



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS MEDIANTE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN TEXCOCO, MÉXICO

JOSÉ LUIS MEZA DISCUA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO

2023



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

La presente tesis titulada: **RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS MEDIANTE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN CULTIVO DE MAÍZ EN TEXCOCO, MÉXICO**, realizada por el estudiante: **JOSÉ LUIS MEZA DISCUA**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. CARLOS RAMÍREZ AYALA

ASESOR


DR. MARTÍN A. BOLAÑOS GONZÁLEZ

ASESOR


DR. ROBERTO ASCENCIO HERNÁNDEZ

ASESOR


DR. AMALIO SANTACRUZ VARELA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, agosto de 2023

RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS MEDIANTE ENMIENDAS ORGÁNICAS EN CULTIVO DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN TEXCOCO, MÉXICO

José Luis Meza Discua, D.C.
Colegio de Posgraduados, 2023

RESUMEN

La salinidad en los suelos es un factor abiótico que limita el rendimiento de los cultivos al restringir la absorción de agua y nutrientes en la planta. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto de enmiendas orgánicas en varias propiedades químicas de suelos salinos y en el rendimiento de cultivo de maíz (*Zea mays* L.), cultivar CP-HS2, en agricultura de secano en suelo lacustre, Solonchak del valle de Texcoco, México. El experimento se realizó en el ciclo primavera-verano de 2021 en las siguientes coordenadas: longitud -98.907222 y latitud: 19.455000, altitud 2220 m, la precipitación del periodo del estudio fue 506 milímetros. El diseño experimental fue de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Los factores de variación fueron salinidad en tres niveles (alta 8.4, media 5.3 y baja 2.7 dS m⁻¹ respectivamente), enmiendas usadas (vermicomposta, biochar y composta de vacuno), y las dosis de 5 y 10 t ha⁻¹, más un testigo (control) sin enmienda. Las unidades experimentales fueron en de 8 × 3,75 m con seis hileras separadas 0,80 m. Se realizaron muestreos del suelo antes y al final del cultivo y se determinó CE, pH, y M.O y RAS. Además, se realizaron muestro para evaluar el rendimiento de grano. Los resultados indicaron que con el biochar aplicado en suelos de alta salinidad, el rendimiento fue de 4.63 t ha⁻¹, la CE se redujo en un 93 %, el pH se redujo de 9,9 a 8,3 y la MO aumentó en un 119 %. En suelos con salinidad media aplicando composta de vacuno el rendimiento fue 4,67 t ha⁻¹, la CE se redujo 88%, el pH disminuyó de 9,1 a 8,3 y la MO aumentó 160%. En suelos de baja salinidad aplicando composta de vacuno el rendimiento fue de 4,6 t ha⁻¹, la CE se redujo en 44%, el pH se redujo a 8,1 y la MO aumentó en 121%. El estudio demostró los beneficios de las enmiendas orgánicas para la recuperación de los suelos salinos.

Palabras claves: Salinidad, conductividad eléctrica, materia orgánica, tolerancia, rendimiento.

RECOVERY OF SALINE SOILS THROUGH ORGANIC AMENDMENTS FOR CORN (*Zea mays* L.) CULTIVATION IN TEXCOCO, MEXICO

José Luis Meza Discua, D.C.
Colegio de Posgraduados, 2023

ABSTRACT

Soil salinity is an abiotic factor that limits crop yield by restricting plant uptake of water and nutrients. The objective of the study was to evaluate the effect of organic amendments on various chemical properties of saline soils and on the yield of maize (*Zea mays* L.), cultivar CP-HS2, in rainfed agriculture in lacustrine soil, Solonchak from the Texcoco valley, Mexico. The experimental site was carried out in the spring-summer cycle of 2021 and was located at the coordinates: longitude -98.907222 and latitude: 19.455000, altitude 2220 m, the precipitation of the period was 506 millimeters. The experimental design was a randomized complete block, with three repetitions. The variation factors were salinity at three levels (high 8.4, medium 5.3 and low 2.7 dS/m respectively), amendments (vermicompost, biochar and bovine compost), and the doses of 5 and 10 t/ha, plus a control without amendment. The experimental units were 8 × 3.75 m with six rows separated by 0.80 m. Soil samples were taken before and at the end of the crop and EC, pH, and OM and RAS were determined. The method of corn components determined the grain yield. The results indicated that with the biochar applied in high salinity soils, the yield was 4.63 t/ha, the EC was reduced by 93%, the pH improved (from 9.9 to 8.3) and the OM increased by 119%. In soils with medium salinity, when applying cattle compost, the yield was 4.67 t/ha, the EC was reduced by 88%, the pH improved (from 9.1 to 8.3) and the OM increased by 160%. In low salinity soils, when applying cattle compost, the yield was 4.6 t/ha, the EC was reduced by 44%, the pH improved to 8.1 and the OM increased by 121%. The study demonstrated the benefits of organic amendments for the recovery of saline soils

Keywords: Salinity, organic amendments, organic matter, tolerance, yield.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento es en primer lugar al Dios Creador, quien guía mi vida diaria y me dirige por el único camino hacia Él. Agradezco también al Hijo de Dios, Jesucristo, mi salvador personal ya que sus bendiciones son nuevas cada mañana.

Agradezco al CONACYT por haberme apoyado económicamente en mis estudios de doctorado en Hidrociencias en el Colegio de Posgraduados, Campus Montecillo, México.

Un agradecimiento grande a mi consejo particular de profesores del Posgrado en Hidrociencias del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Asesores: Dr. Carlos Ramírez Ayala, Dr. Martín Alejandro Bolaños González, Dr. Roberto Ascencio Hernández y Dr. Amalio Santacruz Varela, por su guía y enseñanza académica dentro y fuera del aula de clase.

Agradezco a toda mi familia por su apoyo y ánimo constante en mis estudios.

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón esta tesis a Dios por darme la perseverancia, salud, fortaleza y bendición en todo momento y permitirme alcanzar este éxito académico.

Dedico también esta tesis a la memoria de mis padres Florencia Discua de Meza (QDDG) y Raúl Meza Martínez (QDDG) por su amor, paciencia, humildad, consejos y quienes me enseñaron siempre a andar por el camino del bien.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	x
ABREVIATURAS	xi
I. INTRODUCCION	1
1.1. Planteamientos del problema	2
1.2. Justificación	3
II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	5
2.1. Hipótesis	5
2.2 Objetivo general	5
2.3. Objetivos específicos	5
III. REVISION DE LITERATURA	6
3.1. La perspectiva mundial de la salinidad en la agricultura	6
3.1.1. Impacto de la salinidad del suelo en la agricultura y ecología	7
3.1.2. Efectos del cambio climático en la salinidad del suelo	8
3.2. Origen de los suelos salinos	9
3.2.1. Clasificación de los suelos salinos	10
3.2.2. Medición de la salinidad en el suelo	12
3.2.3. Origen de los suelos salinos del Lago de Texcoco, México	14
3.3. Efecto de la salinidad en las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo	14
3.4. Efecto de la salinidad en las plantas	16
3.4.1. Mecanismos de resistencia de las plantas contra la salinidad	17
3.4.2. Efectos de la salinidad en el rendimiento de los cultivos agrícolas	18
3.5. El cultivo de maíz en el mundo	18
3.5.1. Afectaciones de la salinidad en rendimiento del cultivo del maíz	20
3.5.2. Etapas vegetativas y reproductivas del maíz	21
3.5.3. Condiciones para un alto rendimiento en el cultivo de maíz	23
3.6. El cultivo de maíz en México	24
3.6.1. El cultivo de maíz nativo y transgénico en México	26
3.7. Manejo y recuperación de los suelos salinos	28

3.8. Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas a suelos salinos	31
3.8.1. Aplicación del biochar (biocarbón).....	32
3.8.2. Aplicación de vermicomposta.....	33
3.8.3. Aplicación de la composta de ganado vacuno.....	34
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	36
4.1. Localización del área experimental	36
4.2. Selección de las tres enmiendas orgánicas	37
4.3. Descripción de los tratamientos	37
4.4. Características del suelo de las parcelas experimentales.....	37
4.5. Preparación del terreno y siembra	37
4.6. Aplicación de las enmiendas orgánicas	38
4.7. Diseño del experimento.....	38
4.8. Análisis del suelo y de las enmiendas orgánicas	38
4.9. Prácticas agronómicas del cultivo en las parcelas experimentales.....	39
4.10. Cálculo del rendimiento del cultivo de maíz.....	39
4.11. Análisis estadístico	40
V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	41
5.1. Análisis de varianza del rendimiento del cultivo de maíz	41
5.2. Efecto de las enmiendas orgánicas y tratamientos en el rendimiento del cultivo	41
5.3. Efecto de las enmiendas orgánicas en varias propiedades químicas del suelo	43
5.4. Efecto de las enmiendas orgánicas en la relación de absorción de sodio (RAS)	43
5.5. Efecto de las enmiendas en la capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	44
5.6. Efecto de las enmiendas orgánicas en la reducción de la conductividad eléctrica	
45	
5.7. Efecto de las enmiendas en la disminución del pH del suelo.....	47
5.8. Efecto de las enmiendas en el aumento de la materia orgánica	50
5.9. Cálculo de los grados días de crecimiento del maíz	51
VI. CONCLUSIONES	52
VII. RECOEMNDACIONES.....	53
VIII. LITERATURA CITADA.....	54
ANEXOS	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Compuestos comunes de la sal (cationes y aniones)	9
Cuadro 2. Producción mundial de maíz (1000 toneladas métricas)	19
Cuadro 3 . Análisis de varianza para rendimiento de grano.	41
Cuadro 4. Rendimiento de grano en los tratamientos de enmienda y dosis aplicadas.	42
Cuadro 5. Parámetros del suelo antes y al final del cultivo de maíz.	43
Cuadro 6. Análisis de varianza de la conductividad eléctrica en el estudio de aplicación de enmiendas en terreno salino.	46
Cuadro 7. Reducción de conductividad eléctrica por enmiendas aplicadas con respecto al testigo.	46
Cuadro 8. Análisis de varianza (ANOVA) en el pH del suelo	48
Cuadro 9. Disminución del pH en los niveles de salinidad como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.	48
Cuadro 10. Disminución del pH con respecto al testigo por efecto de los tratamientos de enmiendas y dosis aplicadas.	49
Cuadro 11. Análisis de varianza de la materia orgánica.....	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Países afectados por la salinidad del suelo.....	1
Figura 2. Etapas vegetativas y reproductivas del maíz.....	22
Figura 3 . El gusano de alambre	27
Figura 4. El gusano cogollero	28
Figura 5 . Localización del área experimental.....	36
Figura 6. Rendimiento del cultivo de maíz en los niveles de salinidad. SA: salinidad alta, SB: salinidad baja, SM: salinidad media.	42
Figura 7 Reducción de la relación de absorción del sodio (RAS).	44
Figura 8. Aumento de la capacidad de intercambio catiónico como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.	45
Figura 9. Reducción de la conductividad eléctrica como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.	47
Figura 10. Disminución del pH en los niveles de salinidad como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.	49
Figura 11. Disminución del pH por efecto de los tratamientos aplicados de enmiendas orgánicas.	50
Figura 12. Aumento de la materia orgánica por efecto de los tratamientos aplicados de enmiendas orgánicas.	51

ABREVIATURAS

- CE: Conductividad eléctrica, medida en deciSiemens/m (dS m^{-1})
- CIC: Capacidad de intercambio catiónico, medida en cmol/kg^{-1} .
- PSI: Porcentaje de sodio intercambiable, medido en porcentaje (%).
- RAS: Relación de absorción de sodio, medida en miliequivalentes/litro (meq/L).
- Ca: Contenido de calcio, medido en medido en cmol/kg (cmol/kg).
- K: Contenido de potasio, medido en cmol/kg (cmol/kg).
- Na: Contenido de sodio, medido en medido en cmol/kg (cmol/kg).
- Mg: Contenido de magnesio, medido en medido en cmol/kg (cmol/kg).
- pH: Potencial de hidrógeno. Un indicador de la acidez o basicidad de la solución (0-14).
- CO: Contenido de carbón orgánico, medido en porcentaje (%).
- N: Contenido de nitrógeno total, medido en Porcentaje (%).
- MO: Contenido de materia orgánica medida en porcentaje (%).
- CO₃: Contenido de carbonato, medido en milimol/litro (mmol/L).
- HCO₃: Contenido de bicarbonato, medido en milimol/litro (mmol/L).
- Cl: Contenido de cloro, medido milimol/litro (mmol/L).
- SO₄: Contenido de sulfato, medido en milimol/litro (mmol/L).
- GEI: Gases de efecto invernadero (gases contaminantes)
- N₂O: Óxido nitroso (gas contaminante)
- CH₄: Metano (gas contaminante).
- CO₂: Dióxido de carbono (gas contaminante)
- CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
- FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- ITPS: Panel Técnico intergubernamental sobre suelos.
- USDA: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
- SADER: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONABIO: Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad.
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- CONACYT: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

I. INTRODUCCION

Las plantas aportan el 98% del oxígeno y un 80% de las calorías que consume el ser humano, siendo el suelo la reserva de biodiversidad mundial, soporte de la agricultura, regulador de los gases de efecto invernadero y un pilar de la seguridad alimentaria (FAO, 2021a). Sin embargo, los efectos del cambio climático, los desastres naturales, las epidemias, las guerras, la pérdida de la biodiversidad y de los ecosistemas están acelerando la inseguridad alimentaria, hambre, pobreza y la migración de personas de países pobres de este planeta. Por otro lado, la exigencia de alimentos deberá ser 60% mayor que la de los años 2005 al 2007 para alimentar a una población de 10 billones de personas para el año 2050 (Alexandratos y Bruinsma, 2012). Esta demanda de alimentos se puede mejorar incrementando los sistemas agrícolas modernos (invernaderos, casa sombra, microtúneles (Bomarco *et al.*, 2013), pero, la salinidad en los suelos se ha convertido en un problema global para la agricultura al reducir el rendimiento y la calidad de los cultivos y como resultado, más de un millón de hectáreas en el mundo están afectadas por salinidad (FAO, 2021b) lo que las hace infértiles, especialmente en regiones áridas y semiáridas de África, Asia y Latinoamérica (Figura 1). Además, alrededor de 20-50% de los suelos irrigados en todos los continentes están afectados por una alta salinidad (FAO, 2021b), los cuales se incrementarán por efectos del cambio climático (Shaid *et al.*, 2018). También, las plagas y las enfermedades que actualmente destruyen anualmente hasta un 40% de la producción de alimentos, y esto seguirá aumentando por efectos del cambio climático (Das *et al.*, 2013).



Figura 1. Países afectados por la salinidad del suelo.
Fuente: <https://www.researchgate.net/publication/2624955450>

Los suelos afectados por la salinidad se originan principalmente por las actividades antropogénicas, tales como la aplicación excesiva o inadecuada de fertilizantes químicos, la deforestación y la subida del nivel del mar, entre otros; además, el cambio climático también está agravando la situación, sobre todo en las zonas áridas, semiáridas del planeta (FAO, 2021b). La salinidad en los suelos, además, de afectar en el crecimiento vegetativo de las plantas, obstaculiza la respiración, la fotosíntesis, la transpiración, la germinación de las semillas y otras funciones vitales de las plantas (Iqbal *et al.*, 2021); sin embargo, el principal problema de la salinidad es la eliminación de la actividad microbiológica, y la dificultad de absorción de agua y nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Sugirtharan *et al.*, 2008).

1.1. Planteamientos del problema

El aumento de la población humana, la reducción de tierras cultivables y los efectos dañinos del cambio climático, tal como temperaturas extremas, sequías y las inundaciones ocasionan catastróficas disminuciones de la productividad de cultivos agrícolas (Shahbaz y Ashraf, 2013). Los suelos salinos limitan el rendimiento de los cultivos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del mundo (Daliakopolous *et al.*, 2016). Actualmente, la salinidad del suelo cubre el 20% del total de área cultivada; es decir, alrededor de un 33% de las tierras agrícolas irrigadas en todo el mundo (Srivastava y Kumar, 2015) y se calcula que se pierden alrededor de 2,000 hectáreas al día de tierras fértiles por la salinización (Zaman *et al.*, 2018). Se sabe que la salinidad es el resultado del ascenso de las sales solubles hacia la superficie del suelo por capilaridad, evaporación o evapotranspiración (Hafez, 2021). Las áreas salinizadas aumentan un 10% anual debido a una baja precipitación, alta evaporación superficial, riego con agua salina y malas prácticas culturales (Jamil *et al.*, 2011). De acuerdo con este autor, un suelo salino se define comúnmente como un suelo cuando tiene una conductividad eléctrica (EC) del extracto de saturación (EC_e) a 25 °C es mayor de 4 dS m⁻¹, y con un sodio intercambiable (PSI) de 15 %, aunque el rendimiento de cultivos se reduce con una (CE) menor (Jamil *et al.*, 2011).

El maíz es un cultivo sensible a la salinidad del suelo y representa una amenaza para su productividad. Aunque el maíz sea un cultivo versátil y se cultiva en muchas condiciones de suelo y de clima, es muy importante entender en detalle la respuesta del maíz al estrés salino y los mecanismos de resistencia del mismo para ayudar a implementar estrategias de incremento de este cultivo en ambientes salinos.

