelo (*Zea May*, L.)

Por:

Ernesto Ordaz Correa

TESIS


Que somete a la consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobado por:



Dr. Alain Buendía García
Presidente



MC. José Guadalupe Gonzales Quirino
Vocal



Dr. Gerardo Zapata Sifuentes
Vocal



Dr. María García Carrillo
suplente



MC. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la división de carreras agronómicas

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRÓNICAS

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Sostenibilidad y productividad en maíz forrajero: efectos de la fertilización orgánica
y biotecnologías de suelo (Zea May, L.)

Por:

Ernesto Ordaz Correa

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

Aprobada por el Comité de Asesoría:



Dr. Alain Buendía García
Asesor Principal



MC. José Guadalupe Gonzales Quirino
Coasesor



Dr. Gerardo Zapata Sifuentes
Coasesor



Dr. Mario García Carrillo
Coasesor



Mc. Rafael Ávila Cisneros
Coordinador de la división de carreras agronómicas

Torreón, Coahuila, México
Diciembre 2025

AGRADECIENTOS

Gracias a mis profesores que me orientaron y ayudaron a mi formación académica a todos los que, forman parte de la UAAAN-UL que permitieron la conclusión de mi carrera, a los compañeros y amigos de la generación 2021-2015 por tantos momentos y anécdotas vividas. Gracias UAAAN por formar parte de una magnífica universidad de una magnífica comunidad.

Para el Dr. Alain Buendía García por su ayuda y apoyo en este trabajo de investigación que llevamos a cabo.

DEDICATORIAS

Dedicado principalmente **a mi madre Alma Lucila Correa Carreón y a mi abuelo Amador Ordaz Soto**. Por su gran apoyo incondicional, por sus consejos y por siempre desearme lo mejor para mí y para mis hermanas, por enseñarnos a ser mejor y buenas personas.

A mi hermana Arleth Anahí Ordaz Correa por su apoyo, sus consejos y el siempre apoyarme en cada decisión que tomo.

A mi segunda hermana Frida Valeria Ordaz Correa por demostrarme su apoyo cariño comprensión en momentos difíciles.

A mi abuelo materno Jesús Correa Ortega que fue mi inspiración para estudiar esta carrera, gracias por su apoyo y consejos que me dio.

Al Dr. Alain Buendía García por su acompañamiento durante toda mi formación profesional, así como el desarrollo de mi trabajo de campo y elaboración de esta tesis.

Al Dr. Gerardo Zapata Sifuentes por su valiosa orientación, por señalarme con paciencia mis errores y por su apoyo en la redacción y mejora de esta tesis

INDICE

INDICE DE CUADROS	vi
INDICE DE FIGURAS	vii
RESUMEN	viii
INTRODUCCIÓN	1
II.REVISIÓN DE LITERATURA	2
2.1 Cultivo del maíz.	2
2.2 Origen del maíz.	2
2.3 Producción de maíz en el mundo.....	3
2.4 Producción de maíz en México.	3
2.5 Morfología del maíz.	3
2.5.1 Raíz.	4
2.5.2 Tallo.....	4
2.5.3. Hojas.	4
2.5.4 Espiga.	5
2.5.5 Panoja.	5
2.6 Inflorescencia.	6
2.7 Utilización de bacterias en el maíz (Siorhizobium Meliloti).	6
2.8 Utilización de estiércoles en el maíz.	7

2.9 Fertilización de lenta liberación en el maíz.	7
2.10 Micorrizas en el maíz.	8
2.11 Características de una planta de maíz forrajera ideal.	8
2.12 Productividad del maíz para forraje.	9
2.13 Calidad nutricional del maíz.	9
2.14 Temperatura.	10
2.15 Viento.	10
2.16 Fotoperiodo.	10
2.17 Factores edáficos.	11
2.18 Factores genéticos.	11
2.19 Contenido de fibras.	12
2.20 Fibra neutra detergente (FND).	12
2.21 Fibra de detergente ácida.	12
2.22 Energía neta de lactancia (NE_1).	13
2.23 Materia seca.	13
2.24 Calidad de alimento.	13
2.25 Alternativas de silo de maíz forrajero.	14
2.27 Cosecha óptima de maíz para ensilado.	14
2.29 Medición de la materia seca	15

2.30 Cosecha optima de maíz con rastrojo y grano.....	15
2.31 Efecto de nitrógeno en las plantas.....	16
2.32 Síntomas de deficiencias de nitrógeno de maíz forrajero.....	16
2.33 Perdidas de nitrógeno.....	17
2.34 Eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN)	19
MATERIALES Y METODOS.....	20
3.1 Localización del área experimental.....	21
3.2 Muestreo de suelo	21
3.2 Análisis del suelo.....	21
3.4 Labores agrícolas	24
3.5 Parcela experimental.....	25
3.6 Tratamientos.....	26
3.7 Material vegetal.....	27
3.8 Recolección de estiércol	27
3.9 Incorporación de estiércol.....	27
3.10 Instalación de sistema de riego	28
3.11 Siembra y fertilización química	29
3.12 Riegos	30
3.13 Manejo de plagas	30

3.14 Manejo de malezas.....	31
3.15 Cosecha	31
3.16 Materia seca	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
4.1 Rendimientos.....	33
CONCLUSIONES.	41
VI.BIBLIOGRAFÍA.....	42

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Comparación de medias por tratamiento para el rendimiento de Forraje verde (FV), forraje en seco (FS) y altura de planta.....	33
Cuadro 2 Propiedades físicas del suelo.	35

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Municipios que conforman la comarca lagunera.....	20
Figura 2. Localización del lote donde se realizó la investigación.	21
Figura 3. Análisis de suelo pre-siembra.....	24
Figura 4. Labores iniciales de preparación de campo.....	25
Figura 5. Imagen del campo experimental.....	26
Figura 6. Híbrido utilizado.....	27
Figura 7. Distribución del estiércol en el área experimental.	28
Figura 8. Implementación de la cintilla de riego.....	29
Figura 9. Riego en función.	30
Figura 10. Corte y pesaje el día de cosecha.....	31
Figura 11. Picado de planta de maíz.	32
Figura 12. Rendimiento del maíz en seco.	37
Figura 13. Rendimiento del maíz en verde.	39

RESUMEN

El uso de micorrizas y bacterias en el cultivo del maíz mejora significativamente el desarrollo y rendimiento del cultivo. Las micorrizas aumentan la absorción de agua y nutrientes principalmente el fósforo (P), además de mejorar la estructura del suelo y la tolerancia de maíz al estrés hídrico. Por su parte, las bacterias promotoras de crecimiento favorecen a la fijación de nitrógeno (N), la producción de hormonas de crecimiento, la solubilización de nutrientes y la protección contra patógenos del suelo. En conjunto, estos microorganismos fortalecen al sistema radicular, incrementan al vigor de la planta, mejoran la eficiencia en el uso de fertilizantes y contribuyen a obtener mayores rendimientos y plantas sanas

Palabras clave: Zea Mayz L., Bacterias, Micorrizas

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial y en México, constituye la base de la alimentación y economía de la población de México. Su producción depende de gran medida de prácticas de manejo que permiten optimizar el crecimiento, uno de los cereales más importantes por su valor alimenticio, industrial y forrajero. Además, es una fuente esencial de energía, almidón, fibra y diversos subproductos utilizados en la alimentación humana, animal y en la industria. (FAO. 2018)

En la actualidad se está optando por el uso de micorrizas y bacterias promotoras de crecimiento y fijadoras de nitrógeno en el cultivo forrajeros como estrategia para aumentar la calidad nutricional y rendimiento de los cultivos. Las micorrizas se utilizan en la inoculación de semillas ya que ayudan a que la planta forme rápidamente simbiosis que mejore la absorción de nutrientes, especialmente fósforo, fortalece el desarrollo radicular, aumentan el vigor inicial y tolerancia al estrés, y contribuye a un mejor crecimiento y rendimiento del cultivo desde las primeras etapas.

Las bacterias promotoras de crecimiento y fijadoras de nitrógeno se inoculan en la semilla del maíz para un mejor arranque del cultivo, ya que desarrollan el crecimiento radicular, fijan nitrógeno atmosférico y solubilizan nutrientes y producen hormonas que favorecen el crecimiento. Esto se traduce a plantas más vigorosas, mayor eficiencia en el uso de fertilizantes y un mejor establecimiento desde las primeras etapas del desarrollo

II.REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cultivo del maíz.

La Comarca Lagunera se destaca como una de las principales regiones productoras de maíz forrajero en México. Su clima favorece el cultivo de este cereal tanto en primavera como en verano. Gracias a estos dos periodos de producción, es posible satisfacer en gran medida la elevada demanda de forraje que requiere el ganado lechero de la zona. Sin embargo, el rendimiento por hectárea y el valor nutritivo del forraje de maíz varían según el ciclo de cultivo, lo cual está estrechamente relacionado con las condiciones climáticas presentes en cada temporada. (Moore et al.,2021)

2.2 Origen del maíz.

El maíz tiene su origen en México, y las evidencias encontradas en Tehuacán, Puebla, demuestran que su cultivo comenzó hace aproximadamente siete mil años. Su domesticación fue un factor clave para que los grupos nómadas adoptaran un estilo de vida sedentario, convirtiéndose en la base alimenticia de las civilizaciones mesoamericanas. En aquella época se le conocía como elote —el término “maíz” proviene del Caribe—, y fue el cultivo más importante para las culturas prehispánicas, ya que no solo era fundamental en su dieta, sino que también tenía un papel central en sus rituales religiosos. (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2023).