1.2. Justificación

La salinidad de los suelos y las sequías son los primeros problemas en la agricultura mundial, por lo que los cultivos sensibles a la salinidad alcanzan únicamente un 20%-30% de su rendimiento (Shrivastava y Kumar, 2015, Intagri, 2017). A mayor concentración de sales en el suelo, disminuye la capacidad de la planta de absorber agua (Munns y Tester, 2008) y el estrés por salinidad obstaculiza los procesos fisiológicos de la planta, tales como la respiración, la fotosíntesis, la transpiración, el funcionamiento de las estomas, la regulación de las hormonas, la germinación de las semillas y el rendimiento de los cultivos (Iqbal, 2021).

La salinidad originada por prácticas agrícolas inapropiadas y aplicaciones excesivas de fertilizantes químicos ocasionan que cada año más áreas agrícolas se abandonen (Shrivastava y Kumar, 2015) por el riego con agua de mala calidad (Aragüés *et al.*, 2014) y representan los mayores desafíos para la producción agrícola (Terrazas-Rueda, 2019); sin embargo, el mayor problema de la salinidad es que ocasiona un estrés osmótico y toxicidad iónica a las plantas, lo que tiene efectos adversos en el establecimiento, crecimiento y desarrollo de las mismas (Farooq, 2015). Por otro lado, los efectos del cambio climático, ocasionan que cada año más tierras arables sean degradadas por la salinidad, incrementando los niveles de la pobreza, el hambre y obligando a muchos pequeños agricultores de países en desarrollo a abandonar sus tierras y emigrar a zonas urbanas e incluso a otros países (Zaman *et al.*, 2018).

Para reducir la salinización del suelo se utilizan varios métodos tales como sistemas de riegos presurizados, reducción de fertilizantes químicos, la agricultura orgánica, entre otros (Kumari *et al.*, 2022). No obstante, la aplicación de material orgánico a los suelos salinos puede recuperar su fertilidad, al incrementar la actividad microbiana, ya que los microorganismos en el suelo se multiplican rápidamente y las propiedades físicas y químicas son mejoradas (Leogrande y Vitti, 2018). En otras palabras, la aplicación de enmiendas orgánicas son una alternativa viable para mejorar las técnicas agrícolas actuales, recuperar la fertilidad de los suelos, producir alimentos sanos, incrementar la actividad microbiana y mejorar las propiedades físicas y químicas de suelos salinos (Leogrande y Vitti, 2018; Timsina, 2018). También, las enmiendas orgánicas aumentan los macro y micronutrientes necesarios para que los cultivos optimicen su productividad, por lo que son muy efectivas para disminuir la salinidad y mejorar el crecimiento de las plantas en suelos salinos (Chaganti *et al.*, 2015).

Dado lo anterior, la salinidad representa un gran desafío para la seguridad alimentaria mundial (Wu *et al.*, 2018), por lo que en este estudio se plantea evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en suelos salinos, a fin de mejorar varias propiedades químicas del suelo, e incrementar el rendimiento del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) cultivar CP-HS2 en Texcoco, México.

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

La aplicación de enmiendas orgánicas en suelos salinos afecta sus características químicas: La conductividad eléctrica (CE) y el pH se reducen, el contenido de la materia orgánica (MO), la relación de absorción de sodio (RAS) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se incrementan.

2.2 Objetivo general

Evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la recuperación varias propiedades químicas de suelos salinos en Texcoco, México.

2.3. Objetivos específicos

- 3.1.1. Determinar las propiedades químicas del suelo antes y al final del ciclo del cultivo las parcelas experimentales.
- 3.1.2. Evaluar el efecto de las enmiendas orgánicas en la CE, MO, RAS y pH del suelo al final del ciclo del cultivo.
- 3.1.3. Determinar la enmienda más efectiva en el mejoramiento de algunas propiedades químicas (CE, MO, Ras y pH) de suelos salinos.
- 3.1.4. Determinar el rendimiento del maíz para cada enmienda y dosis aplicada en cada nivel de salinidad del suelo.
- 3.1.5. Determinar la enmienda más efectiva en el incremento del rendimiento del cultivo

III. REVISION DE LITERATURA

3.1. La perspectiva mundial de la salinidad en la agricultura

La salinidad en los suelos es un problema antiguo que ha acompañado al hombre desde sus orígenes, y las primeras civilizaciones que habitaron en la Mesopotamia como los Sumerios, los Acadios, los Asirios y los Babilonios florecieron y luego fracasaron debido a la salinidad provocada por ellos mismos mediante la irrigación agrícola (Shahid *et al.*, 2018). Aunque el incremento de la producción agrícola que se dio entre 1940 y 1970, por la demanda de más alimentos en el mundo se originó la revolución verde, cuyo objetivo principal fue aumentar la productividad de los cultivos mediante el uso de fertilizantes químicos, pesticidas y herbicidas, originando una agricultura cada vez más dependiente de los productos químicos, aumentando los suelos pobres por la carencia de materia orgánica, eliminación microbiana, degradación, erosión y contaminación del agua (Verma y Verma, 2012). Como resultado, actualmente en el mundo existen más de 833 millones de hectáreas de suelo están afectados por la salinidad (FAO, 2021a), estimándose que un 20% del área cultivada y un 33% del área irrigada en el mundo están afectadas por una alta salinidad en los suelos (Shrivastava y Kumar, 2015).

Según el simposio global de la FAO realizado en el año 2021 sobre suelos afectados por la salinidad, los efectos del cambio climático incrementarán este problema en un 23% en las tierras áridas (FAO, 2021b?), lo que representa una amenaza actual para la producción agrícola, especialmente en las regiones áridas y semiáridas del mundo, donde existen bajas precipitaciones, alta evapotranspiración, malas prácticas de gestión del suelo y del agua, (Munns, 2002), de manera que la degradación del suelo por la salinidad tiene un efecto nocivo en la vegetación, en los cultivos, al modificar negativamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Daliakopolous *et al.*, 2016), dañar el ciclo del nitrógeno, la actividad microbiana, restringir la incorporación de materia orgánica al suelo (Perri *et al.*, 2020) e impide la absorción de agua de la planta (Parihar *et al.*, 2015). El cambio climático y el aumento de las temperaturas promueven la salinidad del suelo y son una amenaza para el suministro de alimentos, para el abastecimiento de agua dulce, para la biodiversidad y para la conservación del medio ambiente (Davies, 2017).

3.1.1. Impacto de la salinidad del suelo en la agricultura y ecología

La salinidad es un concepto que incluye suelos salinos, sódicos y alcalinos, los cuales interfieren con los procesos biológicos de las plantas, por lo que es un desafío grave para la seguridad alimentaria, especialmente en los países en desarrollo, debido a que ocasionan la pérdida de carbono orgánico, una disminución de la fertilidad y de las actividades microbianas y enzimáticas en el suelo (Singh, 2016). El suelo es la fina capa exterior de la corteza terrestre en la que se desarrollan las plantas y es la base de todos los ecosistemas terrestres (Bonne, 2021). Además, crea impactos ambientales, ecológicos, agrícolas y sociales negativos debido a los bajos rendimientos en los cultivos, pobreza y hambre. La salinidad también daña varios procesos sustanciales del suelo entre los que se cuentan: la respiración, la estructura, la nitrificación y la desmitificación, la disminución de la biodiversidad y las actividades de los microorganismos en el suelo (Singh *et al.*, 2016).

La pérdida de productividad de los suelos por causa de la salinización es debido a la interferencia en la absorción de nitrógeno, de agua y detiene la reproducción de las plantas; además, la salinidad de los suelos provoca el riesgo de inundaciones, causa erosión del suelo contribuyendo a la degradación de los mismos y a la desertificación principalmente en tierras áridas y semiáridas donde la disponibilidad de agua es muy limitada (Broussard, 2020). Para empeorar el problema de la salinidad en los suelos, ésta aumentará por efectos del cambio climático, por el uso excesivo de aguas subterráneas, por el aumento del uso de agua de baja calidad en el riego y por la agricultura intensiva (Almeida y Serralheiro, 2017).

A pesar de que actualmente existe una amplia gama de investigaciones documentadas con el propósito de recuperar la fertilidad en suelos salinos, se requiere implementar un enfoque integrado y sostenible en el manejo de las prácticas agronómicas del suelo y del agua y poder conservar los sistemas ecológicos. Debido a que la salinidad reduce la capacidad de las plantas para absorber agua, y esto provoca rápidamente reducciones en la tasa de crecimiento de las plantas. Sin embargo, las tierras salinas se pueden convertir en tierras de cultivo más productivas al evitar la entrada de agua salada, corrigiendo las toxicidades del suelo, las deficiencias de nutrientes y mediante mejores prácticas de manejo del suelo y del riego tal como el riego por goteo para perfeccionar el uso del agua en la agricultura (Munns *et al.*, 2002).

3.1.2. Efectos del cambio climático en la salinidad del suelo

La agricultura está muy influenciada por varios elementos vulnerables al cambio climático tales como la temperatura, la precipitación y la luz solar, por lo que el mundo está experimentando efectos de la variación del clima que modifican los patrones de lluvias, incrementan el nivel del mar, causan frecuentes inundaciones, originan la proliferación de patógenos, aumentan las plagas, son la causa de sequías, incendios forestales, salinidad y consecuentemente, de una disminución en los rendimientos de los cultivos alimentarios (Hussain *et al.*, 2019). Las zonas agrícolas áridas, semiáridas y costeras son muy vulnerables a la concentración de sales en los suelos por los impactos del cambio climático, de manera que se deben inventariar y monitorear dichos impactos de la variabilidad del clima en la salinidad, ya que son cruciales para poder implementar estrategias de resiliencia, especialmente en el riego y manejo de cultivos y para asegurar la productividad agrícola de estas áreas (Corwin, 2020).

Entre los efectos más dañinos del cambio climático se encuentra el incremento de la salinización del suelo (Ullah *et al.*, 2021) y para empeorar la situación, los efectos negativos del cambio climático incrementarán la salinidad en los suelos de áreas que actualmente no son afectadas por este flagelo (Ágora, 2020). De acuerdo con Zaman (2018), extensas áreas de tierras agrícolas en sistema de riego en varios países son afectadas por la salinidad: China 15%, Egipto 33 %, Irán 29 %, USA 23%, Tailandia 10 % (Zaman *et al.*, 2018). En consecuencia, los agricultores en muchos lugares están experimentando cambios rápidos en los fenómenos atmosféricos, como el inicio tradicional de las lluvias, fechas de siembra, cantidades y patrones de lluvia, y frecuencia de eventos climáticos extremos (Kumar *et al.*, 2015).

Según proyecciones del programa de las Naciones Unidas para la agricultura y la Alimentación (FAO), la urbanización y el crecimiento de la población son dos factores vitales para valorar las consecuencias del problema de la salinidad en los suelos y poder implementar estrategias de riego y manejo de cultivos para mantener la productividad agrícola y disminuir la amenaza en el sector agrícola de los países en desarrollo (FAO, 2011). Dado lo anterior, los agricultores en todo el mundo han adoptado diferentes estrategias para hacer frente a la producción agrícola en suelos salinos y para tratar de mantener la seguridad hídrica y alimentaria (Ullah *et al.*, 2021).

3.2. Origen de los suelos salinos

La salinidad del suelo es un problema muy antiguo, ya que se conoce desde hace siglos

porque la agricultura y la salinidad han estado siempre una al lado de la otra; un ejemplo clásico es el de Mesopotamia (Irak), donde las primeras civilizaciones, florecieron y luego decayeron por la salinización en el suelo, introducida por el hombre en la agricultura. Es así que, las inundaciones, el exceso de riego, la filtración, la sedimentación y el aumento del nivel freático se han reportado como las principales causas de la salinización del suelo (Shahid, 2018).

Los suelos afectados por salinidad son suelos con altos niveles de sales solubles donde prevalecen altas concentraciones de Na^+ y Cl^- que afectan la absorción de N, P, K, Ca, S y Zn (Hussain *et al.*, 2015), siendo estos fácilmente absorbidos por las raíces de las plantas causando el efecto osmótico (Rodríguez-Navarro, 2005). De manera que un suelo salino se compone de iones negativos tales como los cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), carbonatos (HCO_3^-) y algunas veces nitratos (NO_3^-); asimismo, contiene iones positivos de sodio (Na^+), magnesio (Mg^{++}) y de potasio (K^+) disueltos en agua (Ramamoorthy *et al.*, 2021). El problema de la salinización de aguas aumenta año tras año en las regiones áridas y semiáridas del mundo a consecuencia de una baja precipitación y principalmente a consecuencia de utilizar agua de mala calidad (Yadav *et al.*, 2011). Según la Universidad Estatal de Colorado, Estados Unidos la sal contiene cationes y aniones (Cuadro 1).

Cuadro 1. Compuestos comunes de la sal (cationes y aniones)

Componente de la sal	Cation (+)	Anion (-)	Nombre común
NaCl	Sodio	Cloruro	Sal de mesa
Na_2SO_4	Sodio	Sulfato	Sal de Glauber
MgSO_4	Magnesio	Sulfato	Sal epsom
NaHCO_3	Sodio	Bicarbonato	Bicarbonato
Na_2CO_3	Sodio	Carbonato	Sal de sosa
CaSO_4	Calcio	Sulfato	Yeso
CaCO_3	Calcio	Carbonato	Calcita (cal)

Fuente: <https://extension.colostate.edu/topic-areas/agriculture/managing-saline-soils-0-503/>

La salinidad en los suelos se origina por factores naturales y climáticos. La salinización primaria se origina por la meteorización de rocas básicas como el basalto, el gabro y la dolerita y por los factores climáticos como una escasa precipitación y una alta temperatura (Collino *et al.*, 2015); además, la salinidad primaria o natural ocurre cuando la capa freática del agua salina sube hasta 3 m y por capilaridad la sal se transporta hacia la superficie (Wiede, 2005).

La agricultura es la causa de la salinización secundaria debido al riego con aguas de mala calidad, la que junto a horizontes impermeables del suelo limitan la lixiviación de las sales (Otlewska, 2020). También se origina por actividades antropogénicas, entre las que se incluyen la deforestación, aguas residuales de municipalidades y emisiones de sales industriales, entre otras (Leogrande y Vitti, 2018). Otras causas de salinización secundaria incluyen actividades directamente vinculadas a las actividades agrícolas, tales como uso excesivo de fertilizantes, métodos inadecuados o mal diseño del riego, lavado insuficiente de las sales y por un mal drenaje o drenajes inexistentes, los cuales ocasionan un aumento en la concentración de sales disueltas (Sánchez-Aquino, 2022)

3.2.1. Clasificación de los suelos salinos

Un suelo salino se define generalmente como aquel en el que la conductividad eléctrica (EC) del extracto de saturación (EC_e) en la zona de la raíz supera los 4 dS m⁻¹ a 25 °C y tiene un contenido de sodio intercambiable de 15 %. El rendimiento de la mayoría de las plantas de cultivo es bajo en esta medida de CE (Munns, 2005). Según la FAO, (2021a) los suelos afectados por salinidad o suelos halomorfos se clasifican mediante dos palabras rusas: Solonchaks (salino) y Solonetz (sódico) y clasifican los suelos Solonchaks en varias subdivisiones:

- a) Solonchak órticos: los Solonchaks más comunes.
- b) Gleyic Solonchaks: suelos con aguas subterráneas que influyen en los 50 cm superiores.
- c) Takyric Solonchaks: suelos arcillosos agrietados.
- d) Mollic Solonchaks: suelos con una capa superficial de color oscuro y alto contenido de materia orgánica.
- e) Los suelos con una salinidad más baja que los Solonchaks, pero que tienen una CE superior a 4 dS m⁻¹ (FAO, 1974).

Similarmente, Zaman (2018) utiliza los mismos términos y clasifica los suelos en Solonchaks y Solonetz (Zaman, 2018). La salinidad del suelo cambia la tierra fértil a tierra improductiva, por eso es muy importante su clasificación. En México se utiliza la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, la cual estipula las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos; sin embargo, de entre los sistemas de clasificación de suelos afectados por la salinidad, el método más utilizado data desde 1954 y es el del Manual 60 del US Laboratory Staff (United Steel Structures Limited) o USSL por sus siglas en Inglés, el cual incluye los suelos salinos, salino-sódicos y sódicos (USSL, 1954) y se basa en una medición estándar de la CE del extracto de saturación del suelo y se describe:

- a) No salino ($CE \leq 2 \text{ dS m}^{-1}$). Los efectos de salinidad son insignificantes
- b) Muy ligeramente salino ($CE \geq 2-4 \text{ dS m}^{-1}$): El rendimiento de los cultivos es restringido.
- c) Ligeramente salino ($CE \geq 4-8 \text{ dS m}^{-1}$): El rendimiento de varios cultivos son restringidos.
- d) Moderadamente salino ($CE \geq 8-16 \text{ dS m}^{-1}$): Solamente los cultivos tolerantes a la sal pueden alcanzar rendimientos satisfactorios.
- e) Fuertemente salino ($CE > 16 \text{ dS m}^{-1}$): Solamente unos pocos cultivos muy tolerantes a la sal alcanzan rendimientos satisfactorios (USSL, 1954).

De acuerdo con Costas (2020), los suelos salinos son tipo Solonchak de la clasificación de la FAO y son aquellos en los que se produce una acumulación de sales más solubles que el sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), e interfieren en el crecimiento de la mayoría de los cultivos; en cambio, los suelos sódicos de acuerdo a la clasificación de la FAO son tipo Solonetz, los cuales contienen suficiente sodio que afecta negativamente la producción de los cultivos y a la estructura de los suelos. Según Costas (2020), los suelos salino-sódicos tienen sales más solubles que el sulfato de calcio y, además, un alto porcentaje de sodio.

Por otro lado, Horneck *et al.* (2007), clasifica los suelos salinos en tres categorías:

- a) Suelos salinos. Son suelos con problemas de sal y que ostentan en su extracto acuoso a 25°C , una $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$, un $\text{PSI} < 15\%$ y un $\text{pH} < 8.5$. Una CE alta con una ESP baja tiende a aglutinar las partículas del suelo en agregados. Los suelos salinos se reconocen por la presencia de costras de sal blanca en la superficie y su permeabilidad es mayor o igual a la de suelos "normales" similares.

- b) Suelos salinos sódicos. Son suelos con problemas de sodio y otras sales que se caracterizan por tener una $CE > 4 \text{ dS/m}$, un $PSI > 15\%$ y un $pH > 8.5$. Estas condiciones dañan las propiedades del suelo y limitan el crecimiento de las plantas, principalmente por la degradación de la estructura del suelo.
- c) Suelos sódicos. Son suelos con problemas de sodio y con una $CE < 4 \text{ dS/m}^{-1}$, un $PSI > 15\%$, un $pH > 8.5$ y se llaman alcalinos negros. Una baja CE y una alta ESP tienden a separar los agregados del suelo y, en consecuencia, reducen su permeabilidad al agua (Horneck *et al.*, 2002).

3.2.2. Medición de la salinidad en el suelo

El exceso de sales en la solución del suelo produce alteraciones metabólicas en las plantas, que afectan la fotosíntesis y la respiración, causando pérdidas durante la germinación, e incluso la muerte de la planta; como consecuencia, la salinidad del suelo puede causar un impacto negativo en el crecimiento de los cultivos, por lo que es muy importante medirla para poder recomendar una gestión del riego o un manejo adecuado del suelo que minimicen los efectos negativos de la salinidad en la producción de los cultivos agrícolas (Konijnenburg, 2007). La salinidad se mide pasando una corriente eléctrica a través de una solución de suelo extraída y saturada con agua a una temperatura fija de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ expresada como deciSiemens por m (dS m^{-1}) y se denomina conductividad eléctrica (CE); es así, que una alta conductividad eléctrica indica un alto nivel de salinidad (Rebolledo, 2017).

En el campo, la salinidad del suelo se determina con medidores de conductividad electromagnéticas y utilizando un GPS se elaboran mapas de los niveles de salinidad en el terreno (Bauder, 2014). Los suelos salinos son detectados por indicadores visuales, tal como una costra de sal blanca en la superficie del suelo; también por síntomas visuales en la planta, tales como una germinación irregular, hojas quemadas o una reducción del vigor de la planta (Shahid *et al.*, 2018); en cambio, los síntomas visuales de los suelos sódicos es que presentan una costra dura, seca, negra, cuarteada y agrietada en su superficie (Waskom, 2012).

Para la medición de la salinidad, ya sea en áreas pequeñas o en grandes extensiones de tierra, se emplean instrumentos electromagnéticos, tales como la Sonda EM38 y la Sonda MARKET SCT, las cuales proporcionan la medición de las concentraciones de sal, dentro de dos intervalos

de profundidad distintos, todos al mismo tiempo y sin ningún contacto del instrumento con el suelo. Estos instrumentos se utilizan en la agricultura, arqueología y ciencias generales del suelo porque miden la salinidad de manera confiable, son fáciles de usar y tardan unos segundos para dar un resultado de la salinidad del terreno (Intagri, 2007).

Algunos parámetros químicos que determinan la salinidad en los suelos incluyen a) la capacidad de intercambio catiónico (CIC) indica la capacidad del suelo para retener iones cargados positivamente e influye en la estructura, la disponibilidad de nutrientes, en el pH y en la fertilidad del suelo (Hazelton y Murphy, 2007); es decir, muchos nutrientes en las plantas existen como cationes (por ejemplo, magnesio, potasio y calcio) y los suelos con grandes cantidades de carga negativa son más fértiles porque retienen más cationes (McKenzie et al. 2004). La CIC se determina mediante la ecuación 1:

$$\text{CIC} = \text{Bases totales intercambiables en \% de saturación} \quad (\text{Ecuación 1})$$

b) El porcentaje de sodio de intercambio (PSI). Se utiliza para determinar la sodicidad de un suelo y representa el porcentaje de sodio respecto a los demás cationes adsorbidos se calcula mediante la ecuación 2:

$$\text{PSI} = 100 \times \text{Na} / \text{CIC} \text{ (cmol/kg o meq/100)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Na⁺: cantidad de sodio en cmol/kg o meq/100g, CIC: capacidad de intercambio catiónico o total de las bases intercambiable.

c) Relación de absorción de sodio (RAS). Indica la proporción relativa en que se encuentra el sodio respecto al calcio y magnesio, cationes que compiten con el sodio. Su valor se determina mediante la ecuación 3:

$$\text{SAR} = \text{Na} / (\sqrt{\text{Ca} + \text{Mg}/2}) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

SAR: Relación de Absorción de sodio en %

Na⁺: cantidad de sodio con respecto a los cationes Ca⁺⁺ y Mg⁺⁺

Ca: cantidad del calcio en cmol/kg o meq/100g

Mg: cantidad de magnesio en cmol/kg o meq/100g

3.2.3. Origen de los suelos salinos del Lago de Texcoco, México

Texcoco es uno de los municipios del Estado de México con una extensión de 418,69 km², semiárido, clima templado semi-seco, temperatura media anual de 15,9 °C, precipitación media anual de 686 mm y localizado a una altitud de 2235 msnm. Según la literatura, la Ciudad de México está construida sobre lo que alguna vez fuera el Lago de Texcoco, el cual almacenaba aguas extremadamente salinas de otros lagos, pero debido a la urbanización fue drenado lo que originó un valle seco y salino, llamado el valle de Texcoco (Espinosa-Castillo, 2008).

Con base en lo anterior, el origen de las sales de los suelos en el valle de Texcoco incluye procesos geológicos de salinización, a la acumulación de sedimentos y compuestos azufrados de otros lagos de mayor altitud que se acumularon con el transcurrir del tiempo. Este valle es actualmente una de las áreas con más de 10,000 ha de suelos afectados por salinidad extrema, de origen volcánico. La salinidad del valle de Texcoco ha sido incrementada por el drenaje que actualmente existe en esta cuenca endorreica y por evapotranspiración (Oliver-Burwitz *et al.*, 2019).

3.3. Efecto de la salinidad en las propiedades físico-químicas y biológicas del suelo

La salinidad es afectada por el tipo de cultivo, por las condiciones del suelo, por la fertilización excesiva y por las malas condiciones de drenaje (McBratney *et al.*, 2014), especialmente en zonas áridas y semiáridas del planeta (Qadir, 2006), donde la lluvia es escasa e incapaz de filtrar las sales, limitando el drenaje superficial del suelo (Ramamoorthy *et al.*, 2021); además, en estas zonas la evaporación excede a la precipitación (Ibáñez, 2007). Por otro lado, la salinidad destruye la estructura del suelo por la separación de las partículas finas de la arcilla y obstruye los poros del suelo impidiendo la circulación del agua y oxígeno. También afecta la germinación, el contenido de clorofila y por reduce el rendimiento del cultivo (Yuvaraj, 2021). Además de los daños a la estructura, la salinidad daña otras propiedades del suelo tales como la agregación, porosidad, infiltración del agua y la disponibilidad de nutrientes requeridos por las plantas para su normal desarrollo (Horneck *et al.*, 2007).

Debido al efecto osmótico de la salinidad, las raíces de las plantas son incapaces de absorber agua y nutrientes y los procesos fisiológicos y bioquímicos de la planta son afectados (Munns y Tester, 2008). También, la salinidad afecta negativamente la actividad microbiológica del suelo

(Lakhdar *et al.*, 2009) al reducir la respiración microbiana (Wong, 2009), incrementa la conductividad eléctrica (Tejada, 2006), reduce la absorción del N y la asimilación de amonio, pudiendo en muchos casos, ocasionar la muerte de las plantas (Ashraf *et al.*, 2018). Por el contrario, los microorganismos de la rizósfera, en particular las bacterias y los hongos beneficiosos mejoran los cultivos (Dimkpa *et al.*, 2009).

La salinidad limita la cantidad de agua que absorberá la planta y el potencial de almacenamiento de agua en el suelo, por lo que los suelos arcillosos, compuestos de partículas pequeñas bloquean los espacios porosos entre las partículas y evitan que el agua pase. El suelo arcilloso, es llamado “suelo pesado”, compuesto por más de 30% de arcilla, de textura pesada, de un mal drenaje y son impermeables, húmedos y blandos (Pineda, 2015); en cambio, en los suelos de textura gruesa con partículas y espacios porosos más grandes facilitan el movimiento del agua. En condiciones normales de riego, los suelos arenosos naturalmente podrán expulsar más agua a través de la zona de raíces que los suelos arcillosos. El resultado final es que los suelos de textura gruesa toleran más el agua de riego salada porque la lixiviación eliminará más sales disueltas de la zona de raíces. Como resultado, las partículas de la arena son relativamente grandes comparadas a las de la arcilla, que son pequeñas, pero la arcilla retiene más agua, más nutrientes y más sales que las partículas de arena (Stiver, 2017).

En consecuencia, desde hace muchos años, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, tales como la compactación, la contaminación inorgánica y la eliminación de la actividad/diversidad microbiana, se han visto gravemente afectadas, de manera que, si el nivel de la sal en el suelo es demasiado alto, el agua fluye de las raíces hacia el suelo, causando deshidratación, reducción del rendimiento e incluso la muerte de la planta (Queensland Government, 2016).

Debido a que los suelos salinos presentan bajo contenido de materia orgánica, muchos investigadores afirman que todas las aplicaciones superficiales de enmiendas orgánicas, sin laboreo, aumentan el contenido de materia orgánica en un corto plazo hasta en 100%, y asimismo, mejoran la disponibilidad de nutrientes ya que éstos son fácilmente metabolizados por los microorganismos; sin embargo, su efecto depende del tipo de enmienda, dosis, frecuencia y forma de aplicación; es decir, se aplican uniformemente sobre el terreno o de manera localizada cerca de las plantas y con dosis que varían desde 4 hasta 120 t ha⁻¹ (Abril y Noé, 2014). Dado lo anterior,

es esencial conservar un suelo fértil, saludable y productivo, ya que este recurso es esencial para la vida animal y vegetal en el planeta; además, un suelo fértil tiene un papel esencial en la seguridad alimentaria, conservación del agua, de los ecosistemas y hospeda el 25 % de la biodiversidad mundial, de manera que se requieren más investigaciones con conocimientos detallados de las interacciones de las raíces de las plantas y los microorganismos del suelo para mejorar la salud suelo e incrementar la productividad de los cultivos, reducir la incidencia de enfermedades en los cultivos y a utilizar enmiendas orgánicas y biofertilizantes en la producción agrícola (Aguado-Santacruz, 2012).

3.4. Efecto de la salinidad en las plantas

La salinidad en el suelo es el factor abiótico más limitante del crecimiento y productividad de los cultivos en el mundo debido a que afecta cada aspecto morfológico, fisiológico y bioquímico, tales como daño en la germinación, el crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo de la planta (Shrivastava y Kumar *et al.*, 2015). Los efectos negativos de la salinidad en las plantas son más evidentes en las zonas áridas y semiáridas donde restringe la absorción de agua y de nutrientes e impide el crecimiento y desarrollo normal de la planta; además, ocasiona una división anormal de las células y ocasiona un aceleramiento de la vejez en la planta, lo cual conduce a la muerte de la misma (Rezaei y Razzaghi, 2018, Vasconcelos *et al.*, 2017). Además de las altas concentraciones de sal en el suelo, las plantas enfrentan otros estreses abióticos tales como la sequía, heladas, altas temperaturas e inundaciones, que retrasan el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos y en muchos casos, causan la muerte de las plantas (Krasensky y Jonak, 2012).

En relación con la disponibilidad de agua para las plantas, los suelos con textura fina son propicios para el desarrollo de las plantas por su alta capacidad de retención del agua y por su alta capilaridad, ocasionan un mayor flujo de agua desde lo más profundo del suelo hasta las raíces de la planta, es decir, reducen el potencial osmótico del agua en el suelo y en la raíz de la planta. En otras palabras, facilitan el paso de un líquido a través de una membrana de una solución menos concentrada a una solución más concentrada y las plantas aumentan la capacidad de las mismas para sobrevivir sin agua, especialmente en áreas semiáridas y áridas del planeta (Rengasamy, 2006).

3.4.1. Mecanismos de resistencia de las plantas contra la salinidad

Las plantas son las primeras de la cadena de producción de alimentos afectadas por el estrés de la salinidad en el suelo porque éste entorpece los procesos de absorción de agua, la fotosíntesis y ocasiona un crecimiento anormal de las mismas (Vaishnav *et al.*, 2016). En la agricultura, la tolerancia a la sal de un cultivo se describe mediante varias funciones de respuesta que ajustan el rendimiento del cultivo con el nivel de la salinidad del suelo, y se afirma que hay una reducción lineal del rendimiento a medida que aumenta la salinidad (Steppuhn, 2005).

Como resultado, las respuestas de las plantas a la salinidad se han dividido en dos fases principales, la primera se lleva a cabo en minutos o días y consiste en una reducción del crecimiento por el cierre de las estomas y la inhibición de la expansión celular, principalmente en el brote; la segunda fase tiene lugar durante días o incluso semanas, y se refiere a la acumulación de niveles de iones citotóxicos, pero puede causar daños a los procesos metabólicos, causar senescencia prematura, y, en última instancia la muerte celular (Munns y Tester, 2008).

Con base en la tolerancia de las plantas a la salinidad, éstas se clasifican en plantas halófitas y no halófitas. Las halófitas son “plantas amantes de la sal” porque crecen y sobreviven en ambientes salinos, entre la que se encuentran los manglares, marismas y playas y donde sus raíces están en contacto con el agua salada (Gutiérrez-Segura, 2018). Por otro lado, para hacer frente a la salinidad, las plantas desarrollan varias estrategias morfológicas, fisiológicas, bioquímicas y moleculares (Meng *et al.*, 2018). Una de las mencionadas respuestas de la planta a la salinidad es un mecanismo conocido como ajuste osmótico, mediante el cual la planta incrementa la producción intracelular de sustancias solubles y facilita la entrada de agua (Mata-Fernández, 2014).

Entre otros mecanismos que la planta desarrolla contra la salinidad se incluyen:

- a) Adaptaciones fisiológicas (retraso de la germinación y maduración).
- b) Adaptaciones morfológicas (reducción del tamaño foliar y de estomas).
- c) Adaptaciones fenológicas (retraso de la floración).

Por otro lado, científicos del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC, 2016) identificaron un mecanismo genético para que las plantas transporten la sal desde la raíz a la parte aérea en función de las condiciones climáticas (CSIC, 2016).

3.4.2. Efectos de la salinidad en el rendimiento de los cultivos agrícolas

La productividad agrícola en todo el mundo está limitada por varios factores abióticos, especialmente por la salinidad, y este problema se agudizará, estimándose que para el año 2050 el 50 % de la tierra cultivable del mundo se verá afectada por la salinidad (Bartels y Sunkar, 2005); en otras palabras, en suelos salinos y debido a sus pobres condiciones físicas y químicas se restringen el establecimiento y crecimiento de las plantas; asimismo, se reduce la conductividad hidráulica, la infiltración del agua y de la aireación del suelo (Rengasamy, 2006). Por otro lado, la germinación de las plantas que se cultivan en suelos salinos es limitada debido al efecto osmótico (Meza *et al.*, 2007). También, los cultivos que se plantan en suelos salinos sufren trastornos nutricionales y toxicidades, malas condiciones físicas del suelo y bajos rendimientos (Shrivastava, 2015). En México, de acuerdo con la Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la superficie afectada por salinidad es alrededor de 600 mil ha (SEMARNAT, 2009).

3.5. El cultivo de maíz en el mundo

El maíz (*Zea mays* L.) es la tercera fuente de alimentos de origen vegetal más grande del mundo; se originó y domesticó en México y Centro América hace miles de años. El grano del maíz es uno de los cultivos alimentarios más ampliamente distribuidos en el mundo, ya que se utiliza como alimento para el ganado, como alimento humano, como biocombustible y como materia prima en la industria; además, desde su introducción en Europa por Cristóbal Colón y otros exploradores y colonizadores, el maíz se ha extendido a todas las zonas del mundo (británica, 2023).

El maíz (*Zea mays* L.) pertenece a la familia botánica Poaceae o Gramineae, género *Zea*, especie *Z. mays* y es una planta anual de cultivo rápido, porte robusto, con un requerimiento hídrico de 500-700 mm; además es un cultivo versátil y adaptable a diversas condiciones ecológicas y edáficas (Ortigoza, 2019).