2.3 Producción de maíz en el mundo.

La producción global de maíz está encabezada por Estados Unidos, seguido de China, Brasil y Argentina, siendo el primero el principal productor y exportador a nivel mundial. Este grano es el cereal más sembrado en el planeta, con una producción que supera los 1,100 millones de toneladas al año. Su destino principal es la alimentación animal (64%), mientras que una parte se emplea en procesos industriales (27%) y otra menor en el consumo humano. (FIRA, 2024).

2.4 Producción de maíz en México.

En México, la producción de maíz es relevante a nivel mundial, aunque no logra cubrir por completo las necesidades internas. El país genera en promedio más de 27 millones de toneladas anuales; sin embargo, en 2024 y 2025 la cifra descendió a 23.3 millones. A pesar de su papel como productor destacado, México depende en gran medida de las importaciones de maíz amarillo, ya que su producción resulta insuficiente frente a la demanda, mientras que el maíz blanco se orienta principalmente al consumo humano (Secretaría de agricultura y desarrollo rural, 2020).

2.5 Morfología del maíz.

La planta de maíz (*Zea mays*) presenta un tallo recto y sólido con nudos y entrenudos, del cual brotan hojas largas y paralelas responsables de la fotosíntesis. Sus raíces se encargan de captar los nutrientes del suelo. Esta especie desarrolla dos tipos de inflorescencias: la masculina, ubicada en la parte superior y conocida como panoja o espiga, y la femenina, que da origen a la mazorca, cuyo fruto corresponde a una cariópse. (Ministerio de agricultura S.f.).

2.5.1 Raíz.

Generalmente se presentan cuatro raíces: la primaria, la del primer par y la cuarta raíz. Su función principal es suministrar agua a la plántula para facilitar el uso de las reservas del grano. Estas raíces tienen escasa ramificación y una penetración limitada, aunque en suelos permeables pueden alcanzar hasta 30 cm de profundidad. Se mantienen activas durante todo el ciclo de la planta y contribuyen a la absorción tanto de agua como de nutrientes. (Simón y Golik, 2018).

2.5.2 Tallo.

El tallo del maíz está formado por nudos y entrenudos sólidos, cuyo número puede variar de seis hasta cuarenta, lo que genera alturas que van desde 0,45 m hasta 6 m en los maíces. En México, la mayoría de los cultivares presentan un promedio de trece nudos y alcanzan entre 1,80 y 2,20 m de altura. Los entrenudos de la base son más cortos y gruesos que los superiores. Además, la longitud del tallo depende en gran medida de la disponibilidad de agua durante la fase de crecimiento vegetativo. (Simón y Golik, 2018).

2.5.3. Hojas.

Las hojas del maíz están compuestas por vaina, lígula, aurículas y lámina. Se originan en cada nudo aéreo de manera alternada, formando un ángulo cercano a

110° con respecto a la vaina. La vaina, que es hendida y se sobrepone en su parte inferior, nace en el nudo y recubre tanto ese entrenudo como parte del siguiente. Generalmente presenta pubescencia, aunque también existen variantes glabras. En la unión entre la vaina y la lámina, conocida como collar, se observan pequeñas aurículas; en la parte interna se encuentra la lígula, de aspecto membranoso, translúcido y poco desarrollado. (Simón y Golik, 2018).

2.5.4 Espiga.

En el maíz, la única ramificación lateral se presenta en un número de una a tres, originándose en yemas axilares ubicadas entre el 6° y el 8° nudo. Su estructura es similar a la del tallo principal, aunque se limita a un pedúnculo con nudos y entrenudos muy cortos. De esta ramificación se forman principalmente el prófiro, las chalas y el pedúnculo, que da continuidad a un raquis engrosado denominado “marlo o maslo”, en el cual los entrenudos son difíciles de distinguir. (Simón y Golik, 2018).

2.5.5 Panoja.

La panoja del maíz está formada por un eje principal, que continúa el tallo, con pocas ramificaciones laterales dispuestas de manera espiralada. En la parte superior del eje central se encuentran dos, cuatro o incluso más hileras de pares de espiguillas bifloras, mientras que las ramificaciones laterales solo presentan dos hileras. Las variaciones en el tamaño de la panoja, así como en el número y desarrollo de las ramificaciones, pueden utilizarse para realizar diferenciaciones sistemáticas. (Simón y Golik, 2018).

2.6 Inflorescencia.

El maíz es una planta diclina y monoica, con dos tipos de inflorescencias: la masculina, llamada panoja o penacho, que se encuentra en la parte terminal del tallo, y la femenina, conocida como espiga o mazorca, que se ubica en una ramificación lateral también terminal. (Simón y Golik, 2018).

REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DEL MAIZ

Los requerimientos nutricionales del maíz se clasifican en macronutrientes y micronutrientes, destacando entre los primeros el nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). La cantidad necesaria de cada uno depende del rendimiento que se busque obtener; sin embargo, los cultivos de alto rendimiento demandan elevadas proporciones de N, P y K, además de azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Respecto a los micronutrientes, el zinc (Zn) y el manganeso (Mn) desempeñan un papel esencial en la formación y desarrollo del grano.

2.7 Utilización de bacterias en el maíz (*Siorhizobium Meliloti*).

Se trata de una bacteria Gram negativa, sin capacidad para formar esporas, de tipo aerobia, y que en el sistema radicular de la planta con la que establece simbiosis genera nódulos de tonalidad rojiza. Además, aporta beneficios agronómicos al contribuir a la recuperación de suelos degradados o con bajos niveles de materia orgánica, y una de sus mayores ventajas es la reducción de costos en fertilización. (Gallegos Morales et al., 2024).

Esta bacteria ha sido objeto de estudio desde hace décadas; existen investigaciones previas al año 2000 debido a su capacidad de competir y persistir en el suelo,

características relevantes para los productores. En leguminosas inoculadas, puede mantenerse activa por un año o por todo un ciclo vegetativo siempre que las condiciones ambientales sean favorables. (Quadrelli & Castellari, 2004).

Diversos autores señalan que tanto macronutrientes como micronutrientes influyen en la simbiosis entre la bacteria y la planta. Entre los macronutrientes clave se encuentra el fósforo, esencial en la estructura del ADN, ARN y en la producción de ATP. En cuanto a los micronutrientes, el boro desempeña un papel importante al estabilizar las membranas celulares de la planta y del microorganismo simbiote. (Glusko & Universidad Nacional de La Pampa. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2020).

2.8 Utilización de estiércoles en el maíz.

Es fundamental aplicar estiércol considerando su contenido de nitrógeno (N) disponible, con el fin de disminuir el uso de fertilizantes químicos y reducir el riesgo de contaminación de aguas subterráneas por lixiviación de nitratos. El estiércol puede reemplazar total o parcialmente el fertilizante nitrogenado en el cultivo de maíz forrajero y permite evaluar la eficiencia del N aplicado. (Figuerola-Viramontes, 2010)

2.9 Fertilización de lenta liberación en el maíz.

La urea de liberación lenta (NBPT) representa una opción eficaz para proporcionar nitrógeno a los cultivos, al mejorar su absorción y distribución a lo largo de toda la temporada de crecimiento. En comparación con la urea convencional, estudios de campo muestran un aumento notable en la producción, lo que la convierte en una

alternativa viable para incrementar el rendimiento por hectárea. Al liberar el fertilizante de forma gradual, se reducen las pérdidas por volatilización de gases nitrogenados y la lixiviación de nitratos, promoviendo así la agricultura sostenible y la protección del medio ambiente. (Morales-Morales, et al., 2021)

2.10 Micorrizas en el maíz.

Los microorganismos del suelo tienen un impacto significativo tanto ecológico como económico en los sistemas agrícolas. Por esta razón, se evaluó la respuesta agrobiológica del maíz (*Zea mays L.*) ante la inoculación de hongos micorrícicos arbusculares (HMA), rizo bacterias (*Azospirillum brasiliense*, Ab) y la aplicación de dosis reducidas de fertilizante inorgánico (FI) en condiciones de campo. (Zuleta-Rodríguez, et al., 2020)

2.11 Características de una planta de maíz forrajera ideal.

Las características de un híbrido ideal de maíz forrajero incluyen una alta producción de materia seca, buen índice de cosecha, estabilidad, adecuada concentración de carbohidratos y proteínas, además de una buena digestibilidad y aprovechamiento de la materia seca (Pinter, 1998).

En México existe poca información sobre la clasificación de la calidad del maíz destinado a forraje. Dicha clasificación toma en cuenta parámetros como el contenido de fibra (FND y FAD), la energía neta de lactancia (ENL), el almidón y la digestibilidad in vitro de la materia seca. En consecuencia, un maíz para ensilado con alto valor nutritivo debe presentar baja concentración de fibra, elevada digestibilidad y un mayor contenido energético (Herrera, 1999).