Los Estados Unidos es el mayor productor del maíz, contribuyendo con más del 40% del maíz del mundo, aunque en otros países, su producción también ocupa un alto porcentaje en la agricultura. De manera que la producción mundial de maíz (Cuadro 2) alcanza los 850 millones de toneladas con un rendimiento promedio de 5.2 t ha⁻¹ (Yara, 2022).

Cuadro 2. Producción mundial de maíz (1000 toneladas métricas)

Posición	País	Producción
1	Estados Unidos	364,727
2	China	271,000
3	Brasil	126,000
4	Argentina	55,000
5	México	27,600
6	Canadá	14,000

Fuente: <https://www.indexmundi.com/agriculture/?commodity=corn>

Según las estadísticas, en los años 2021 y 2022, los Estados Unidos fueron los mayores productores de maíz con un volumen de producción de alrededor de 383,94 millones de toneladas métricas, seguido por China y Brasil, entre los tres principales países productores de maíz; sin embargo, el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) estima que la producción mundial de maíz en el año 2023 tendrá una gran disminución, por lo que muchos investigadores tratan de obtener variedades más resistentes a las plagas y a las enfermedades, del cultivo (FAO, 2022). Según proyecciones de la NASA, el rendimiento del maíz disminuirá en un 24% para el 2030 en Norte América, Sud América, África del Oeste, Europa Central, India y China (Grey, 2021).

Asimismo, la salinidad y sus efectos negativos en el desarrollo de los cultivos se incrementarán debido a varias actividades antropogénicas y por efectos del cambio climático, especialmente en los cultivos con sistemas de irrigación y también en los cultivos de secano. Lo anterior sería a consecuencia del aumento de la temperatura global, cambios en los patrones de lluvias, y por el incremento en las concentraciones de gases de efecto invernadero originadas por el cambio climático y por actividades humanas (Grey, 2021).

3.5.1. Afectaciones de la salinidad en rendimiento del cultivo del maíz

La salinidad es el principal factor abiótico que interrumpe varias etapas fisiológicas del maíz tales como la respiración, la fotosíntesis, transpiración, germinación, absorción de agua y reduce el rendimiento; además, causa trastornos nutricionales afectando negativamente la morfología, metabolismo y crecimiento de la planta; consecuentemente, por el efecto osmótico, la planta es incapaz de absorber agua y nutrientes y la germinación y establecimiento del cultivo, junto con la etapa reproductiva son las etapas más sensibles que las etapas posteriores (Ashraf y Foolad, 2005).

Aunque el maíz es un cultivo moderadamente sensitivo a la salinidad, reacciona más rápido que el trigo (Poshanov *et al.*, 2022), pero una excesiva cantidad de sales solubles o de sodio ocasiona una disminución en la germinación de las semillas, un retraso en el establecimiento y en el desarrollo de las plántulas de maíz (Sugirtharan, 2008); además, la planta de maíz es dañada por el efecto osmótico y la toxicidad iónica, produciendo un desequilibrio nutricional (Botella, 2017). La respuesta del maíz al estrés de la salinidad se mantiene constante hasta llegar a un determinado valor, a partir del cual desciende con el aumento de la salinidad (Ramírez, 2004) por lo que a niveles de salinidad mayores a 4 dS m⁻¹ la mayoría de los cultivos son incapaces de absorber el agua y nutrientes del suelo (Bauder, 2014).

Debido a que la salinidad en los suelos inhibe el crecimiento y productividad de muchos cultivos, es muy importante conocer la influencia y naturaleza del problema; asimismo, la salinidad amenaza a la calidad de los suelos agrícolas en todo el mundo; por ejemplo, solamente en América Latina 31,000,000 ha están afectadas por este problema, destacando México, Perú, Colombia, Ecuador y Chile, ocasionando una limitante en la producción de alimentos debido a que los cultivos pierden su potencial de rendimiento en estas condiciones (Castellanos, 2016).

En resumen, la salinidad es objeto de investigación por parte de los científicos agrícolas en todo el mundo y en la actualidad, este problema se ha incrementado en las zonas de regadío y también ha elevado la cantidad de las tierras no utilizadas o abandonadas por su alto grado de salinidad, originando condiciones tan difíciles que es casi imposible que los agricultores obtengan altos rendimientos (Poshanov *et al.*, 2022).

3.5.2. Etapas vegetativas y reproductivas del maíz

Para incrementar el rendimiento del maíz las estrategias de manejo son efectivas cuando se identifican las etapas de crecimiento; así, por ejemplo, los efectos de la aplicación de fertilizantes, las heladas, el estrés por humedad, salinidad, por enfermedades, las plagas, estarán determinados por la etapa de crecimiento (Reed, 2020). De acuerdo con Pioneer (2015), el crecimiento y desarrollo del maíz son dos conceptos diferentes; así, por ejemplo, el crecimiento depende de ciertas condiciones adecuadas para el cultivo tales como humedad, temperatura, nutrientes, etc, en cambio, el desarrollo es el paso de una a otra del cultivo.

La Universidad Estatal de Illinois en los Estados Unidos (Illinois State University) desarrolló un sistema de clasificación de las etapas de desarrollo del cultivo del maíz (Figura 2), las cuales se describen en Pioneer (2015). En este método no se consideran la altura y el número de hojas de la planta ya que éstas dependen de diferentes condiciones ambientales y edáficas que pueden ser estresantes.

Las etapas descritas por este método son: la vegetativa (V) y la reproductiva (R).

Etapas Vegetativas. Corresponde al crecimiento activo de la planta antes de la floración y se caracterizan por la presencia del cuello de una hoja, con tres partes: cuerpo, vaina y cuello (es la línea o curva definida que separa el cuerpo y la vaina).

VE Emergencia. Se observa la aparición del coleóptilo.

V1 Primera hoja. Se observa el cuello de la primera hoja.

V2 Segunda hoja. Se observa el cuello de la segunda hoja.

V3 Tercera hoja. Es el inicio del proceso fotosintético. La planta se nutre de las raíces.

VT Aparición de las panojas.

Etapas Reproductivas. Son posteriores, hasta la madurez fisiológica del maíz y se caracterizan por la aparición de granos en la mazorca, excepto en la etapa R1 donde aparecen los estigmas.

R1 Aparición de los estigmas.

R2 Blíster: Etapa de ampolla. Los granos se llenan con un líquido claro y se ve el embrión.

R3 Grano lechoso: Etapa lechosa. Los granos se llenan con un líquido lechoso blanco.

R4 Grano pastoso: Etapa masosa. Los granos se llenan con una pasta blanca.

R5 Grano dentado: Etapa dentada. Los granos se llenan con almidón sólido y los granos son de forma dentada.

R6 Grano maduro: Madurez fisiológica. Una capa negra es visible en la base del grano y su humedad es de un 35%.

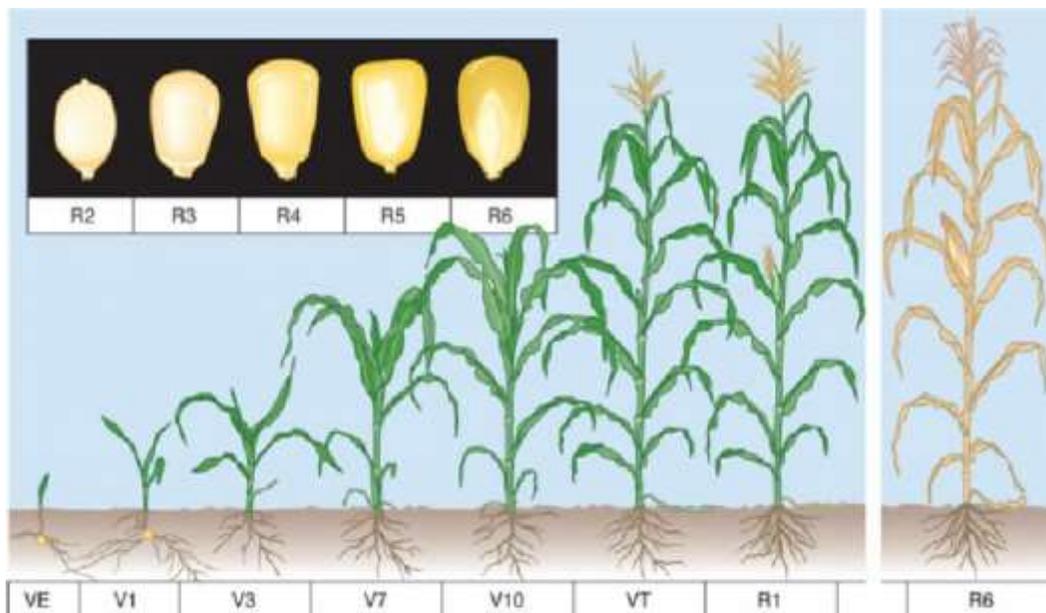


Figura 2. Etapas vegetativas y reproductivas del maíz

Fuente: Emerson Nafziger (<https://extension.illinois.edu/staff/emerson-nafziger>)

De acuerdo con Pioneer (2015), los períodos más sensibles en el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz son las etapas de floración y el llenado de grano, puesto que es cuando la planta es muy susceptible a los factores causantes del estrés.

Por otro lado, el tiempo que requiere el cultivo de maíz para pasar de una etapa a otra depende de la cantidad de calor acumulado se conoce como los Grados-día de crecimiento (GDD), Unidades-grado de crecimiento (GDU) o Unidades térmicas (HU) y utiliza temperaturas máximas (30 °C) y mínimas (10 °C) para su determinación. Por otro lado, el maíz por ser una planta

hermafrodita; es decir, produce flores masculinas y femeninas separadas en la misma planta y que origina una polinización exitosa; es así que la panoja es la flor masculina que produce el polen y puede producir hasta un millón de granos de polen y la mazorca es la flor femenina que produce los óvulos. La mazorca llega a producir más de 1000 estigmas y se estima que alrededor de un 97% de los estigmas y son fertilizados con polen proveniente de otra planta adyacente. El polen es ligero y muchas veces el viento lo transporta a través de distancias considerables se desprende y el viento lo puede transportar a distancias mayores a 15 m; sin embargo, su desprendimiento y la emergencia de los estigmas deben de acontecer al mismo tiempo para una correcta polinización (Pioneer, 2015, p 6).

3.5.3. Condiciones para un alto rendimiento en el cultivo de maíz

Existen muchos recursos y factores que optimizan el rendimiento en el cultivo del maíz; sin embargo, el clima sigue siendo el factor más importante. El nitrógeno junto con el potasio y el fósforo son elementos importantes para asegurar altos rendimientos en maíz (Yara, 2022). De acuerdo a lo anterior, la Universidad Estatal de Mississippi (Mississippi State University) de los Estados Unidos estudió los siguientes factores de optimización del cultivo de maíz (Larson, 2013):

- a) Controlar completamente el crecimiento del zacate (ryegrass) antes de la emergencia del maíz porque es muy competitivo con el maíz en sus etapas iniciales.
- b) Utilizar una rotación de cultivos para mejorar las propiedades del suelo y reducir en gran medida el riesgo asociado a problemas de enfermedades, insectos y otras plagas.
- c) Plantar cuando las condiciones del suelo sean adecuadas para una rápida emergencia y desarrollo del cultivo.
- d) Sembrar minuciosamente con una densidad adecuada y espaciado igual de las plántulas.
- e) Utilizar fertilizantes orgánicos para suplir los nutrientes indispensables.
- f) Incorporar métodos agronómicos para optimizar el tiempo de riego por surcos.
- g) Estar comprometido a mejorar la salud del suelo.
- h) Reducir el tiempo de irrigación al menos en un 20%.

Según la JICA (2019), el maíz requiere ciertas condiciones para su desarrollo normal:

- a) Un suelo fértil, lleno de organismos benéficos, profundo, de textura suelta (franco a franco-arcilloso, bien drenado, alta capacidad de retención de agua, pH de 5.5 a 7.0 y un alto contenido de materia orgánica y de nutrientes.
- b) Un clima cálido, soleado, con temperaturas óptimas entre 18 y 20 °C y con lluvias intermitentes o mediante riego.
- c) El maíz es muy susceptible a la falta de agua, especialmente durante el periodo de floración y llenado de grano.
- d) El suelo debe contener una mayor cantidad de macronutrientes: nitrógeno, fósforo, potasio, calcio.
- e) Es vital para el crecimiento y desarrollo del cultivo porque captura la luz solar y la convierten en energía mediante la fotosíntesis

3.6. El cultivo de maíz en México

En México, el cereal de mayor importancia es el maíz, que ha sido un alimento base y el cultivo de mayor importancia histórica y cultural en el país y en la cocina se utiliza para hacer masa, un tipo de masa que se usa en alimentos básicos como tortillas, tamales y más de 600 platillos de la gastronomía (CONABIO, 2020). Su producción se divide en maíz blanco y en maíz amarillo como los más conocidos; el maíz blanco es para consumo humano y el maíz amarillo para la industria de alimentos pecuarios (Balanzario, 2020). En recientes años, el cultivo de maíz amarillo está captando más popularidad entre las masas urbanas del mundo debido a su nutrición, su grano tierno y su sabor dulce (Amos *et al.*, 2015). El maíz es muy apreciado por su valor económico, cultural y nutricional y está muy enraizado en la cultura mexicana, por lo que existen muchas variedades autóctonas excelentes (O'Leary, 2016).

El maíz es una planta anual, de porte robusto y con un rápido desarrollo la cual ha sido domesticada por los pueblos de Mesoamérica (CONABIO, 2020) y en México este cultivo es respetado como una categoría cultural, religiosa, política, social y económica (Boll-Stiftung, 2021); empero, su producción nacional se ha reducido en un 4.5 % a partir del año 2020 y las importaciones se han incrementado (Martínez, 2020).

La reducción de la producción del maíz en México se debe principalmente a los efectos del cambio climático y a la introducción de especies genéticamente mejoradas (Peralta-Vásquez, 2019); consecuentemente, México ocupa el segundo lugar en el mundo como importador, lo cual empeorará debido al aumento de la temperatura global y a los cambios en los patrones de lluvias (SADER, 2020).

La Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) de México afirma que el 60 % de la producción de maíz grano proviene de los productores de pequeña escala, los cuales cultivan mayormente las variedades nativas. A pesar de que parte del territorio nacional es afectado por la salinidad, principalmente en áreas de irrigación y en cuencas cerradas (Smith y Smith, 2007), la producción nacional de maíz blanco está garantizada (Martínez, 2020) en sistemas de riego y en el ciclo de otoño invierno. La producción en el ciclo primavera verano en la modalidad de temporal es más estable, aunque es dependiente de los patrones de lluvias (Proain, 2021).

Según el gobierno mexicano, el cultivo de maíz en zonas marginales del sur-sureste de México, que incluye los estados de Campeche, Chiapas, Guerrero, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán, tiene un gran potencial para este cultivo, lo que podría ayudar a disminuir las exportaciones y garantizar la seguridad alimentaria de los mexicanos (SADER, 2020). Dado lo anterior, el gobierno actual implementó programas prioritarios de financiamiento y apoyo técnico enfocados en la autosuficiencia alimentaria y en el beneficio de los pequeños y medianos productores del país. Por otro lado, y debido a que la agricultura en México representa un 13% de la fuerza laboral, equivalente a 3.3 millones de agricultores (Fox y Haight, 2010), la recuperación de tierras dedicadas a la agricultura y afectadas por salinidad es un reto muy grande para manejar los suelos (Endo *et al.*, 2011).

El Teocinte es el pariente silvestre y antecesor directos de los cuales se domesticó el maíz como cultivo por lo antiguos habitantes de Mesoamérica. El Teocinte se distribuye en forma aislada desde el sur de Chihuahua, en México, hasta Costa Rica en Centro, pero su mayor diversidad es en México (CONABIO, 2020). Se cree que el Teocinte en la antigüedad se aprovechaban en forma similar a algunos usos actuales del maíz, tales como consumo del jugo dulce de sus tallos, elotes, como palomitas, al exponer los granos al fuego (Sánchez *et al.*, 2008).

Las 64 razas nativas que se identifican en México constituyen reservorio genético de alto valor, el cual es fundamentales para la seguridad alimentaria del país y del mundo (CONABIO, 2020); no obstante, el maíz que se conoce actualmente en México no es el original debido a que su domesticación milenaria aún continúa año con año mediante la selección y combinación de semillas, donde se seleccionan las mejores mazorcas para grano y para ensilaje que los pequeños agricultores y campesinos llevan a cabo en el sistema de cultivo de milpa.

3.6.1. El cultivo de maíz nativo y transgénico en México

Los agricultores nativos cultivaban juntos maíz, frijol, calabaza y girasol y esto producía beneficios mutuos, como, por ejemplo, los tallos de maíz crean un enrejado para que se desarrollen las enredaderas de los frijoles, y éstas aseguran el maíz cuando hay vientos fuertes. Otro de los beneficios es que las plantas de maíz y frijol que crecían juntas tendían a ser más saludables que cuando se cultivaban por separado. Consecuentemente, los agricultores, indígenas o mestizos, mediante su conocimiento y habilidad, han logrado mantener una extensa diversidad de maíces nativos, por lo que estos pequeños agricultores llevan a cabo año a año intercambios y experimentan cultivos con semilla propia o de otros vecinos de la misma región o de otras localidades, por lo que en México existen alrededor de 64 razas de maíces nativos clasificadas de acuerdo a sus caracteres morfológicos, de adaptación y genéticos (CONABIO, 202) Como resultado, un 60 % de la producción proviene de los productores de pequeña escala, los que cultivan tanto las variedades genéticamente mejoradas, como las variedades nativas (SIAP, 2018). Actualmente, se conoce que las bacterias que viven en las raíces de las plantas de frijol extraen nitrógeno y lo convierten en una forma que pueden usar tanto los frijoles como el maíz (Gish, 2020).

Para salvaguardar los maíces nativos, en el año 2019, se finalizó el proyecto “Salvaguardando los parientes silvestres de cultivos mesoamericanos” con la colaboración de países centroamericanos e Inglaterra y con el objetivo de identificar parientes silvestres de nueve cultivos, entre los que se encontraba el maíz y el Proyecto Global de Maíces (PGM) actualizó la información de maíces y sus parientes silvestres, determinando centros de origen y diversidad genética de 64 razas de maíces, de las cuales 59 son razas nativas. En este proyecto participaron 206 investigadores de 65 instituciones académicas y de investigación de México (CONABIO, 2020).

El cambio climático, las plagas y las enfermedades de los cultivos, son más comunes y resistentes al control fitosanitario y ocasionan una disminución en el rendimiento de la mayoría de los cultivos; sin embargo, las plagas o enfermedades dependen de la unión de varios factores, tales como la presencia del patógeno, el manejo del cultivo y el medio ambiente. La producción agrícola mundial es afectada por diversos factores, tales como los insectos plaga, que son controlados con la aplicación de insecticidas, ocasionando problemas a la salud de los humanos y al mismo tiempo vuelven más resistentes a dichas plagas, contaminación ambiental y disminuyen las poblaciones de insectos benéficos de los cultivos, de manera que es conveniente encontrar métodos de control eficientes y amigables con el medio ambiente, entre los que se incluyen la introducción de insectos parasitoides, depredadores y que eliminan a los insectos plaga, también utilizar insectos estériles, bio-insecticidas y pesticidas microbianos (Zelaya-Molina *et al.*, 2022); además, se requiere una oportuna identificación de las plagas para poder hacer un adecuado control, fácil y eficaz y poder emitir una alerta fitosanitaria a los productores de la región para mitigar su impacto. En el caso de las plagas del cultivo del maíz, es conveniente hacerlo cuando la enfermedad está en niveles bajos para evitar que se produzcan daños mayores. Entre las plagas del maíz, según el daño que causan, se tiene a las plagas rizófagas, las cuales atacan la raíz y a las plagas que atacan el follaje (Figura 3 y 4).



Figura 3. El gusano de alambre
Fuente: Hidroponia.mx



Figura 4. El gusano cogollero
Fuente: Intagri- Word Press.com

3.7. Manejo y recuperación de los suelos salinos

Las áreas cultivadas en el mundo con sistemas de riego cubren aproximadamente 25 % del total de las tierras cultivables y consumen 65% del agua para consumo humano (Thenkabail, 2010), por lo que algunas de las actividades agrícolas humanas, especialmente el riego con agua salina ha causado daños importantes a la estructura del suelo y han activado la salinización del mismo (Nachson, 2018). Como resultado, La salinidad tiene un impacto negativo en la abundancia y distribución de los microorganismos que habitan en el suelo, por lo que algunas técnicas de manejo de la salinidad se enfocan en corregir las propiedades del suelo tal como la aplicación de enmiendas orgánicas (biochar, vermicomposta, composta de ganado vacuno entre otras). Otras técnicas de manejo se enfocan en optimizar las propiedades genéticas de las semillas, selección de especies más resistentes a la sequía y a la salinidad del suelo.

Aunque se ha buscado una solución al problema de la salinidad en los suelos, es imperioso encontrar una solución práctica, viable y efectiva a los problemas relacionados con este problema de los suelos tanto a nivel regional, nacional y mundial (Sánchez-Aquino, 2021).

El primer paso en el desarrollo de un sistema de recuperación de suelos salinos o sódicos es investigar en detalle los procesos y factores locales que causan la salinidad, especialmente cuando

ésta es a causa de actividades humanas, tales como el riego con agua de mala calidad. Un método de recuperación de suelos salinos es utilizando microorganismos, así como cultivar plantas tolerantes a la salinidad, con variedades genéticas y hormonas promotoras del crecimiento vegetal; empero, estas estrategias son costosas y de larga duración, se requieren métodos orgánicos simples y de bajo costo del cultivo (Shrivastava y Kumar, 2015).

Investigadores de la Universidad Estatal de Colorado recomiendan tres métodos para recuperar los suelos salinos:

- a) Lavar las sales de la zona radicular con más agua de la que la planta necesita (lixiviación).
- b) Combinar la lixiviación con el drenaje artificial.
- c) Separar o alejar la sal de las raíces a zonas fuera de la zona de la raíz. Este método se llama acumulación controlada (Bauder, 2011).

Otra forma de recuperar los suelos salinos es mediante la fitorremediación, una estrategia económicamente viable y ambientalmente segura por sus mecanismos desde un nivel macroscópico hasta microscópico, y combatir los contaminantes, incluida la salinidad; en otras palabras, es la descontaminación de los suelos, mediante plantas y sus microorganismos asociados para la mejora funcional y recuperación de suelos contaminados y salinos. Este método implica la utilización de especies de plantas que pueden metabolizar y acumular estos contaminantes del medio ambiente y mitigar el problema de la contaminación del suelo y del agua. En resumen, la fitorremediación implica procesos naturales en los cuales las plantas y microbiota asociada a sus raíces degradan o secuestran los contaminantes (Farooq *et al.*, 2015).

Hay métodos ampliamente utilizados para reducir la salinidad y la sodicidad de los suelos, entre los que se incluye la lixiviación y la aplicación de enmiendas orgánicas; sin embargo, otros métodos de recuperación de suelos salinos incluyen la agroforestería y el biodrenaje (Shrivastava y Kumar, 2015); también se tiene la tecnología de los biofertilizantes, que utilizan microorganismos benéficos para controlar la salinidad del suelo, ya que es parte de sus procesos metabólicos (Zúñiga, 2011). El uso de enmiendas orgánicas es otra estrategia para la recuperación de suelos salinos porque mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Leogrande y Vitti, 2018).

Algunos investigadores recomiendan varios métodos de recuperación de suelos salinos:

a) Lixiviación. Cuando se irriga con agua salubre se procura disolver las sales hacia abajo y lejos de la zona de la raíz, mediante la irrigación con exceso de agua.

b) Drenaje. El drenaje artificial del subsuelo consiste en una combinación de tuberías de drenaje subterráneas horizontales y verticales, pozos de alivio, pozos de bombeo y excavación de zanjas de drenaje, a fin de recuperar los suelos salinos (Feng *et al.*, 2017).

c) Soluciones biológicas. Esto es usar especies halófitas e incluir la domesticación de especies silvestres que son resistentes a la salinidad.

d) Desalinización del agua. Es una alternativa para recuperar los suelos salinos en tierras irrigadas; sin embargo, este método no es recomendado por su alto costo.

e) Prácticas de cultivos. Consiste en cultivar diferentes especies en la misma área a fin de hacer frente a la salinización del suelo.

El método a aplicar para la recuperación de los suelos salinos depende del objetivo, el tamaño del área, la profundidad del suelo, el número y la frecuencia de las mediciones, el grado de precisión requerido y los recursos disponibles.

El problema de la salinidad en los suelos se verá acentuado por el cambio climático, especialmente en la agricultura y la ganadería a través de los cambios fenológicos asociados al desplazamiento de las estaciones, el aumento del estrés hídrico, los daños por calor y por eventos extremos, por lo que se espera un descenso en la producción de cultivos herbáceos principalmente en los cultivos de secano (Sanz y Galán, 2021). Por otro lado, la escasez de agua y el uso de agua de baja calidad pueden llevar a la acumulación de sales en el suelo, ya que la lixiviación se reduce y las sales contenidas en el agua de riego no se lixivian lo suficiente (Bartel – Sunkar, 2005).

En resumen, la salinidad y la sodicidad del suelo son problemas que requieren la eliminación de la sal de la zona radical y ésta es quizás la forma más efectiva y duradera de minimizar o incluso eliminar los efectos perjudiciales de este problema (Munns, 2002). Para controlar los niveles de salinidad, el manejo debe incluir la recuperación de suelos salinos con prácticas de fertilización y

riego que tengan como objetivo prevenir la salinización del suelo y mitigar el efecto de la salinización del suelo (Almeida, 2017).

Los suelos salinos se pueden recuperar mediante prácticas agronómicas apropiadas de manejo y uso del suelo tales como la aplicación de enmiendas orgánicas, entre las que se incluyen composta de ganado vacuno, biochar y vermicomposta (Larney *et al.*, 2012). El desarrollo de cultivos tolerantes a la sal es uno de los objetivos principales del fitomejoramiento, y aunque se han encontrado variedades tolerantes a la sal, el progreso del mejoramiento genético ha sido lento y no ha tenido el éxito deseado (Dodd y Pérez-Alfocea, 2012).

3.8. Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas a suelos salinos

Los suelos salinos son un problema que afecta la germinación, el crecimiento, desarrollo y la productividad de muchos cultivos agrícolas en todo el mundo (Almeida, 2017), mientras que la aplicación de enmiendas orgánicas es conocida por disminuir los efectos de la salinidad en los suelos (Wichem, 2020) porque incorporan materia orgánica, microorganismos, nutrientes, mejoran la estructura, la textura, la permeabilidad y la retención de agua en el suelo (INTA, 2013). Por otro lado, está documentado el hecho de que la aplicación de enmiendas orgánicas es un método eficaz para reducir la salinización del suelo porque reducen valores de la conductividad eléctrica (CE) del suelo y aumentan la diversidad de la comunidad bacteriana del suelo, mejorando las interacciones entre los microorganismos mejorando el crecimiento del cultivo (Shrivastaba y Kumar, 2015).

La aplicación de enmiendas orgánicas, por su aporte de materia orgánica al suelo en forma de compostajes de estiércol de ganado, residuos vegetales, subproducto de actividades agropecuarias o municipales, etc., mejoran las propiedades físicas del suelo (estructura, permeabilidad, capacidad de retención de agua, etc.), químicas (pH, CE, CIC, etc.) y biológicas. También favorecen el crecimiento de las plantas y no contaminan ni el subsuelo ni las aguas subterráneas (Leogrande y Vitti, 2019); además, las enmiendas orgánicas incrementan el rendimiento de los cultivos (Escalona-Sánchez, 2021) y constituyen una alternativa eficaz para mejorar la productividad de los cultivos agrícolas (Lakhdar *et al.*, 2009); empero, aún no son totalmente aceptadas entre los productores por su olor, contenido de patógenos, toxinas y otros contaminantes, los cuales son fácilmente transportables por la escorrentía (Larney *et al.*, 2012).

Aunque se han implementado muchas técnicas para el reciclaje de dichos residuos orgánicos, entre las que se cuenta el compostaje, utilizado como abono orgánico para mejorar los suelos agrícolas, siendo uno de los principios de la agricultura sostenible por su contribución a la fertilidad del suelo y a la salud vegetal. Entre muchos de los desechos orgánicos se incluyen el estiércol de ganado, residuos y desechos vegetales y se cuentan como las mejores prácticas para recuperar suelos salinos porque recuperan la fertilidad de dichos suelos y mejoran el desarrollo y rendimiento de los cultivos (López-Morales *et al.*, 2022).

La aplicación de las enmiendas orgánicas en dosis adecuadas ayuda a conservar la salud de los suelos porque incorporan materia orgánica y mejoran la estructura del mismo (Leogrande y Vitti, 2019); además, mejoran la conductividad hidráulica, la respiración microbiana, la macro porosidad, la mineralización, la capacidad de retención de agua e incrementa la población de microorganismos, bacterias y hongos de los suelos (Willemijn *et al.*, 2020), facilitando la disponibilidad de los nutrientes esenciales para las plantas, con el proceso de mineralización (Sela, 2009) y entre los que se cuenta el nitrógeno, fósforo y potasio (Verma y Verma, 2012). Dado lo anterior es necesario encontrar enmiendas orgánicas que recuperaren de manera efectiva la fertilidad del suelo.

3.8.1. Aplicación del biochar (biocarbón)

Estudios recientes han reportado que la aplicación de biochar incrementa el contenido de carbono, la disponibilidad de nutrientes y mejora el crecimiento de las plantas (Sun *et al.*, 2015), ya que es un producto orgánico rico en carbono y que se produce mediante la pirolisis de madera, hojas, residuos orgánicos, estiércoles, etc. (Tortosa, 2015). El biochar se produce en condiciones de baja temperatura y en ausencia de oxígeno (Lehmann, 2007), aunque su producción preferente es de residuos forestales o de la agricultura (Hunt *et al.*, 2010). El biochar es aplicado para optimizar la productividad de los cultivos y para reducir el efecto adverso de los fitopatógenos (Yadav *et al.*, 2016), aumentar la productividad de los cultivos (Olmo, 2016), mejorar la fertilidad del suelo (Mousa, 2017) y promover la formación de humus (Laird, 2009).

En climas tropicales y templados, el biochar reduce la lixiviación de nutrientes e incrementa la retención de agua (Hunt *et al.*, 2010), también reduce las emisiones de los gases de efecto invernadero hasta en 10% (Woolf *et al.*, 2010), pero su efecto depende de las condiciones del

clima, del suelo, del tipo de cultivo y de las propiedades físicas y químicas del mismo (Zwieten *et al.*, 2010). El biochar es una alternativa para la captura de carbono, disminuir las emisiones de óxido nitroso (N₂O) y de metano (CH₄), principales gases de efecto invernadero (McHenry, 2011), dependiendo su efectividad de la cantidad aplicada al suelo (Liu *et al.*, 2014), de manera que mediante la aplicación de biochar se pueden recuperar los suelos salinos y reducir las emisiones anuales de CO₂, N₂O y CH₄ hasta en 12% y el mérito científico de los beneficios de biochar como enmienda del suelo ha sido probado durante años y se sabe de su utilización en la agricultura ecológica, ya que incorpora grandes cantidades de materia orgánica al suelo (Gunarathne *et al.*, 2020).

Por otro lado, el biochar reduce los problemas asociados con el uso de fertilizantes inorgánicos tradicionales, tales como las pérdidas excesivas de nutrientes por escurrimiento de dichos fertilizantes inorgánicos y que contaminan las fuentes de agua; además, el biochar reduce el estrés de las plantas inducido por la salinidad, como es el caso del cultivo del maíz (Muktamar *et al.*, 2018). Dado lo anterior, numerosos estudios afirman que los componentes del biocarbón resisten la oxidación química y biológica, por lo que su tiempo de duración es de cientos a miles de años (Woolf *et al.*, 2010); además, la aplicación del biochar la hace una enmienda muy valiosa como sumidero de carbono, eliminando el dióxido de carbono de la atmósfera y contribuyendo a la mitigación del exceso de CO₂ en la atmósfera (Verheijen *et al.*, 2009).

3.8.2. Aplicación de vermicomposta

El vermicompostaje es el proceso mediante el cual las lombrices se utilizan para convertir materiales orgánicos –generalmente desechos– en un material similar al humus conocido como vermicomposta (Sharma y Garg, 2019). En este proceso las lombrices se alimentan de los desechos industriales, urbanos, domésticos, agrícolas, animales, de papel y sólidos, e incluso de aguas residuales, lo cual es conveniente para el reciclaje de millones de toneladas de desechos que la población mundial produce y se origina un ambiente adecuado para la germinación de las semillas porque las lombrices rojas (*Eisenia spp.*) proveen nutrientes orgánicos al suelo; además, la vermicomposta contiene sustancias húmicas que, al mezclarse con los componentes orgánicos del suelo y las raíces de las plantas, aumentan la tolerancia a la salinidad (Ruiz-Lau *et al.*, 2020). La vermicomposta es muy eficaz para la recuperación de los suelos afectados por la sal al recuperar la fertilidad del suelo y optimizar el rendimiento de los cultivos (Bin-Dohaish, 2020).

Según Viana (2021), los principales beneficios de la vermicomposta son: a) la estabilización del suelo, b) mejora del ciclo de nutrientes, c) reciclaje de desechos orgánicos, y, d) aumento de la resistencia a enfermedades fúngicas y patógenos de cultivos; además, la vermicomposta aumenta el crecimiento, rendimiento y calidad de las plantas y destaca entre las enmiendas orgánicas por su contenido abundante en humus, en macro y micronutrientes (Hernández-Rodríguez *et al.*, 2014); además, su aplicación trae un beneficio adicional como bioplaguicida con buenos resultados para el control de patógenos en los cultivos y porque reduce la utilización de pesticidas químicos, y se ha demostrado que la aplicación de la vermicomposta es eficaz como fungicida, supresor de áfidos, nemátodos y ácaros de los cultivos (Contreras-Blancas, 2014).