2.12 Productividad del maíz para forraje.

El maíz forrajero se caracteriza por ser un cultivo de fácil ensilaje y por ofrecer elevados rendimientos. Además, resulta económico tanto en su producción como en su cosecha y conservación. Por ello, muchas explotaciones con un alto número de vacas y suficiente superficie agrícola optan por producir y ensilar su propio maíz, asegurando así el suministro de forraje durante varios ciclos productivos y favoreciendo su sostenibilidad económica.

Se ha comprobado que al incrementar la densidad de siembra del maíz en los cultivos, se eleva el rendimiento de forraje expresado en materia seca (MS) destinada al ensilado, según lo reportado en diversos estudios (Cusicanqui y Lauer, 1999).

2.13 Calidad nutricional del maíz.

El grano de maíz aporta dos vitaminas liposolubles: la provitamina A (carotenoides) y la vitamina E. Los carotenoides se concentran principalmente en el maíz amarillo y su cantidad puede modificarse mediante mejoramiento genético, mientras que en el maíz blanco su presencia es mínima o inexistente.

Después de los carbohidratos (especialmente almidón), las proteínas y los lípidos, la fibra dietética constituye uno de los principales componentes químicos del maíz. Los carbohidratos complejos del grano se localizan en el pericarpio y la piloriza, además de encontrarse en las paredes celulares del endospermo y, en menor proporción, en las del germen. El grano de maíz contiene tanto fibra dietética soluble como insoluble en cantidades significativas (Sandstead et al., 1978).

Factores determinantes de calidad y producción en maíz

2.14 Temperatura.

La temperatura ideal para el crecimiento y la fotosíntesis del maíz se encuentra generalmente entre 25 °C y 32 °C. Sin embargo, su desarrollo se reduce cuando las temperaturas superan los 35 °C, presentando un umbral superior de estrés alrededor de 30 °C a 35 °C. La temperatura mínima para que el maíz pueda crecer es de 10 °C.

El aumento de las temperaturas globales implica que el cultivo probablemente enfrentará estrés por calor en un mayor número de regiones y con mayor frecuencia, por lo que resulta fundamental comprender cómo el calor excesivo influye en su crecimiento y rendimiento. (Ruiz., 2002)

2.15 Viento.

El maíz puede verse afectado por el viento, generando principalmente dos problemas: el acame, que es la caída de la planta, y el quiebre en verde, que consiste en la rotura del tallo. Estos fenómenos ocurren especialmente cuando se presentan ráfagas de viento fuertes, sobre todo si el suelo está húmedo o las plantas se encuentran en etapas de rápido crecimiento (Tracy, 1997).

2.16 Fotoperiodo.

El fotoperíodo también influye en el tiempo necesario para la floración del maíz. Esta especie se clasifica como planta de día corto cuantitativa. Tras un período juvenil en el que el fotoperíodo no afecta su desarrollo, los días largos de más de 12,5 horas pueden retrasar la floración. Existe variabilidad genética en cuanto a la

duración crítica del fotoperíodo, por debajo de la cual la fecha de floración no se ve afectada. La mayoría de los cultivos muestran sensibilidad al fotoperíodo, aunque la magnitud de esta sensibilidad varía considerablemente, provocando un retraso en la antesis de entre uno y doce días por cada hora adicional de la luz del día (Kiniry, Ritchie y Musser, 1983).

2.17 Factores edáficos.

Los factores del suelo más importantes para el cultivo de maíz incluyen suelos profundos y fértiles, con textura que varía de franca a franco-arcillosa, buen drenaje y adecuada capacidad para retener agua y nutrientes. Mantener un pH entre 6.0 y 7.0 es crucial, ya que suelos muy ácidos pueden provocar toxicidad por aluminio y manganeso. Además, la presencia de suficiente materia orgánica y nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo, así como la ausencia de obstáculos que limiten el desarrollo de las raíces (por ejemplo, acame del tallo), impactan directamente en el rendimiento del cultivo (Sánchez, Nicolaidis y Couto, 1977).

2.18 Factores genéticos.

Los aspectos genéticos del maíz determinan características como el rendimiento, la resistencia a plagas y a factores de estrés ambiental, la calidad nutricional y la estructura de la planta. La diversidad genética, la transmisión de genes importantes para la fertilidad y el rendimiento, las mutaciones, la selección artificial durante la domesticación y las herramientas de edición genética, como CRISPR-Cas, son factores que influyen en estas propiedades (Orozco-Ramírez et al., 2016).

PARAMETROS DE LA CALIDAD DEL FORRAJE.

2.19 Contenido de fibras.

La fibra se considera el componente estructural de las plantas que resiste la acción de las enzimas digestivas del bovino y que es degradada principalmente por los microorganismos presentes en el rumen (Van Soest, 1998).

2.20 Fibra neutra detergente (FND).

La fibra detergente neutra (FDN) está correlacionada de manera negativa con el consumo de materia seca: a mayor contenido de FDN, menor es la ingesta de forraje por el bovino. Al utilizar la FDN, es posible lograr una mejor predicción del consumo de forraje, lo que permite formular raciones más equilibradas.

La fracción soluble de la FDN está compuesta por lípidos, azúcares, ácidos orgánicos, proteínas, pectinas y otros minerales solubles en agua, características que se encuentran en la mayoría de las plantas C4 (Núñez, 2003).

2.21 Fibra de detergente ácida.

La fibra detergente ácida (FDA) corresponde a una fracción de la pared celular de las plantas, compuesta principalmente por celulosa y lignina, que permanece en el filtro tras la digestión de una muestra de alimento con una solución de detergente ácido. Este método, que forma parte del sistema Van Soest, se emplea para evaluar la calidad de forrajes y alimentos para rumiantes, dado que valores más altos de FDA indican una menor digestibilidad del alimento (Van Soest. 1998).

2.22 Energía neta de lactancia (NE_l).

La calidad de los forrajes está determinada por el contenido de la pared celular (CPC) y por sus fracciones conocidas como fibra detergente neutra (FDN) y fibra detergente ácida (FDA). Ambos tipos de fibra han sido ampliamente estudiados con el propósito de estimar el valor energético de los forrajes. Esto se relaciona tanto con la proporción FDN/FDA presente en el material como con la respuesta fisiológica que dicho forraje genera al ser utilizado (Van Soest, 1982; Schingoethe et al., 1988).

2.23 Materia seca.

Los nutrientes presentes en un alimento se localizan en su fracción de materia seca. En términos generales, estos componentes se dividen en materia orgánica e inorgánica. La materia orgánica incluye carbohidratos, compuestos nitrogenados, lípidos y vitaminas, los cuales tienen en común estar formados por carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O), además de nitrógeno (N) en el caso de los compuestos nitrogenados. Por su parte, la materia inorgánica está constituida por minerales (McDonald et al., 2002).

2.24 Calidad de alimento.

La calidad del forraje se entiende como la capacidad que este tiene para generar una respuesta animal deseada a partir de una ingesta determinada (Reid, 1994; Ball et al., 2001; Paterson et al., 1994). Dicha respuesta puede reflejarse en la producción de leche, el crecimiento del animal, la producción de carne así como en la salud general. Dado que los rumiantes no logran digerir completamente los forrajes, los factores más relevantes a considerar son la cantidad de forraje

consumida en un periodo de tiempo (ingesta) y el porcentaje realmente aprovechado por el animal (digestibilidad). Entre los principales atributos de calidad en los cultivos forrajeros, en orden aproximado de importancia para los nutricionistas, destacan la energía digestible, el potencial de consumo, el contenido de proteína, la fibra efectiva para el funcionamiento del rumen, la disponibilidad de minerales y la ausencia de compuestos anti nutricionales como malezas nocivas o mohos.

2.25 Alternativas de silo de maíz forrajero.

Entre las principales alternativas al ensilaje de maíz se encuentran otros cultivos como sorgo forrajero, raigrás, alfalfa en forma de enlaje y avena. También es posible incluir trébol blanco o rojo en este proceso. Para conservar adecuadamente estos forrajes, se emplean distintas estructuras de almacenamiento, como silos de torre, trincheras, búnkeres, fosas o bolsas plásticas (microsilos o silopress), que se ajustan a las condiciones de cada unidad de producción y favorecen la preservación del material (Núñez et al., 2010).

2.27 Cosecha optima de maíz para ensilado.

La cosecha ideal del maíz destinado a ensilado se alcanza cuando la planta entera contiene entre 32 % y 38 % de materia seca. Este nivel de humedad permite un equilibrio entre el rendimiento y la calidad nutricional, asegurando una fermentación adecuada y un ensilado de alta calidad. Aunque la línea de leche del grano puede utilizarse como guía, la forma más confiable de determinar el momento óptimo de cosecha es midiendo directamente el contenido de materia

seca de la planta entera.

2.28 Línea de leche de grano

La línea de leche es una franja blanca y opaca visible en la cara del grano, que avanza desde la punta hacia la base a medida que el grano madura.

2.29 Medición de la materia seca

La manera más exacta de identificar la cosecha óptima es mediante la medición directa del porcentaje de materia seca (MS) de la planta entera (Weiss, B. 2020).