El vermicompostaje es una técnica ecológica con un producto resultante rico en nutrientes que ayudan a mejorar la salud y la fertilidad de los suelos y de las plantas; asimismo, ayuda a reducir el uso de fertilizantes químicos y los costos generales de producción, por lo que se considera una alternativa para producir productos orgánicos más saludables, también, por su papel esencial en el reciclaje de residuos es una buena elección para el medio ambiente, ya que mantiene el equilibrio del N, P, K, Mg, Fe y otros nutrientes en el suelo (Bin- Dohaish, 2020).

3.8.3. Aplicación de la composta de ganado vacuno

La composta de ganado vacuno es estiércol de animal que se deja descomponer por un tiempo a temperatura de 55 a 63 ° C, hasta que esta aireado, no huele y está libre de patógenos y se aplica al suelo como una enmienda rica en nutrientes. La composta de ganado vacuno es principalmente pasto digerido, pero puede contener rastros de heno, paja y granos y se debe aplicar ligeramente en el suelo para evitar que los nutrientes se volatilicen (Traunfeld, 2022).

Entre los beneficios de la aplicación de composta de ganado vacuno se tiene el incremento del carbono orgánico, mejora de la estructura y porosidad del suelo y aumento de la capacidad de lixiviación de las sales (Lakhdar *et al.*, 2009); además, es una fuente de nutrientes y materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, ayudando a restaurar los suelos salinos (Laich, 2011), además de mejorar las propiedades químicas, biológicas y físicas del suelo, la composta de ganado vacuno, aumenta la productividad de los cultivos, mejora la infiltración del agua, reduce la erosión del suelo e incrementa la diversidad bacteriana (Sun *et al.*, 2015); asimismo, regula el pH del suelo, elimina el gas amoniacal, las semillas de malezas, mejora la aireación, la retención de agua y

elimina ciertos patógenos (Tilley, 2021); también incrementa el nitrógeno, fósforo y potasio disponibles en el suelo (Zhang *et al.*, 2020). En resumen, la aplicación de composta de ganado vacuno promueve el crecimiento del maíz hasta 8.4 t ha⁻¹ en dosis de 24 t ha⁻¹, aumenta el contenido de materia orgánica y reduce la salinidad del suelo (Li *et al.*, 2022).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del área experimental

La investigación se realizó en el campus Montecillo del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México coordenadas: longitud: -98.907222, latitud: 19.455000 a una altitud de 2220 metros sobre el nivel del mar. En el año la temperatura varía de 6 °C a 26 °C. La precipitación en el área experimental fue de 506 mm en cultivo de secano (temporal) de junio a diciembre de 2021. El periodo del cultivo desde la siembra hasta la cosecha fue de 143 días, con temperaturas máximas promedio de 28 °C y temperaturas mínimas promedio de 11 °C. Se seleccionaron tres parcelas de niveles diferentes de salinidad del suelo, de 500 m² cada una.

- a) Parcela 1, suelos ligeramente salinos: conductividad eléctrica (0,36 a 2,7 dS m⁻¹)
- b) Parcela 2, suelo salino: conductividad eléctrica (2,7 a 8,3 dS m⁻¹)
- c) Parcela 3, suelo muy salino: conductividad eléctrica (> 8,4 dS m⁻¹).

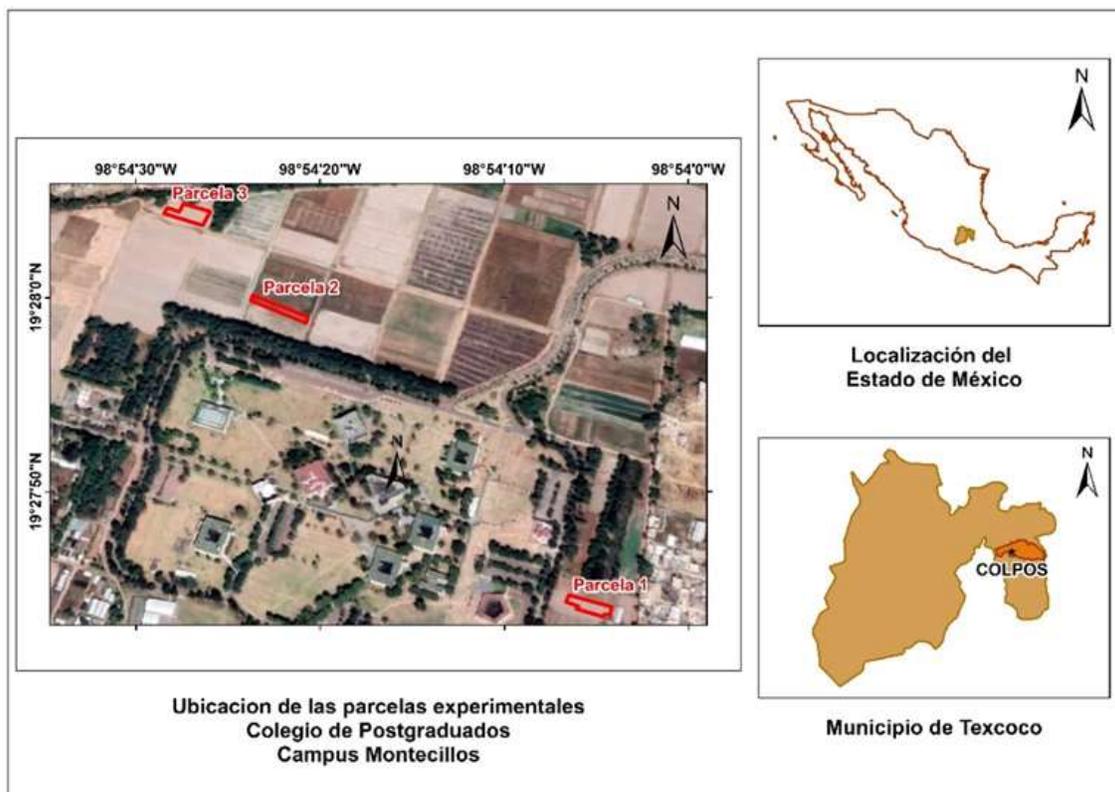


Figura 5. Localización del área experimental

4.2. Selección de las tres enmiendas orgánicas

Se utilizaron tres enmiendas orgánicas que tuvieran efecto en el nivel de salinidad del suelo o en sus consecuencias (disponibilidad de materia orgánica, actividad biológica, etc.), y aplicar en cada parcela tres dosis por cada enmienda.

4.3. Descripción de los tratamientos

Las enmiendas aplicadas fueron vermicomposta, biochar y composta de ganado vacuno, en tres dosis: 0, 5 y 10 t ha⁻¹. Estas dosis en cada uno de los tratamientos se determinaron de acuerdo con la composición de cada enmienda y con base en los resultados analíticos de la capa cultivable del suelo antes de la siembra del maíz en cada parcela. En cada uno de los tres tipos de suelos según su salinidad, se sembró el híbrido trilineal de maíz H-S2, con un nivel de germinación de 90%, dos semillas por golpe cada 50 cm en seis surcos. La densidad de población fue de 25,000 plantas ha⁻¹, estimando un 25% de pérdida de plántulas.

4.4. Características del suelo de las parcelas experimentales

Los suelos del campus del Colegio de Posgraduados en Montecillo son de origen lacustre, tipo Solonchak, con problemas de salinidad, pH alto, baja capacidad de intercambio catiónico, alto contenido de arcillas, bajo drenaje y con niveles freáticos altos (INEGI, 2019). Entre las más destacadas plagas que se encontraron en las parcelas experimentales se tienen:

a) El gusano de alambre (*Agriotes spp.*). El daño es ocasionado por las larvas al alimentarse de semillas, coleóptilo o de las raíces alimenticias (Figura 4).

b) Gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*). Las larvas dañan primero las puntas de las mazorcas y se comen el grano en desarrollo, dañando la punta de la mazorca

4.5. Preparación del terreno y siembra

Mediante escarda mecánica se eliminaron las malas hierbas en las plantas y en todo el terreno para evitar los hospederos de las plagas. Previo a la siembra, se aplicó un barbecho y doble paso de rastra al terreno para eliminar las malas hierbas, evitar los hospederos de las plagas y que el suelo quedara suelto, poroso y capaz de captar agua sin encharcamientos, especialmente en la superficie donde se hizo la siembra en surcos a una profundidad de 5 cm, a una temperatura del

suelo de 12 ° C. La siembra se realizó el 7 de junio de 2021 en el periodo de primavera-verano de acuerdo con las condiciones climáticas de la región, y el cultivo se desarrolló en agricultura de secano.

4.6. Aplicación de las enmiendas orgánicas

En el momento de la preparación del terreno, las enmiendas orgánicas fueron aplicadas localmente y mezcladas con la capa superficial del suelo, en círculos de 20 cm de diámetro y en los primeros 20 cm de profundidad. En este experimento se aplicaron enmiendas orgánicas provenientes del mercado local y nacional: vermicomposta, biochar y composta de ganado vacuno en dosis de 0 (control sin aplicación), 5 y 10 t ha⁻¹, las cuales se aplicaron localmente en cada una de las plantas (Anexo D).

4.7. Diseño del experimento

El diseño experimental fue bloques completos al azar con tres repeticiones con arreglo factorial, con tres factores, a fin de determinar los efectos de las enmiendas orgánicas y sus dosis de aplicación en tres niveles de salinidad del suelo. La unidad experimental fue una parcela de 8 m de largo × 3.75 m de ancho, con seis surcos separadas 0,85 m. Los surcos uno y seis representaron los bordes de la parcela, en los que no se tomó ningún dato agronómico.

4.8. Análisis del suelo y de las enmiendas orgánicas

Después de seleccionar las parcelas donde se instaló el cultivo y antes de la siembra, se extrajeron muestras compuestas del suelo para su análisis. Se determinó el estado de la disponibilidad de algunos nutrientes principales del suelo, de las enmiendas orgánicas y de los niveles de salinidad. En cada parcela se tomó una muestra de suelo con una pala a una profundidad de 20 cm al azar y en zigzag, en una mezcla compuesta de 5 submuestras. A final del ciclo del cultivo y posterior a la cosecha se colectaron muestras del suelo en cada unidad experimental y de acuerdo con procedimientos estandarizados de laboratorio (Klute, 1986).

En el laboratorio se determinaron las siguientes propiedades: RAS, pH, CE, MO y textura del suelo (% de arena, limo y arcilla), en una pasta saturada del suelo y mediante los siguientes protocolos:

- ✓ El pH se determinó mediante un medidor de conductividad eléctrica (METTLER TOLEDO).
- ✓ La textura se determinó mediante el método de pipeta (Kim, 1996).
- ✓ La materia orgánica se determinó mediante el método de Wakkley y Black (Nelson y Somers, 1996).
- ✓ La CE se determinó en una mezcla de suelo saturada con agua destilada a una temperatura de 25 °C y mediante un conductímetro se determinaron los iones presentes en la solución, marca Milwaukee de 0.0 10 mS, portátil MW302 PRO).

En el sitio donde se realizó la investigación, se encontraron varias plagas, a las cuales no se les aplicó ningún plaguicida, ni se trató la semilla con insecticida sistémico para proteger el cultivo durante las primeras semanas de desarrollo contra gusano trozador, gusano soldado y cogollero. Se realizaron inspecciones de campo en las parcelas desde la germinación hasta la cosecha.

4.9. Prácticas agronómicas del cultivo en las parcelas experimentales

Las siguientes prácticas de manejo agronómico fueron aplicadas.

- a) Selección de semilla de alto rendimiento,
- b) Selección de parcelas por nivel de salinidad
- c) Preparación del terreno
- d) Muestreo del suelo (1 kg)
- e) Siembra en seco periodo (primavera-verano) (densidad, espacio entre hileras)
- f) Aplicación de enmiendas orgánicas
- g) Labranza (eliminar malezas)
- h) Cosecha y muestreo de mazorcas y peso de 1000 granos

4.10. Cálculo del rendimiento del cultivo de maíz

En las líneas 3 y 4 de cada parcela, se determinó el rendimiento en grano en 5 mazorcas por línea, en un área de 10 m². Asimismo, se contó el número de granos por mazorca y se seleccionaron 1000 granos a fin de obtener el peso seco de estos granos a 14% de humedad. El método utilizado para calcular el rendimiento en grano del cultivo fue el método de los componentes del maíz

(Calvo, 2019), el cual se realizó después de 160 días de la siembra y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{densidad (plantas/10m}^2\text{)} \times \text{número de mazorcas/planta} \times \text{número de granos/mazorca} \times \text{peso de 1000 granos (g)}$$

1. Número de mazorcas por hectárea. Se determinó contando el número de mazorcas en una superficie de 10 m². La separación entre surcos fue de 0.8 m y 12.5 m de longitud (equivalente a 10 m²). El número de mazorcas se determina de la siguiente manera:

$$\text{Número de mazorcas por hectárea} = \text{Número mazorcas en 10 m}^2 \times 1,000.$$

2. Número de granos por mazorca. Se cuentan el número de filas en cada mazorca y el número de granos en cada fila. El número de granos por mazorca se calcula multiplicando el número de filas por el número de granos de cada fila.

3. Número de granos por hectárea y peso de 1000 granos (PMG). Se calculó cuando el cultivo había alcanzado su madurez fisiológica, o sea, hasta que el maíz llegó al tiempo de la cosecha. Se recogieron mazorcas (muestras) de las hileras 3 y 4 en 10 m² de cada parcela experimental y se desgranaron. Las muestras de 1000 granos de cada parcela experimental se secaron por 48 h hasta que el peso se estabilizó a una humedad de 14%, y con el promedio del peso de 1000 granos se calculó el cálculo de rendimiento de grano.

4.11. Análisis estadístico

El efecto de las enmiendas orgánicas se evaluó mediante un análisis de varianza considerando los tres factores seleccionados: nivel de salinidad del suelo, tipo de enmienda y dosis aplicada, así como sus interacciones. Se aplicó la prueba Tukey de comparación de medias con un nivel de significación del 5% para las variables significativas. Los análisis estadísticos se hicieron con el programa RStudio.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis de varianza del rendimiento del cultivo de maíz

Las diferencias encontradas en el experimento fueron muy significativas entre las enmiendas aplicadas y entre los niveles de salinidad del suelo (alta, media y baja). Las diferencias y significancia estadística se denotan en el Cuadro 3.

Cuadro 3 . Análisis de varianza para rendimiento de grano.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr > F
Enmienda (E)	6	6.3 666	1. 06111	3. 4551	0.007276**
Salinidad (S)	2	3.5 624	1. 79121	5. 8324	0. 005818**
E × S	12	6.5 946	0. 54955	1. 7894	0.081857ns
Residual	42	12. 8986	0. 30711		

5.2. Efecto de las enmiendas orgánicas y tratamientos en el rendimiento del cultivo

Se encontraron diferencias muy significativas debido a la aplicación de enmiendas orgánicas en el rendimiento del cultivo de maíz. En el suelo con salinidad alta (9.9 dS m⁻¹) el rendimiento de 4.69 t ha⁻¹ se obtuvo con la aplicación de composta de vacuno en dosis de 5 t ha⁻¹; en el suelo con salinidad media (5.3 dS m⁻¹) el rendimiento obtenido fue de 4.98 t ha⁻¹ fue obtenido mediante la aplicación de composta de ganado vacuno en dosis 10 t ha⁻¹ y en el suelo de salinidad baja (2.7 dSm⁻¹) el rendimiento de 4.47 t ha⁻¹ se logró mediante la aplicación de biochar, dosis de 10 t ha⁻¹.

Lo anterior confirma lo encontrado por Song *et al.* (2015), quienes en un experimento de campo de 22 años en Gongzhuling, provincia de Jilin, China, investigaron la respuesta del rendimiento del maíz a la aplicación de enmiendas orgánicas y observaron que éstas incrementaron el rendimiento de grano del cultivo de maíz. En el presente estudio el rendimiento máximo del cultivo se alcanzó en el suelo con salinidad media; este terreno en específico ha sido cultivado con maíz por varios años, irrigado y fertilizado todo el tiempo. Los resultados de este estudio mostraron

que no hay diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, pero sí hubo diferencias significativas entre los tratamientos aplicados y el testigo (Cuadro 4 y Figura 6).

Cuadro 4. Rendimiento de grano en los tratamientos de enmienda y dosis aplicadas.