- **Procedimiento:**

1. Corte cinco o más plantas representativas del campo, evitando las áreas periféricas.
2. Pique las plantas en trozos pequeños y mezcle bien la muestra.
3. Seleccione una submuestra representativa de aproximadamente 200 a 500 gramos.
4. Seque la submuestra en horno o microondas para calcular el porcentaje de materia seca.

2.30 Cosecha óptima de maíz con rastrojo y grano.

La cosecha óptima del maíz se determina cuando la planta ha alcanzado un balance adecuado entre el contenido de rastrojo y el grano, asegurando que tanto la cantidad como la calidad del material sean óptimas para su uso como forraje o ensilaje. En este momento, la planta entera presenta un nivel de materia seca que favorece la fermentación y permite conservar los nutrientes esenciales, como carbohidratos y proteínas, necesarios para la alimentación animal. Cosechar antes de alcanzar este

punto puede resultar en un forraje con bajo contenido de materia seca y mayor riesgo de deterioro, mientras que una cosecha tardía puede disminuir la digestibilidad de la fibra y afectar negativamente la calidad del ensilado. Por ello, es fundamental evaluar indicadores como la madurez del grano y el estado del rastrojo para determinar el momento ideal de recolección, garantizando así un alimento nutritivo, bien conservado y eficiente para el rendimiento productivo de los animales (Reyes, 1990).

2.31 Efecto de nitrógeno en las plantas.

El nitrógeno (N) es un nutriente esencial para las plantas C4 y para cualquier cultivo, ya que forma parte de la clorofila, proteínas y enzimas, favoreciendo el crecimiento, el desarrollo foliar y una fotosíntesis eficiente al mantener elevada la concentración de CO₂ alrededor de la enzima Rubisco. Aunque el suelo contiene nitrógeno en formas orgánicas y minerales, únicamente la fracción mineral puede ser absorbida por las plantas, y la cantidad disponible generalmente no es suficiente para cubrir las necesidades de los cultivos. Por ello, es necesario aplicar fertilizantes que aporten nitrógeno de manera adecuada. Una fertilización correcta incrementa la biomasa y el rendimiento del cultivo, mientras que tanto la deficiencia como el exceso de este nutriente pueden afectar negativamente el crecimiento, provocando plantas con desarrollo desequilibrado o una menor producción de granos (Habit, F., 2022).

2.32 Síntomas de deficiencias de nitrógeno de maíz forrajero.

Los síntomas de deficiencia de nutrientes en el maíz dependen del tipo de nutriente afectado y pueden observarse en distintas partes de la planta. Entre los signos más

comunes se incluyen clorosis, que es el amarillamiento de las hojas; necrosis, la muerte localizada del tejido vegetal; retraso en el crecimiento; y deformaciones en la estructura de la planta. La ubicación de estos síntomas varía según el nutriente: por ejemplo, la falta de nitrógeno se manifiesta principalmente en las hojas más viejas, causando un amarillamiento progresivo, mientras que la deficiencia de hierro afecta a las hojas jóvenes, produciendo clorosis entre las nervaduras. En el caso del potasio, los síntomas incluyen quemaduras o necrosis en los bordes de las hojas viejas, y la escasez de azufre provoca una palidez generalizada en hojas jóvenes y adultas. Otros nutrientes esenciales, como el magnesio, calcio y fósforo, también generan síntomas específicos que afectan tanto el crecimiento como la productividad del cultivo. Reconocer estas señales tempranas permite ajustar la fertilización y mejorar la salud de las plantas, asegurando un rendimiento óptimo del maíz (Cartagena, 2021).

2.33 Pérdidas de nitrógeno.

Las pérdidas de nitrógeno en el cultivo de maíz constituyen un factor crítico que afecta directamente la disponibilidad del nutriente y, por ende, el rendimiento final del cultivo (INTAGRI, 2017). Estos procesos ocurren principalmente a través de tres mecanismos:

- **Lixiviación:** El nitrato, que es altamente soluble en agua, puede desplazarse verticalmente a través del perfil del suelo y ser arrastrado fuera de la zona radicular por lluvias intensas o riego excesivo. Este proceso no solo disminuye la cantidad de nitrógeno disponible para la planta, sino que

también representa un riesgo ambiental, ya que el nitrato puede contaminar cuerpos de agua subterráneos y superficiales.

- **Desnitrificación:** En suelos con exceso de agua o drenaje insuficiente, ciertos microorganismos convierten el nitrato en gases nitrogenados como óxido nitroso y nitrógeno molecular, que se pierden hacia la atmósfera. Este proceso es más intenso en suelos compactados o en periodos prolongados de saturación, y reduce significativamente la eficiencia del fertilizante aplicado.
- **Volatilización:** El nitrógeno aplicado en forma de urea puede transformarse en gas amoníaco y perderse hacia la atmósfera, especialmente si el fertilizante se aplica sobre la superficie del suelo sin incorporarlo o si las condiciones son cálidas y húmedas. Esta pérdida es más frecuente en suelos alcalinos y representa una disminución directa del nitrógeno disponible para el cultivo.

Para minimizar estos efectos y mejorar la eficiencia del uso de nitrógeno, se recomienda emplear estrategias como el uso de fertilizantes de liberación controlada, inhibidores de ureasa, la incorporación del fertilizante al suelo, así como ajustar la dosis y el momento de aplicación de acuerdo con las condiciones climáticas y de humedad del suelo. Estas prácticas contribuyen a mantener un balance adecuado de nitrógeno en el suelo, favorecen un crecimiento equilibrado del maíz y ayudan a proteger el medio ambiente al reducir las pérdidas por lixiviación y emisiones gaseosas.

2.34 Eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN)

La eficiencia en el uso de nitrógeno (EUN) se define como la proporción del nitrógeno total que un cultivo absorbe y utiliza efectivamente en relación con el nitrógeno disponible proveniente tanto del suelo como de las aplicaciones de fertilizantes. Un valor elevado de EUN indica que la planta logra transformar la mayor parte del nitrógeno disponible en biomasa, ya sea en forma de materia seca, grano o forraje de calidad, mientras que un valor bajo refleja pérdidas significativas de nitrógeno debido a procesos como lixiviación, volatilización o desnitrificación. Estas pérdidas no solo disminuyen el rendimiento esperado, sino que también generan efectos económicos negativos por el desperdicio de fertilizante y repercusiones ambientales, como la contaminación de cuerpos de agua y la emisión de gases de efecto invernadero.

Para mejorar la EUN, se pueden implementar diversas estrategias. Entre ellas se encuentran la aplicación de dosis de fertilizante ajustadas a las necesidades específicas del cultivo y del suelo, la división de la fertilización en varias aplicaciones a lo largo del ciclo del cultivo para reducir pérdidas, y el uso de variedades genéticamente más eficientes en la absorción de nitrógeno. Además, prácticas de manejo del suelo, como la labranza mínima, la cobertura con cultivos de servicio y la incorporación de materia orgánica, contribuyen a conservar el nitrógeno disponible y a mejorar la estructura y la capacidad de retención de nutrientes del suelo. La combinación de estas medidas permite no solo optimizar la productividad del cultivo, sino también reducir el impacto ambiental y los costos asociados al uso de fertilizantes (Verhulst, François, Grahmann, Cox & Govaerts, 2015).

MATERIALES Y METODOS.

La comarca lagunera se encuentra ubicada en el norte-centro de México, compuesta por cinco municipios de Coahuila y diez municipios del estado de Durango. Recibe su nombre por las trece lagunas que antiguamente existieron en la zona, destacando la Laguna de Mayrán como la más grande de América Latina, la cual era alimentada por los ríos Nazas y Aguanaval. Esta región se encuentra comprendida entre los meridianos 102° 22' y 104° 47' de longitud oeste, y los paralelos 24° 22' y 26° 23' de latitud norte, con una altitud promedio de 1,139 metros sobre el nivel del mar.

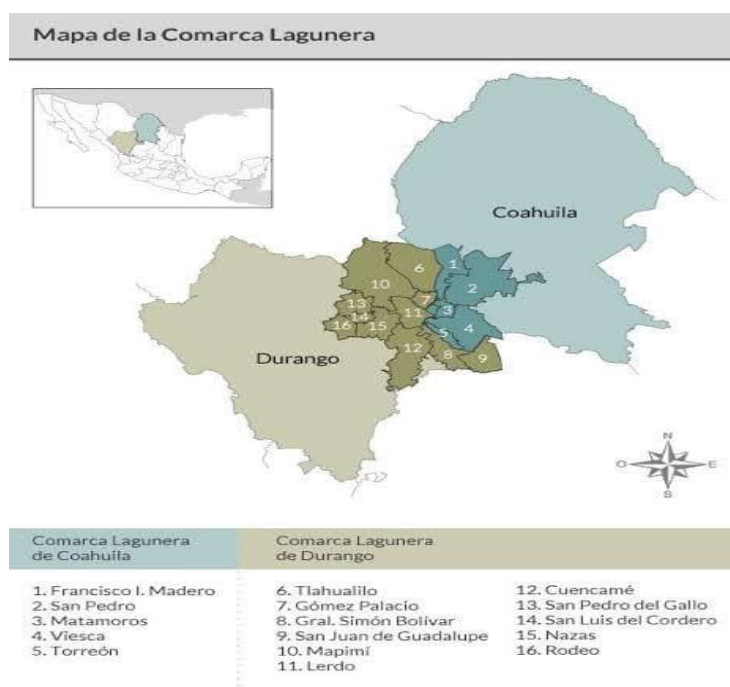


Figura 1. Municipios que conforman la comarca lagunera.

3.1 Localización del área experimental.

La parcela de estudio se encuentra en los campos experimentales de la universidad autónoma agraria Antonio narro unidad laguna, ubicado a $25^{\circ} 33'22''$ de latitud norte y $103^{\circ}22'14''$ de longitud oeste.



Figura 2. Localización del lote donde se realizó la investigación.

Modelo estadístico y diseño experimental.

3.2 Muestreo de suelo

Se realizó un muestreo compuesto que consta de 20 muestras recolectadas en el área experimental el día 2 de abril del 2025.

3.2 Análisis del suelo.

De acuerdo con los datos mostrados en el RECUADRO A, su suelo presenta deficiencia severa en: ningún elemento; con deficiencia media presenta: ningún

elemento; con deficiencia ligera presenta: Nitrógeno de nitratos. Es de esperar una alta probabilidad de respuesta a la adición del fertilizante, particularmente en cultivos que demandan en forma importante este nutrimento. En este caso se recomienda aplicar una dosis ligeramente superior a la dosis general de recomendación del cultivo. Su suelo presenta niveles de suficiencia nutrimental en los siguientes elementos: Materia orgánica, Magnesio extraíble, Cobre, fósforo disponible, Fierro, Zinc, Manganeso. Esto significa que el nutrimento se encuentra a niveles suficientes para la mayoría de los cultivos y es de esperar escasa respuesta a la aplicación de estos nutrimentos, solo en cultivos comprometidos (por ejemplo, sistema radicular limitado) y en situaciones muy excepcionales, cuando el cultivo en especial tiene una muy alta demanda por el nutrimento en cuestión y la meta de rendimiento es muy alta. Su suelo presenta niveles altos de los elementos: Potasio extraíble, lo que representa que la concentración de estos nutrientes es adecuada para la mayoría de los cultivos y que solo es necesario complementar con fertilización si su cultivo es muy demandante de estos nutrientes o se esperan rendimientos élite. Finalmente, su cultivo presenta niveles muy elevados de: Calcio extraíble, Azufre por lo que será necesario vigilar las interacciones antagónicas del: Calcio extraíble vs Magnesio, Fierro, Zinc, Sodio y Boro; Azufre vs Molibdeno. Su suelo presenta un potencial de hidrógeno (pH) de: 8.04 clasificándolo como un suelo Med. Alcalino representando que su suelo por efecto del pH puede tener los siguientes elementos no disponibles: ningún elemento con problemas de disponibilidad; con problemas de baja disponibilidad: Nitrógeno de nitratos, Fósforo disponible, Fierro, Manganeso, Boro, Zinc, Cobre y sin problemas de disponibilidad los siguientes elementos: Potasio extraíble, Calcio extraíble, Magnesio extraíble,

Azufre. Finalmente, su suelo requiere necesidad de encalado para corrección de pH: no requiere aporte de cal con el valor de pH reportado. De acuerdo con los resultados de conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo (CE) de: 2.678 dS/m ; su suelo puede clasificarse como: moderadamente salino representando que los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados, Debido a que los resultados de PSI se encuentran por debajo de 5, no existe la necesidad de aplicar calcio y/o yeso agrícola; de acuerdo con el resultado de conductividad eléctrica este es mayor a 1.800 dS/m, por lo que es recomendable considerar un sobre riego con fines de lavado del suelo, si riega con un agua con un valor de conductividad eléctrica aproximada al 50 por ciento de la conductividad reportada en el extracto saturado (1.339 dS/m) se necesitan un 23.3 porciento mas de lámina de riego programada, si su agua tiene un valor de conductividad eléctrica aproximada al 25 por ciento de la conductividad reportada en el extracto saturado (0.67 dS/m) se necesitan un 10.7 porciento mas de lámina de riego programada y finalmente, si su agua tiene un valor de conductividad eléctrica aproximada al 12.5 por ciento de la conductividad reportada en el extracto saturado (0.335 dS/m) se necesitan un 5.2 porciento mas de lámina de riego programada.

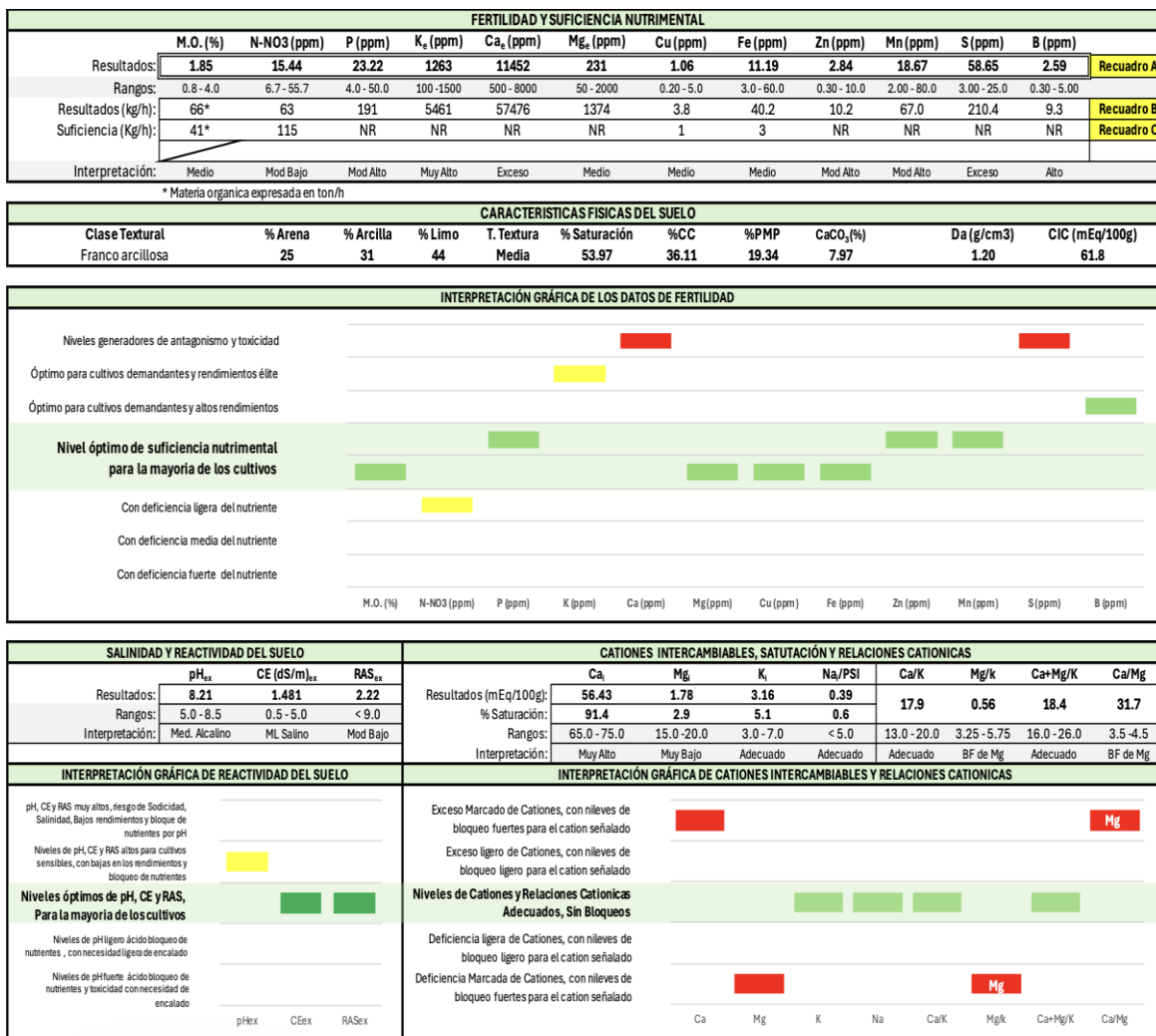


Figura 3. Análisis de suelo pre-siembra.

3.4 Labores agrícolas

Se realizó un rastreo doble con el propósito de asegurar un rastreo más preciso y completo. Se realizó con un tractor JOHN DEERE 5715 usando una rastra de 22 discos.



Figura 4. Labores iniciales de preparación de campo.

3.5 Parcela experimental.

La parcela consta de 5 repeticiones y 8 tratamientos con 5 metros de largo, y separación de dos metros entre cada repetición y 5 surcos con separación de .76 cm entre surco y surco dando un total de 37 metros de largo y 30.4 metros de ancho Como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 5. Imagen del campo experimental.

T1= Fertilización química sin inocular.

T2= Fertilización química sin inocular.

T3= Fertilización química inoculada con consorcio bacteriano.

T4= Fertilización química inoculada con micorrizas.

T5= Fertilización química al 50% más orgánica al 50%, e inoculada con consorcio bacteriano.

T6= Fertilización química al 50% más orgánica al 50%, e inoculada con micorrizas.

T7= Fertilización orgánica inoculada con consorcio bacteriano.

T8= Fertilización orgánica inoculada con micorrizas.