Tipo Enmienda	Dosis (t ha ⁻¹)	Rendimiento (t ha ⁻¹)	Agrupamiento estadístico
Vermicomposta	10	4.393112	a
Biochar	5	4.332688	a
Composta	5	4.274071	a
Biochar	10	4.242371	a
Composta	10	4.154347	ab
Vermicomposta	5	4.1011671	ab
Control	0	3.3800027	b

Tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

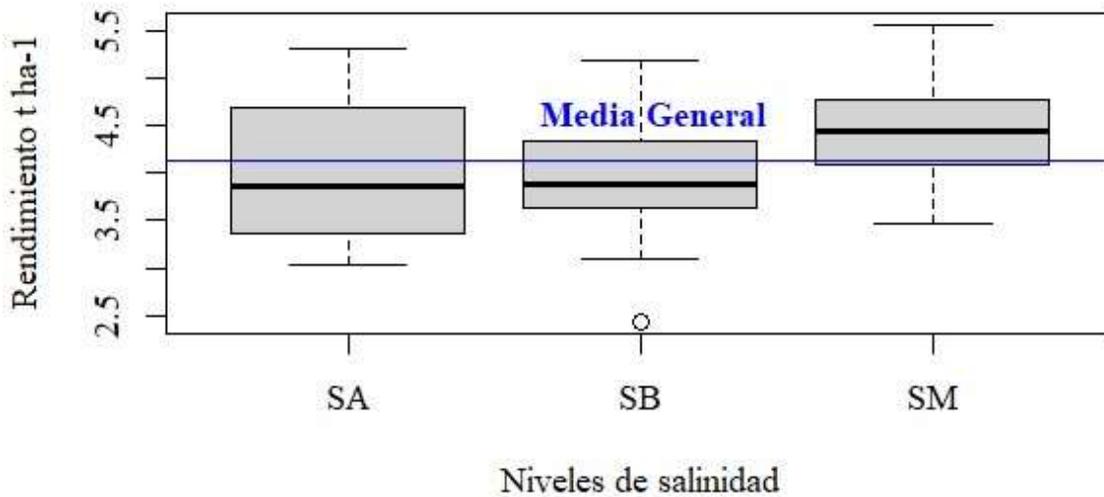


Figura 2. Rendimiento del cultivo de maíz en los niveles de salinidad. SA: salinidad alta, SB: salinidad baja, SM: salinidad media.

El mayor rendimiento se obtuvo en el suelo con salinidad media, mientras que en los suelos con salinidad alta y baja los rendimientos fueron menores y similares entre ambos niveles de salinidad en comparación con el testigo. Los rendimientos alcanzados corroboran lo afirmado por

Arriechi y Mora (2005) quienes lograron un mayor rendimiento del cultivo de maíz por la aplicación de enmiendas orgánicas en el Estado de Yaracuy, Venezuela.

5.3. Efecto de las enmiendas orgánicas en varias propiedades químicas del suelo

En este estudio se comprobó el efecto beneficioso de las enmiendas orgánicas en la recuperación de varias propiedades químicas del suelo después de 5 meses de su aplicación. Estos beneficios incluyen la reducción de la relación de absorción de sodio (RAS), aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC), reducción de la conductividad eléctrica (CE), aumento de la materia orgánica (MO) y disminución del pH. La aplicación de enmiendas orgánicas origina la descomposición de la materia orgánica y la producción de más ácidos orgánicos, lo que reduce el pH de la capa superior del suelo (Hong & Chen, 2019). Los parámetros del pretratamiento y cinco meses después de la aplicación de las enmiendas orgánicas se detallan en el Cuadro 5.

Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Murillo-Montoya *et al.* (2019), quienes afirman que las enmiendas orgánicas se utilizan para mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo y las plantas optimizan su rendimiento.

Cuadro 5. Parámetros del suelo antes y al final del cultivo de maíz.

Nivel de Salinidad	Antes					Después				
	RAS meq L ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	CE dS m ⁻¹	pH	MO %	RAS meq L ⁻¹	CIC cmol kg ⁻¹	CE dS m ⁻¹	pH	MO %
Alta	1.8	2.77	8.4	9.9	1.8	0.25	33.35	0.6	8.3	2.1
Media	3.2	2.87	5.3	9.1	2.0	0.17	28.17	0.63	8.3	2.7
Baja	7.8	3.16	2.7	8.2	2.8	0.18	27.00	1.7	8.1	3.4

5.4. Efecto de las enmiendas orgánicas en la relación de absorción de sodio (RAS)

En el suelo con salinidad alta la relación de absorción de sodio (RAS) se redujo 86% (de 1.8 a 0.25 meq L⁻¹). En el suelo con salinidad media la RAS se redujo en 94% (de 3.2 a 0.17 meq L⁻¹), mientras que en el suelo con salinidad baja se redujo en 98% (de 7.8 a 0.18 meq L⁻¹). El cambio en la RAS se muestra en la Figura 7.

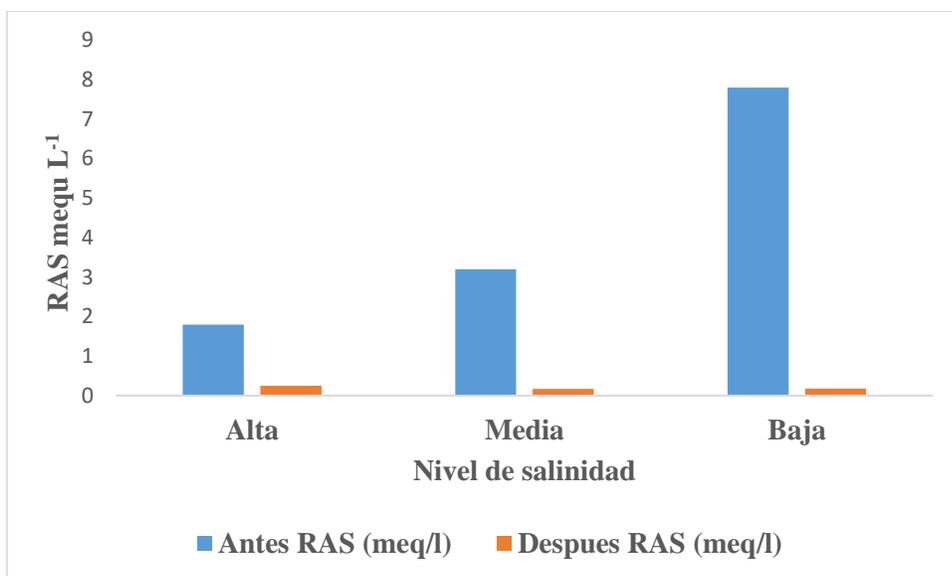


Figura. 7. Reducción de la relación de absorción del sodio (RAS).

Estos resultados concuerdan con lo encontrado por Chaganti *et al.* (2015), quienes afirman que las enmiendas orgánicas reducen significativamente la relación de absorción del suelo debido a que se incrementan la concentración de calcio (Ca^{+2}) en el suelo.

5.5. Efecto de las enmiendas en la capacidad de intercambio catiónico (CIC)

Previo al tratamiento los análisis de laboratorio de los suelos salinos, éstos revelaron valores de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 2.8, 2.9 y 3.2 meq 100 g^{-1} en los suelos con salinidad alta, media y baja, respectivamente. Después de cinco meses de la incorporación de las enmiendas orgánicas se obtuvieron incrementos en la capacidad de intercambio catiónico de 33, 28 y 27 meq 100 g^{-1} en los suelos con salinidad alta, media y baja, respectivamente. Estos incrementos se presentan en la Figura 8.

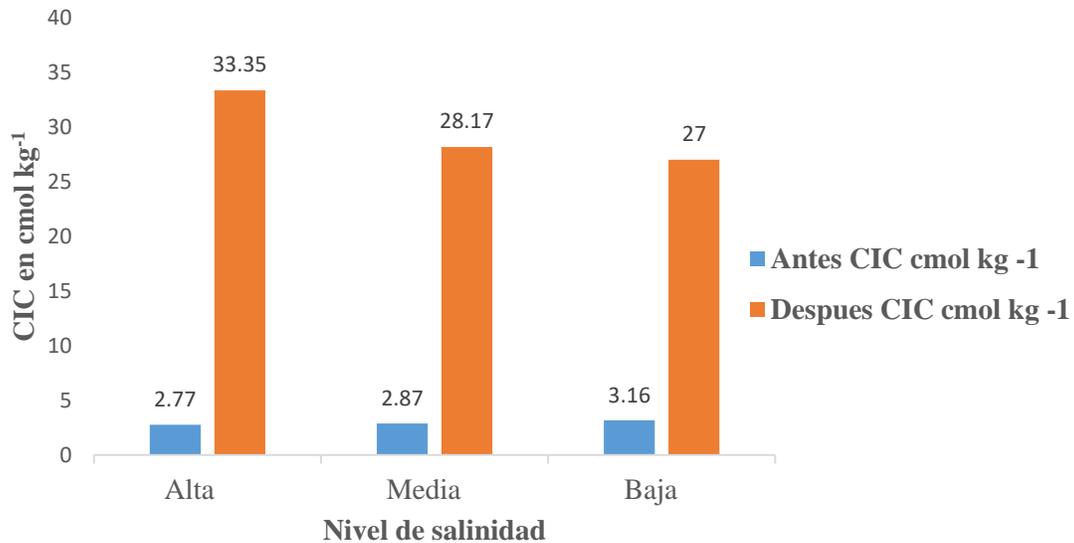


Figura 8. Aumento de la capacidad de intercambio catiónico como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.

Los incrementos de la capacidad de intercambio catiónico están de acuerdo con lo reportado por Mutammimah *et al.* (2020), quienes aseveran que la aplicación de enmiendas orgánicas incrementa la capacidad de intercambio catiónico debido a que el suelo se satura con cationes básicos intercambiables y originan suelos con alta capacidad de intercambio catiónico.

5.6. Efecto de las enmiendas orgánicas en la reducción de la conductividad eléctrica

En el suelo con salinidad alta la conductividad eléctrica se redujo en 96%, mientras que en el suelo de salinidad media la conductividad eléctrica se redujo en 92% y en el suelo con salinidad baja la conductividad eléctrica se redujo 78%. Este estudio ratifica lo encontrado por Aimituma-Franco *et al.* (2023), quienes certifican que se disminuye la conductividad eléctrica de suelos salinos mediante la aplicación de enmiendas orgánicas (Aimituma *et al.*, 2023). El análisis de varianza de la conductividad eléctrica indica que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados y entre los niveles de salinidad (Cuadros 6 y 7).

Cuadro 6. Análisis de varianza de la conductividad eléctrica en el estudio de aplicación de enmiendas en terreno salino.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor de F	Pr > F
Enmienda	6	54.398	9.066	5.2275	0.007330 **
Salin x Enm	2	113.214	56.07	32.6388	0.000014***
Residual	12	20.82	1.734		

** : significancia a $P \leq 0.01$, ***: significancia a $P \leq 0.001$.

Cuadro 7. Reducción de conductividad eléctrica por enmiendas aplicadas con respecto al testigo.

Tipo de Enmienda	Dosis (t ha ⁻¹)	Disminución	Desv. Standard	Mínima	Máxima	Letras de significancia
Biochar	10	-4.66	3.315	-7.95	-1.32	b
Biochar	5	-4.79	3.172	-8.08	-1.75	b
Composta vacuno	10	-4.86	2.871	-7.83	-2.1	b
Composta vacuno	5	-4.52	3.694	-8.01	-0.65	b
Testigo	0	0.000	0.000	0.000	0.000	a
Vermicomposta	10	-4.08	3.744	-7.47	-0.06	b
Vermicomposta	5	-4.37	3.168	-7.45	-1.12	b

Media del error standard es 1.734. Letras distintas indican diferencias estadísticas (Tukey, $P \leq 0.05$).

Aunque en algunos tratamientos hubo mayor disminución de la conductividad eléctrica que en otros, el tratamiento que disminuyó más la conductividad eléctrica con respecto al testigo fue la aplicación de la composta de ganado vacuno en dosis de 10 tha⁻¹.

Respecto a los niveles de salinidad hubo diferencias significativas; En el suelo con salinidad alta la conductividad eléctrica disminuyó en una mayor proporción que en el suelo con

salinidad media. A su vez, en el suelo con salinidad baja la conductividad eléctrica disminuyó menos que en los restantes niveles de salinidad. Lo anterior se debe a que un valor de conductividad eléctrica indica un nivel bajo de salinidad, y al no haber concentración de sales, no hay capacidad de la solución para conducir una corriente eléctrica (Figura 9.)

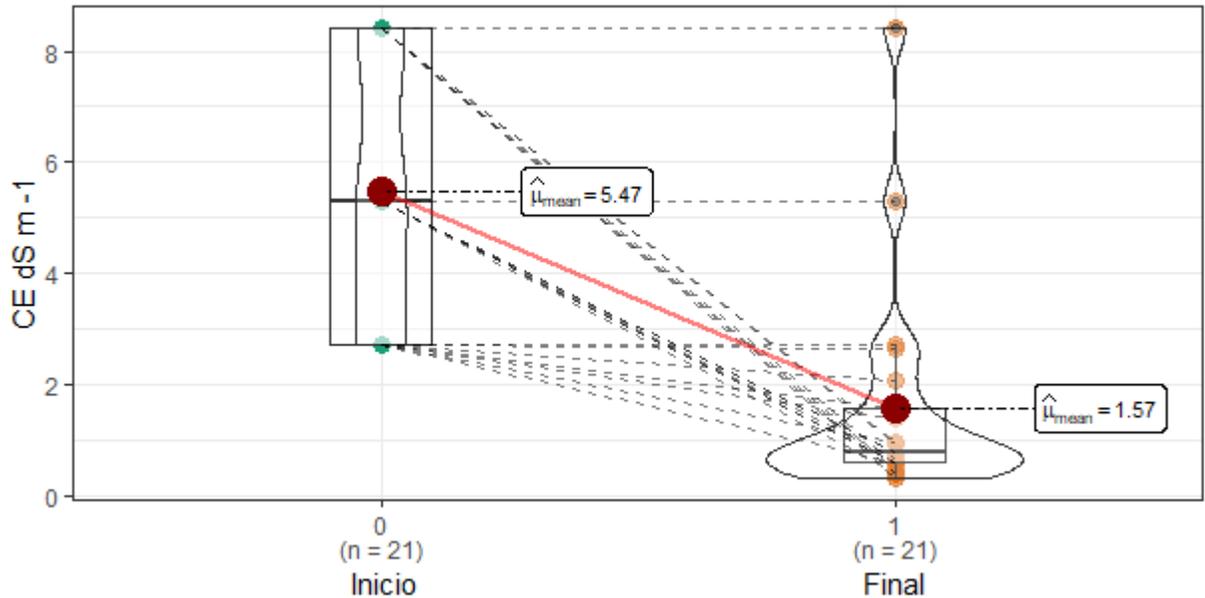


Figura 9. Reducción de la conductividad eléctrica como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.

5.7. Efecto de las enmiendas en la disminución del pH del suelo

Para el parámetro pH la diferencia entre medias de datos tomados en pretratamiento y después cinco meses de la aplicación de las enmiendas, existe una diferencia de 1.1 bajo la prueba de t de Student, con un valor estadístico de $t = 9.24$, 20 grados de libertad. El análisis de varianza indica que si existen diferencias significativas entre los valores de pH registrados antes de la aplicación de las enmiendas con respecto a los valores obtenidos al final del estudio bajo un intervalo de confianza del 95%. El valor de Cohen sD indica la magnitud del efecto, coincide con el valor de p-value e indica una diferencia significativa (Cuadro 8.).

Cuadro 8. Análisis de varianza (ANOVA) en el pH del suelo

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma Cuadrados	Media Cuadrados	Valor F	P (> F)
Tratamiento	6	4.41	0.735	22.75	0.0000067 ***
Sal x Trata.	2	1.21	0.606	18.77	0.0002022 ***
Residual	12	0.39	18.77		

***: significancia a $P \leq 0.001$.

Los resultados del presente estudio concuerdan con los obtenidos por Aimituma *et al.* (2023) en Ayacucho, Perú, quienes encontraron una reducción en el pH en suelos salinos al aplicar enmiendas orgánicas de estiércol de cuy (*Cavia porcellus*) y de ganado vacuno.

Por otro lado, no se encontraron diferencias significativas en la disminución del pH en los suelos con salinidad media y baja, pero sí hubo diferencias significativas al compararlos al suelo con salinidad alta (Cuadro 9 y Figura 10).

Cuadro 9. Disminución del pH en los niveles de salinidad como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.

Nivel de Salinidad	Valor disminución	Desviación standard	Letras de significancia
Media	-0,8285	0.3773	a
Baja	-0.0714	0.5023	a
Alta	-0.4142	0.6362	b

Medias con las mismas letras no son significativamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

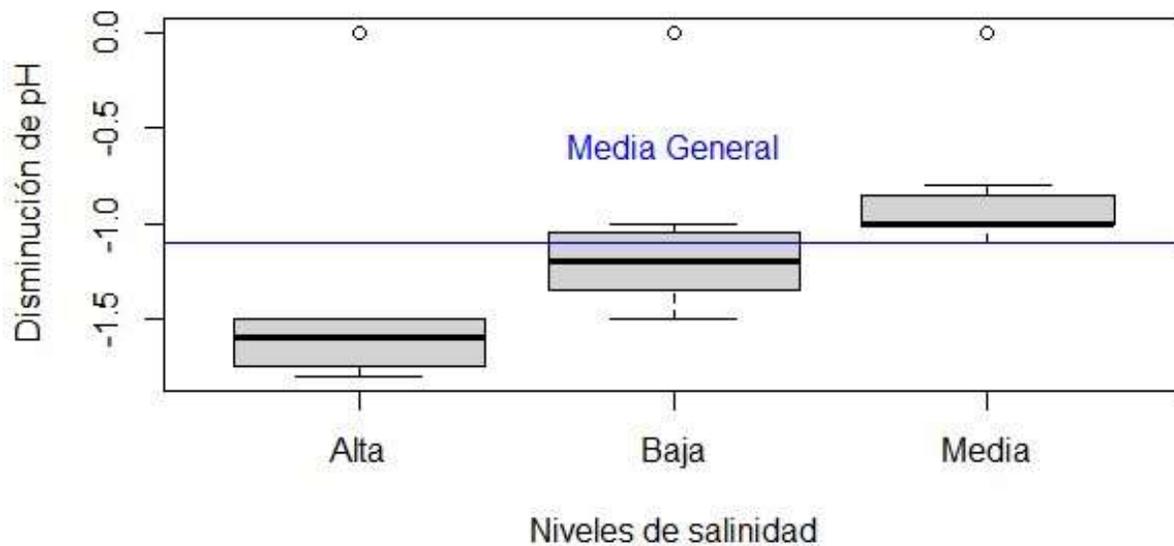


Figura 3. Disminución del pH en los niveles de salinidad como resultado de la aplicación de enmiendas orgánicas.