3.6 Tratamientos.

Se utilizaron 8 tratamientos con diferentes dosificaciones como químicas (280-80-00) tanto orgánicas (80 toneladas/ha. De estiércol).

3.7 Material vegetal.

Se utilizo el hibrido de maíz (*Zea Mays.*) P3026W.

La siembra se realizó el día 8 de mayo del 2025.



Figura 6. Híbrido utilizado.

3.8 Recolección de estiércol

El día 4 de mayo del 2025 se recolecto el estiércol de los corrales de CBR perteneciente a la UAAAN-UL.

3.9 Incorporación de estiércol

El estiércol se incorporó de acuerdo al tratamiento en los cuadrantes seleccionados de manera manual el día 6 de mayo del 2025.



Figura 7. Distribución del estiércol en el área experimental.

3.10 Instalación de sistema de riego

El sistema que se implementó en la parcela experimental fue el riego por goteo, se aplicó la cintilla de riego a lo largo de cada surco implementándola manualmente.



Figura 8. Implementación de la cintilla de riego.

3.11 Siembra y fertilización química

La siembra se llevó a cabo el día 8 de mayo del 2025 sembrando con una distancia entre surco y surco de .76 cm y con una densidad de 8 plantas por metro

3.12 Riegos

Los riegos se realizaban los días lunes con una duración de 2 horas, miércoles con una duración de 2 horas y viernes con duración de 3 horas. La cintilla que se utilizó fue de calibre 5000, 20 cm, 1.2lph.



Figura 9. Riego en función.

3.13 Manejo de plagas

El control de plagas se realizó con el siguiente producto:

Se aplicó demolition y raptor, se aplicó una dosis de 100-200 ML/HA con dos aplicaciones con intervalos de 7 días principalmente se aplica cuando se observa las primeras larvas de cogollero.

3.14 Manejo de malezas

El manejo de malezas se llevó acabo de la siguiente manera:

Se aplico Sanson 60D para el control del zacate Johnson y zacate de agua, con una dosis de .5 – 1.0 litros por hectárea esta recomendación es para post-emergencia y durante el cultivo

También se aplicaron un fertilizante de micronutrientes “IONGro-Complex con una dosis recomendada de 2-4L por hectárea

3.15 Cosecha

El día 12 de agosto del 2025 se llevó a cabo la cosecha donde se cortaban con machete los tres surcos centrales para posteriormente pesarlos con una báscula así haciendo los cortes de todos los tratamientos y todas las repeticiones.



Figura 10. Corte y pesaje el día de cosecha.

3.16 Materia seca

El procedimiento de la materia seca se realizó cortando tres plantas elegidas al azar donde se cortaron y picaron para contenerlas en una bolsa de papel canela donde se obtuvieron 40 muestras una muestra por cada tratamiento y por cada repetición contando con un 31% de materia seca.



Figura 11. Picado de planta de maíz.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Rendimientos.

El rendimiento del maíz fue lo esperado y afectado por los distintos tratamientos distribuidos en la parcela ya que cada tratamiento tubo rendimientos mejores, más los tratamientos que contenían las bacterias (Cuadro 1).

Cuadro 1 Comparación de medias por tratamiento para el rendimiento de Forraje verde (FV), forraje en seco (FS) y altura de planta.

Tratamientos	Materia Verde	Forraje Seco	Altura
	Kg ha ⁻¹	Kg ha ⁻¹	Cm
T1	53426 a	16562 a	324 a
T3	59171 a	18343 a	326 a
T5	56259 a	17440 a	324 a
T7	65796 a	20397 a	325 a

Medias con las mismas letras entre columnas, son significativamente iguales. (Tukey.0.05)

T1- Fertilización sin inocular, T3- Fertilización con consorcio bacteriano, T5- Fertilización química al 50% más Fertilización orgánica al 50%, e inoculada con consorcio bacteriano T7- fertilización orgánica inoculada con consorcio bacteriano

Por otro lado, el tratamiento T7 fue el mejor establecido ya que supero los 65796 kg ha⁻¹. Se ha reportado que la implementación en la inoculación de bacterias fijadoras de nitrógeno en semillas de maíz puede incrementar el rendimiento (Jiang 2022). Desde el punto de vista agropecuario, se requiere mayor tonelaje por hectárea, ya que es lo esperado, es producir más forraje verde en poca área sembrada.

Los resultados que se obtuvieron indican que el uso del T7 que es fertilización orgánica con consorcio bacteriano incrementan el rendimiento de forraje verde por hectárea (Cuadro 1).

Similares resultados fueron encontrados por Galindo F. S.(2024), en este estudio evaluaron el efecto de aplicar simultáneamente Azospirillum brasilense y Bacillus

subtilis junto con distintas dosis de nitrógeno, considerando variables como el desarrollo de raíces y parte aérea, la eficiencia en el uso del nitrógeno, la actividad fotosintética, la acumulación de este nutriente, la biomasa generada y el rendimiento en grano. Los resultados mostraron que la inoculación con microorganismos, combinada con una fertilización nitrogenada adecuada, contribuye significativamente a mejorar la producción del cultivo del maíz.

Diversos estudios han demostrado que la inoculación con bacterias fijadoras de nitrógeno, como *Azospirillum brasilense*, puede mejorar de manera significativa el rendimiento del maíz destinado a forraje. En el trabajo evaluado por Skonieski y colaboradores, la aplicación de esta bacteria interactuó positivamente con los híbridos y las dosis de nitrógeno, logrando aumentos notables en la producción total de planta. En un ciclo agrícola, la inoculación elevó el rendimiento del híbrido AS-1572 en más del 6%, mientras que en otro ciclo el incremento para el híbrido Defender superó el 16%. Estos resultados muestran que la presencia de *A. brasiliense* favorece el crecimiento vegetativo, la captación de nutrientes y, en consecuencia, la producción de biomasa fresca para ensilaje, lo que evidencia su potencial como herramienta biológica para mejorar la productividad del maíz forrajero bajo distintos niveles de fertilización nitrogenada (Skonieski 2017).

El uso de bacterias fijadoras de nitrógeno también ha mostrado beneficios importantes en el rendimiento del maíz bajo diferentes manejos de fertilización. En la investigación realizada por Condori y su equipo, la inoculación con *Azospirillum brasilense* mejoró el desempeño del cultivo tanto en crecimiento como en productividad, incluso cuando se aplicaron dosis reducidas de fertilizante nitrogenado. Los autores señalan que la bacteria contribuyó a un mayor desarrollo

radicular, mejor aprovechamiento del nitrógeno disponible y una mayor acumulación de biomasa. Estas mejoras se reflejaron en un aumento general del rendimiento y en una mejor calidad del forraje producido. Los resultados confirman que la integración de *A. brasilense* como inoculante puede ser una estrategia efectiva para optimizar la producción de maíz forrajero y disminuir la dependencia del nitrógeno sintético.

Debido a la implementación de consorcio bacteriano hubo un aumento en todas las propiedades químicas del suelo (Cuadro 2). Cuando el control que fue el análisis antes de la siembra se mantenían bajos en cada propiedades químicas del suelo, por ende el T7 fue el mejor establecido y que dejo mayor cantidad de propiedades químicas en el suelo como fue la MO, CE Y P duplicando los residuos que hubo antes de la siembra, en el caso de N con el análisis del control inicio con 15.44 ppm y al concluir el cultivo se elevó hasta 111.97 ppm el incremento aproximado fue de 625% dando ver que el uso de consorcio bacteriano fue el mejor tratamiento acompañado con una fertilización 100% orgánica (Cuadro 2).

Cuadro 2 Propiedades físicas del suelo.

TRATAMIENTO	MO%	CE (dS/m) _{ex}	N (ppm)	P(ppm)
T7	3.32	6.52	111.97	44.36
T5	2.36	2.637	57.11	28.19
T3	2.03	3.406	109.95	10.04
T1	2.28	1.864	32.11	15.14
CONTROL	1.85	1.481	15.44	23.22

T1- Fertilización sin inocular, T3- Fertilización con consorcio bacteriano, T5- Fertilización química al 50% más Fertilización orgánica al 50%, e inoculada con consorcio bacteriano T7- fertilización orgánica inoculada con consorcio bacteriano

Diversos estudios han señalado que la aplicación de consorcios bacterianos puede mejorar de forma notable la fertilidad del suelo durante el ciclo del cultivo. Investigaciones como la de Hungria y Nogueira (2022) reportan que, al comparar suelos analizados antes de la siembra con aquellos tratados con inoculantes microbianos, se observa un incremento significativo en parámetros como materia orgánica, conductividad eléctrica y disponibilidad de fósforo. Los autores destacan que cuando el suelo inicial presenta valores bajos, el tratamiento biológico suele generar aumentos superiores al doble respecto al punto de partida. En el caso del nitrógeno, se ha documentado que la actividad conjunta de bacterias fijadoras y solubilizadoras puede elevar de manera muy marcada su concentración, superando incrementos porcentuales superiores al 500% en algunos escenarios experimentales, debido a la fijación biológica y a la mineralización acelerada de residuos orgánicos. Estos resultados demuestran que los consorcios bacterianos, especialmente cuando se combinan con fertilización orgánica, pueden transformar la disponibilidad de nutrientes y mejorar considerablemente la calidad química del suelo durante la producción de maíz.

En un ensayo de campo con *Zea mays*, la co-inoculación con bacterias fijadoras/promotoras de crecimiento (por ejemplo, *Azospirillum brasilense* junto con *Bacillus subtilis*) incrementó la eficiencia del uso del nitrógeno, promoviendo mayor acumulación de N en la planta, una mejor fotosíntesis, mayor eficiencia en el uso del agua y crecimiento superior de raíz y parte aérea. Estos efectos se tradujeron en una producción más elevada de maíz, especialmente bajo condiciones de baja disponibilidad inicial de nitrógeno, lo que sugiere que los consorcios microbianos pueden compensar parcialmente los fertilizantes nitrogenados tradicionales.

El rendimiento de toneladas en seco fue buen prospecto ya que superaron las 15 toneladas por hectárea cuando el tratamiento 7 fue el mejor ya que supero los 20,000 kg de forraje seco dando un resultado gracias a las bacterias fijadoras de nitrógeno y promotoras de crecimiento (figura 12).



Figura 12. Rendimiento del maíz en seco.

T1- Fertilización sin inocular, T3- Fertilización con consorcio bacteriano, T5- Fertilización química al 50% más Fertilización orgánica al 50%, e inoculada con consorcio bacteriano T7- fertilización orgánica inoculada con consorcio bacteriano

Estudios recientes han demostrado que la integración de bacterias fijadoras de nitrógeno y promotoras del crecimiento puede elevar significativamente la producción de materia seca en maíz forrajero. Por ejemplo, Arzanesh y colaboradores (2011) reportaron que al inocular el cultivo con un consorcio microbiano compuesto por *Azospirillum*, *Azotobacter* y *Bacillus*, los rendimientos superaron de manera notable a los tratamientos convencionales, alcanzando incrementos sustanciales en la biomasa aérea. Los autores señalan que la mayor disponibilidad de nitrógeno fijado biológicamente, junto con la estimulación

hormonal ejercida por estas bacterias, favoreció un crecimiento más vigoroso y la acumulación de forraje seco en niveles superiores a los obtenidos sin inoculación. Este comportamiento confirma que los consorcios bacterianos pueden desempeñar un papel decisivo en maximizar el rendimiento del maíz forrajero, especialmente cuando se busca potenciar la producción por hectárea (Arzanesh 2011).

En un experimento de campo reciente, la aplicación conjunta de bacterias fijadoras/promotoras como *Azospirillum brasilense* (y en algunos tratamientos combinados con otras bacterias) mostró incrementos de rendimiento de maíz que oscilaron entre 8 % y 21 % respecto al testigo sin inocular, lo que se traduce en ganancias superiores a 1 t/ha en muchos casos. Esto sugiere que estos inoculantes microbianos pueden servir como alternativa eficaz para mejorar la producción de maíz, especialmente cuando se usan en conjunción con fertilización moderada o reducida, favoreciendo una producción más sustentable y eficiente (Galindo, F. S.)

En un estudio de campo de *Azospirillum argentinense* (cepa Az19) se demostró que la inoculación de este fijador de nitrógeno puede mejorar notablemente el rendimiento de *Zea mays* (maíz) incluso bajo condiciones de estrés hídrico. Los autores registraron que las plantas inoculadas mantuvieron un mejor desarrollo y sufrieron una reducción menor en la productividad cuando enfrentaron déficit de agua en etapas críticas, lo que resultó en una mayor producción comparada con las plantas no inoculadas. Este efecto favorable sugiere que la bacteria incrementa la resiliencia del cultivo, optimizando la absorción de nutrientes y promoviendo un mejor crecimiento incluso con menos recursos, lo que resulta especialmente útil en zonas con limitaciones de agua (García 2023).

El rendimiento del maíz en verde con una. Materia seca del 32% se obtuvo un incremento esperado llegando hasta los 65,000 kilos por hectárea con el tratamiento 7 que se establecido con un consorcio bacteriano cuando el tratamiento 1 tuvo un rendimiento de 54,426 dando que el tratamiento 7 tuviera un incremento del 21% dando un mejor resultado (Figura 13).

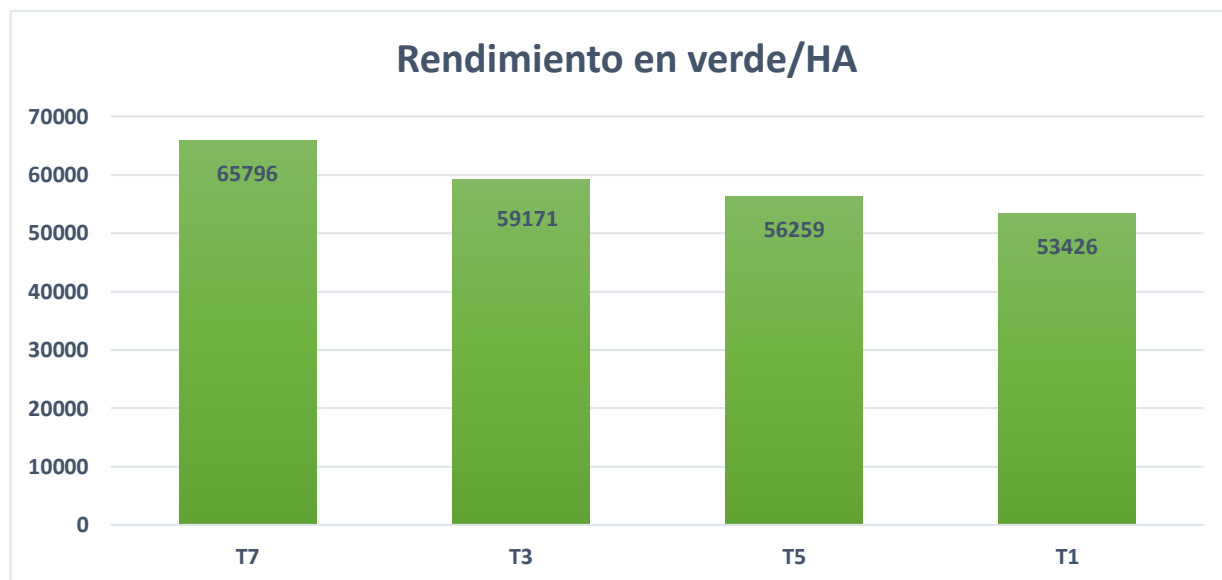


Figura 13. Rendimiento del maíz en verde.

T1- Fertilización sin inocular, T3- Fertilización con consorcio bacteriano, T5- Fertilización química al 50% más Fertilización orgánica al 50%, e inoculada con consorcio bacteriano T7- fertilización orgánica inoculada con consorcio bacteriano

En evaluaciones recientes sobre producción de maíz forrajero, se ha observado que los tratamientos inoculados con consorcios bacterianos pueden incrementar notablemente el rendimiento en verde, aun cuando la planta presenta contenidos de materia seca cercanos al 30–32%. En el estudio de Serrapica et al. (2025), los autores reportaron que la integración de biofertilizantes microbianos elevó de manera considerable la producción total de biomasa por hectárea, superando de forma clara a los tratamientos sin inocular. Estos consorcios, compuestos por

bacterias fijadoras y promotoras del crecimiento, favorecieron un desarrollo más robusto del cultivo, lo que permitió alcanzar valores de rendimiento significativamente más altos y confirmar el potencial de los inoculantes microbianos como estrategia para elevar la productividad del maíz forrajero.

En un experimento con inoculación conjunta de bacterias promotoras del crecimiento incluyendo cepas de *Azospirillum* y *Bacillus* se observó un aumento significativo en la biomasa aérea y radicular del maíz, así como una mejora en la absorción de nutrientes (N, P, K) y en la eficiencia en el uso del nitrógeno. Las plantas co-inoculadas desarrollaron mayor masa seca del sistema aéreo y de raíces respecto al testigo no inoculado, lo que sugiere un claro efecto positivo del consorcio sobre la producción de materia seca. Esto demuestra que los tratamientos microbianos pueden incrementar la productividad total del cultivo de maíz y mejorar la fertilidad y salud del suelo, favoreciendo una producción más sostenible (Abreu 2022).

La inoculación de plantas de *Zea mays* con cepas nativas de bacterias promotoras de crecimiento vegetal (PGPB) aisladas de la rizosfera — por ejemplo, del género *Bacillus* u otras bacterias nativas — mostró aumentos muy significativos en varios parámetros de crecimiento: altura de planta, peso seco de brotes entre 2.4 a 2.9 veces respecto al testigo, y peso seco de raíces casi duplicado. Estos incrementos en biomasa aérea y radical evidencian que la inoculación con bacterias rizosféricas intensifica la absorción de nutrientes, estimula el desarrollo radicular y acelera la acumulación de materia seca, lo que sugiere un potencial alto para mejorar la producción total de maíz cuando se aplica un buen manejo agronómico (Amézquita 2024).

CONCLUSIONES.

La implementación de las bacterias fijadoras de nitrógeno y promotoras del crecimiento vegetal, en combinación con una fertilización orgánica, demostró ser una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento del cultivo y favorecer el incremento de las propiedades físicas del suelo. Esta sinergia biológica y orgánica no solo optimizó la disponibilidad de nutrientes y la eficiencia en su aprovechamiento, sino que también contribuyó a una estructura edáfica más estable y funcional.

VI.BIBLIOGRAFÍA.

Granados-Niño, J. A., Sánchez-Duarte, J. I., Ochoa-Martínez, E., Rodríguez-Hernández, K., Reta-Sánchez, D. G., & López-Calderón, M. J. (2022). Efecto del ciclo de producción sobre el potencial de rendimiento y calidad nutricional del maíz forrajero en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(spe28), 123-136. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i28.3276>

Gobierno de México. (s. f.). *Maíz: cultivo de México*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-cultivo-de-mexico>

Gobierno de México. (2020, 30 de junio). *Maíz blanco o amarillo es cultivo de tradición y desarrollo*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/maiz-blanco-o-amarillo-es-el-cultivo-de-tradicion-y-desarrollo>

Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). (s. f.). *Morfología y órganos reproductores*. <https://www.sag.gob.cl/curso-de-semillas/2-morfologia-y-organos-reproductores>

Fidecomisos Instituidos en relación con la agricultura. (2024) Panorama agroalimentario <https://share.google/Z9IAWSsA3fW0MlkoG>

Simón, M. R., Golik, S. I., Gerard, G., Fleitas, M. C., & Zuluaga, M. S. (Eds.). (2020). *Cereales de verano*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La

Plata. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/162758/CONICET_Digital_Nro.1bfc4eb3-ba85-4000-b53c-edd7319ad777_D.pdf?sequence=9&isAllowed=y

Figuerola-Viramontes, U. (2010). Estiércol de bovino lechero sobre el rendimiento y recuperación aparente de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana*, 28(4), 355–362. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792010000400008&script=sci_abstract&lng=pt

Morales-Morales, E. J. (2019). Urea (NBPT): una alternativa en la fertilización nitrogenada. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1875–1886. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342019000801875#:~:text=La%20urea%20de%20liberación%20lenta%20\(NBP T\)%20es%20una%20alternativa%20que,y%20la%20conservación%20del%20ambiente.&text=Los%20autores%20agradecen%20al%20CONACYT,Naturales%20Edgar%20Javier%20Morales%20Morales.](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342019000801875#:~:text=La%20urea%20de%20liberación%20lenta%20(NBP T)%20es%20una%20alternativa%20que,y%20la%20conservación%20del%20ambiente.&text=Los%20autores%20agradecen%20al%20CONACYT,Naturales%20Edgar%20Javier%20Morales%20Morales.)

Zulueta-Rodríguez, R., Sánchez, J. I., & González, A. (2020). Respuesta del cultivo de maíz a la bio-inoculación y fertilización química reducida en campo. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 597–607. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v38n3/2395-8030-tl-38-03-597-en.pdf>

Herrera, S. R. 1998. El papel de la asistencia técnica en la eficiencia productiva de los establos lecheros. IV ciclo de conferencias internacionales sobre nutrición y manejo, LALA. Torreón, Coah, México. PP 86-107

González, M., & Díaz, F. (s. f.). *Manejo, rendimiento productivo y calidad del maíz forrajero*.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). *Grain and forage maize*.

Corral, J. A. R., Flores López, H. E., Ramírez Díaz, J. L., & González Eguiarte, D. R. (2002). Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia*.

García, M., & Watson, C. E. (2003). Herencia de la resistencia al acame de raíces en maíz dulce (*Zea mays* L.). *Revista Científica UDO Agrícola*, 3(1), 24–33.

FAO. (s. f.). *Fisiología del maíz tropical*.
<https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s05.htm>

FAO. (s. f.). Acidez del suelo y alta saturación de aluminio: Efectos sobre la disponibilidad de nutrientes y estrategias de manejo <https://www.fao.org/4/x7650s/x7650s12.htm>

Vega, M. S. (2019). Diversidad genética en accesiones de 10 razas mexicanas de maíz de altitudes intermedias. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(2), 263–276.
<https://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/index.php/agricolas/article/view/732/2172>

Núñez H., G., F. Contreras y R. Faz C. 2003. Características agronómicas importantes en híbridos de maíz para forraje con alto valor energético. *Téc. Pecu. Méx.* 41(1):37-48

ANKOM Technology. (s. f.). *Análisis de fibra cruda y detergente*.

<https://www.ankom.com/applications/crude-and-detergent-fiber-analysis>

García, Gregorio. 2008. Cálculo de la energía neta para lactación y su predicción desde el punto de vista de la fibra. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Santo Domingo, DO. 27p.

Garzón Pérez, C., & Ortiz Rubio, M. de los Á. (s. f.). *Componentes de los alimentos (Agua y Materia Seca)*.

https://suayed.cuautitlan.unam.mx/uapas/12_Componentes_alimentos/index.html

ScienceDirect. (s. f.). *Forage quality*. En Topics | Agricultural and Biological Sciences.

<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/forage-quality>

Núñez, H. G., Payán, G. J. A., Peña, R. A., González, C. F., Ruiz, B. O., & Arzola, A. C. (2010). *Caracterización agronómica y nutricional del forraje de variedades de especies anuales en la región norte de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*.

Sulc, M., Thomison, P., & Weiss, B. (2020). *Corn silage harvest timing*. Agronomic Crops Network. <https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2020-28/corn-silage-harvest-timing>

Reyes, C. (1990). *El maíz y su cultivo* (1.^a ed.). AGT Editor.

Habit, F. (2022). *La gran importancia del nitrógeno en las plantas*. Agrovitra. <https://www.agrovitra.com/media/2022/12/Importancia-del-Nitrogeno-en-las-plantas-Fernanda-Habit.pdf>

Zambrano, J. L., Cartagena, Y., Carrillo, M., Sangoquiza, C., Durango, W., Parra, R., & Campaña, D. (2021). *Deficiencias nutricionales en maíz*. Programa Nacional de Maíz y Centro KOPIA-Ecuador. Recuperado de <https://repositorio.iniap.gob.ec/server/api/core/bitstreams/fc5d1001-1fd0-47dc-af40-9ae5ac31e0b3/content>

INTAGRI. (2017). *Las 7 maravillas del alto rendimiento en maíz, parte I*. <https://www.intagri.com/articulos/cereales/siete-maravillas-alto-rendimiento-maiz-parte-clima-nitrogeno-hibrido>

Verhulst, N., François, I., Grahmann, K., Cox, R., & Govaerts, B. (2015). *Eficiencia del uso de nitrógeno y optimización de la fertilización nitrogenada en la agricultura de conservación*. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo

(CIMMYT). <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/d18c969e-d5ff-4d4a-8358-e195a8977b61/content>

Skonieski, F. R., Silva, J. H. S., Nörnberg, J. L., Takiya, C. S., Schogor, A. L. B., & Santos, G. T. (2017). *Effect of seed inoculation with Azospirillum brasilense and nitrogen fertilization rates on maize plant yield and silage quality*. **Revista Brasileira de Zootecnia**, 46(9), 714–722.

Condori, R., Komatsu, R. A., Ortiz, A., & Araújo, A. S. F. (2024). *Inoculation with Azospirillum brasilense as a strategy to improve yield and quality in maize*. **Agronomy**, 14(2), 356. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020356>

Hungria, M., & Nogueira, M. A. (2022). *Microbial inoculants to enhance plant nutrition and soil health: Advances with Azospirillum and multifunctional bacterial consortia*. **Agronomy**, 12(4), 890. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040890>

Zhang, X., et al. (2024). *Unveiling contribution and fate of nitrogen with ^{15}N techniques affected by microbial co-inoculation on field-grown maize: A novel approach to optimize N-fertilizer use efficiency*. (Publicación en prensa / revista indexada).

Arzanesh, M. H., Alikhani, H. A., Khavazi, K., Rahimian, H. M., & Miransari, M. (2011). *Wheat (and maize) growth enhancement using co-inoculation with*

Azospirillum, Azotobacter and Bacillus. **Plant, Soil and Environment**, 57(1), 21–25.

Galindo, F. S., Pagliari, P. H., da Silva, E. C., et al. (2024). *Impact of nitrogen fertilizer sustainability on corn crop yield: the role of beneficial microbial inoculation interactions*. BMC Plant Biology, 24, 268. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04971-3>

García, J. E., Ruiz, M., Maroniche, G. A., Creus, C., Puente, M., Zawoznik, M. S. (2023). *Inoculation with Azospirillum argentinense Az19 improves the yield of maize subjected to water deficit at key stages of plant development*. Revista Argentina de Microbiología, 55(3), 255–261.

Serrapica, M., Niro, S., Sabia, E., Masucci, F., & Vinale, F. (2025). *Sustainable maize forage production: Effect of organic amendments and microbial biofertilizers*. Sustainability, 17(2), 640.

Amezquita-Avilés, C. F.; Coronel-Acosta, C. B.; Villalobos, S. de los S.; Santoyo, G.; Parra-Cota, F. I. (2024). *Characterization of native plant growth-promoting bacteria (PGPB) and their effect on the development of maize (Zea mays L.)*. Biotecnia, 24(1). DOI: 10.18633/biotecnia.v24i1.1353