En este estudio se observó una tendencia a la disminución del pH en todos los tratamientos al compararlos con el testigo (Cuadro 10, Figura 11).

Cuadro 2. Disminución del pH con respecto al testigo por efecto de los tratamientos de enmiendas y dosis aplicadas.

Tipo	Dosis	Disminución	Letras
Enmienda	(t ha ⁻¹)		significancia
Testigo	0	0.000	a
Biochar	10	-1.167	b
Vermicomposta	10	-1.200	b
Biochar	5	-1.300	b
Composta	5	-1.300	b
Vermicomposta	5	-1.333	b
Composta vacuno	10	-1.433	b

Tratamientos con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $P \leq 0.05$).

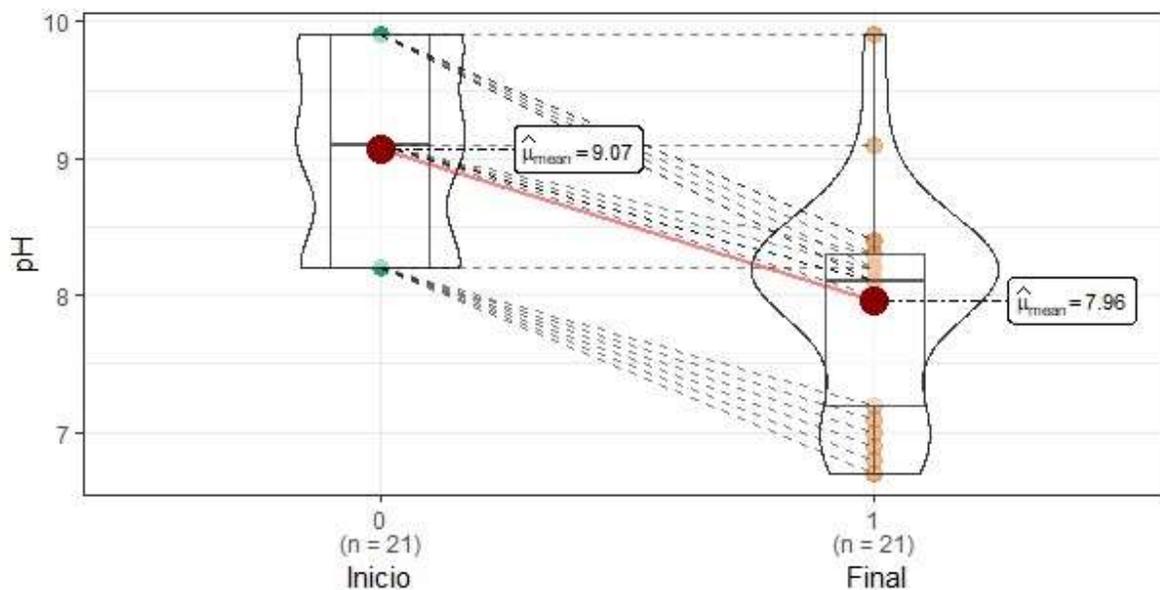


Figura 4. Disminución del pH por efecto de los tratamientos aplicados de enmiendas orgánicas.

5.8. Efecto de las enmiendas en el aumento de la materia orgánica

El análisis de varianza de la materia orgánica indica que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos aplicados, pero si hubo diferencias significativas entre los niveles de salinidad (Cuadro 11, Figura 12).

Cuadro 3. Análisis de varianza de la materia orgánica

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Pr > F	
Tratamientos	6	1.372	0.2286	1.332	0.3159	ns
Sal x Tratam.	2	1.663	0.831	4.844	0.0287	*
Residual	12	2.060	0.172			

*: significancia a $P \leq 0.001$, ns: no significativo.

El promedio del contenido de la materia orgánica al inicio del pretratamiento fue 2.20% y después de cinco meses de la aplicación de las enmiendas la materia orgánica aumentó a 2.55 % (Figura 12). Los resultados del incremento de la materia orgánica por aplicación de enmiendas orgánicas confirman los resultados de Cesarano *et al.* (2018), quienes aseveran que el uso de

enmiendas tales como la composta y otros fertilizantes orgánicos constituyen una práctica agrícola para incrementar la materia orgánica del suelo.

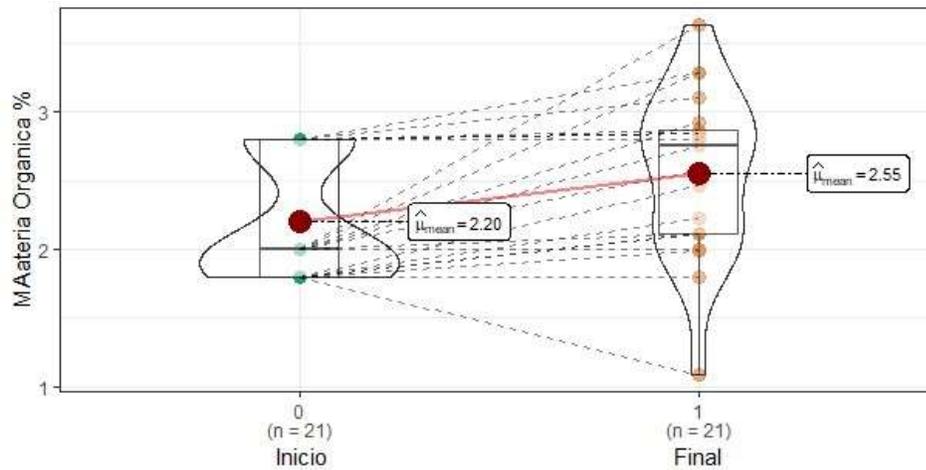


Figura 5. Aumento de la materia orgánica por efecto de los tratamientos aplicados de enmiendas orgánicas.

5.9. Cálculo de los grados días de crecimiento del maíz

Los grados días de crecimiento (GDD) se utilizan para estimar el desarrollo de las plantas (Qadir *et al.*, 2007), y se basan en la temperatura máxima promedio de 28.2 ° C y una temperatura mínima promedio de 11.2 ° C. registradas en el periodo. Para el cálculo de las unidades de crecimientos (GDD), se utilizó la ecuación:

$$\text{GDD} = (\text{Tmin} + \text{Tmax}) / 2 - 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde:

Tmin = Temperatura diaria mínima ° C

Tmax = Temperatura diaria máxima ° C

Aparte de la incorporación de las enmiendas orgánicas no se aplicó ninguna fertilización inorgánica.

En las variables evaluadas como el pH y la conductividad eléctrica, se produjo una disminución notable por el efecto de las enmiendas orgánicas aplicadas.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio se enfocó en evaluar el efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos salinos. Se comprobó la recuperación de suelos salinos mediante la aplicación de enmiendas orgánicas en diferentes dosis y de esta manera, queda en evidencia el efecto beneficioso de las enmiendas orgánicas en la recuperación de suelos salinos y su efecto positivo en el cultivo del maíz.

Los resultados mostraron que después de aplicar las enmiendas orgánicas en diferentes dosis, mejoraron significativamente las propiedades químicas como pH, conductividad eléctrica, relación de absorción de sodio, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los valores pretratamiento y los valores registrados al final de un ciclo de cultivo, es decir, cinco meses después de la aplicación de las enmiendas orgánicas, en relación con el testigo.

Como consecuencia de lo expuesto, se ha de aceptar la hipótesis inicial y a partir del análisis precedente, se concluye que la adición de enmiendas orgánicas a suelos salinos mejora a corto plazo las propiedades químicas del mismo, ya que asegura la incorporación de materia orgánica al suelo salino.

VII. RECOEMNDACIONES

Se recomienda aplicar enmiendas orgánicas a suelos salinos porque agregan nutrientes además de materia orgánica, lo que ofrece muchas más oportunidades para mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo cual es importante para la recuperación de suelos salinos.

VIII. LITERATURA CITADA

- Abril A.N., Noé, L., & Filippini, M. F. (2014). Manejo de enmiendas para restaurar la materia orgánica del suelo en oasis de regadío de Mendoza, Argentina. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 40(1), 83-91.
- Aguado-Santacruz, G. (2012). Introducción al Uso y Manejo de los Biofertilizantes en la Agricultura. CDMX: Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).
- Aimituma-Franco, K. M., Llanqui-Ticona, S. E. y Fernández-Rojas, H. (2023). Biorremediación de suelos salinos con enmiendas orgánicas de estiércol de cuy y vacuno, Cusco-Perú. *Revista Amazónica de Ciencias ambientales y Ecológicas* 2(1), e388.
<https://doi.org/10.51252/reacae.v2i1.388>
- Alcaraz-Ariza, F. (2012). *Salinidad y vegetación*. Murcia, España: Universidad de Murcia.
- Alcaráz-Ariza, F. (2012). Salinidad y vegetación. *Geobotánica*, 1-11.
- Alcaraz-Ariza, F. J. (2012). Salinidad y vegetación. *Geobotánica*, 1-9.
- Almeida-Machado, R. &.-S. (2017). Soil Salinity: Effect on Vegetable Crop Growth. Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, 2(3), 30
<https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030> .
- Alonso-Gómez, A. C.-D.-M.-D.-G. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento del amíz. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 341-349.
- Amos, H. V. (2015). Effect of cattle manure on the growth and yield performance of vegetable maize (*Zea mays Saccharata*) varieties under irrigation . *Scholars journal of Agriculture and Veterinary Sciences*, 2(4A), 319-323.
- Aragues, R. M.-C. (2014). Effects of deficit irrigation strategies in soil salinitation and sodification in a semiarid drip-irrigated peach orchard. *Agricultural Water Management*, 1-9.
- Arancon, N. E. (2006). Effects of humic acids from vermicomposts on plants growth. *European journal of Soil Biology*, 565-569-.
- Arrieche, I. and Mora, O. (2005). Efecto de la aplicación de residuos orgánicos sobre el cultivo del maíz en suelos degradados del Estado Yaracuy, Venezuela. *Bisagra* 17(3), 155
- Arora, S. S. (2017). *Bioremediation of Salt Afected Soils: An Indian Perspective*. Switzerland : Springer International Publishing.
- Badía-Villas, D. (1992). *suelos afectados por sales*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Badillo, L. (2021). El maíz transgénico: ventajas y desventajas, según expertos. *TecReview*, Ciencia.

- Balanzario-Figueroa, E. (2020). *Cambio climático y producción de maíz en México: un posible riesgo a la autosuficiencia alimentaria*. CDMX: Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático.
- Bauder, T. W. (2011). *Irrigation Water Quality Criteria*. fort Collins: Colorado state University Extension.
- Bin-Dohaish, E. (2020). Vermicomposting of Organic Waste with *Eisenia fetida* Increases the Content of Exchangeable Nutrients in Soil. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, (23), 501-509.
- Boll-Stiftung, H. (2021). *México: un país de maíz*. CDMX.
- Bommarco, R. K. (2013). Ecological intensificación: Harnessing ecosystems services for food security. *Trends & Ecology Evolution*, 230-238.
- Botella-Marrero, M. A. (2017). *efecto de la salinidad sobre las plantas*. Orihuela, España: Universidad Miguel Hernández .
- Cañedo, M. (2016). *La salinización de los ríos y lagos: una amenaza silenciosa*. Barcelona: Universidad Central de Cataluña.
- Carrow, N. &. (2012). *Best management practices for saline and sodic turfgrass soils: Assessment and reclamation*. Boca Raton, Florida, USA: Taylor & Francis Group.
- Castellanos, R.J.Z. (2000). Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. Editorial INTAGRI. Gobierno de México, 186 pag.
- Cesarano, G.; De Filippis, F.; La Stora, A.; Scala, F. and Bonanomi, G. (2017). Organic amendment type and application frequency affect crop yields, soil fertility and microbiome composition. *Applied Soil Ecology* 120, 254-264. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.08.017>
- Chaganti, N. V., Chrohn, D. M. and Simunek, J. (2015). Leaching and reclamation of a biochar and compost amended saline-sodic soil with moderate SAR reclaimed water. *Agricultural Water Management* 158, 255-265. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.05.016>
- Chinchmalatpure, A. (2017). *Reclamation and Management of Salt Affected Soils for Increasing Farm*. Bharuch, India: ICAR-Central Soil Salinity Research Institute, Regional Research Station.
- Collino DJ, S. F. (2015). Biological nitrogen fixation in soybean in Argentina: relationships with crop, soil, and meteorological factors. *Plant Soil*, 392(1-2):239-252.
- CONABIO. (2020). *Maíces*. CDMX: biodiversidad Mexicana.
- Contreras-Blancas, E. R.-V.-T.-G.-G.-M. (2014). Evaluation of Worm-Bed Leachate as an antifungal agent against pathogenic fungus *Colletotrichum gloeosporioides*. *Compost Science & Utilization*, 22(1):23-32.
- Corrales-Padilla, L. S.-L.-S. (2017). Fitopatógenos y aguas de riego. *Nova*, 71-89.

- Daliakopolous, I. N. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science Total Environment*, 727-739.
- Daliakopoulos, I. N. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science Total Environment*, 727-739.
- Darwish, T. A. (2005). Salinity evolution and crop response to secondary soil salinity in two agro-climatic zones in Lebanon. *Agriculture Water Management*, 152-164.
- Datta, K. K. (2002). Adverse effect of waterlogging and soil salinity on crop and land productivity in northwest region of Haryana, India. *Agriculture Water Management*, 223-238.
- Datta, K. K. (2002). Adverse effect of waterlogging and soil salinity on crop and land productivity in northwest region of Haryana, India. *Agriculture Water Management*, 223-238.
- Delgado-Londoño, D.M. (2017). Aplicación de enmiendas orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. *Lámpsakos*, 17, 77-83. <https://doi.org/10.21501/21454086.1907>
- Dodd, I. & A. (2012). Microbial amelioration of crop salinity stress. *Journal of Experimental Botany*, 3415-3428.
- Escalona-Sánchez, A. (2021). Uso de enmiendas en la producción de maíz para ensilaje con riego orgánico mineral. *Agronomía Costarricense*. 45(1), 177-192. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v45i1.45769>
- Fageria, N. G. (2011). Nutrient bioavailability in salt affected soils. *Journal of Plant Nutrition*, 945-962.
- FAO. (1974). *Leyenda del Mapa Mundial de Suelos*. Roma: Organización para la Agricultura y la Alimentación,.
- FAO. (2015). *Land and plant nutrition management service*. Rome: Food and Agriculture Organization.
- FAO. (2020). *Towards a definition of soil health*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2021). *Día Mundial del Suelo: la FAO pone de manifiesto la amenaza de la salinización del suelo para la seguridad alimentaria mundial*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura .
- FAO. (2021). *World map of salt-affected soils launched at virtual conference*. Rome: FAO.
- Feitosa de Vasconcellos, A. (2020). Biochar effects on amelioration of adverse. En A. & Abdelhafez, *Applications of Biochar for Environmental Safety* (pág. 276). London: InechOpen.
- Feitosa-de-Vasconcelos, A. (2020). Biochar effects on amelioration of adverse salinity effects on soils. En A. & Ahmed A. Abdelhafez, *Applications of Biochar for Environmental Safety* (págs. 1-12). London: Intech Open.

- Feng, G. Z. (2017). Effects of saline water irrigation on soil salinity and yield of summer maize (*Zea mays* L.) in subsurface drainage system. *Agricultural Water Management*, (193), 205–213, doi:10.1016/j.agwat.2017.07.026.
- Gharaibeh, M. E. (2010). Reclamation of calcareous-saline sodic soil using phosphoric acid and by-product gypsum. *Soil Use Management*, 141-148.
- González-Cortés, J. R.-M.-B. (2017). Aplicación de vermicomposta y producción de biomasa en cultivo de maíz de temporal. *Biológico Agropecuario, Tuxpan*, 27-35.
- Greenforce. (2022). Capacidad de intercambio cationico. *Greenforce*, Obtenido de: <http://www.greenforceame.com/2017/index.php/service-2>.
- Grey, E. (2021). *Global Climate Change Impact on Crops Expected Within 10 Years, NASA Study Finds*. Washington, D.C.: National Aeronautic and Space Administration (NASA) .
- Grey, E. (2021). *Global Climate Change Impact on Crops Expected Within 10 Years, NASA Study Finds*. Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Gunarathne, V. S.-B. (2020). Potential of biochar and organic amendments for reclamation of coastal acidic-salt affected soil. *Biochar*, 107-120.
- Gupta, B. &. (2014). Mechanism of salinity tolerance in plants: Physiological, biochemical and molecular characterization. *International Journal of Genomics*, 1-18.
- Gutierrez, P. (29 de Mayo de 2018). Los 5 tipos de maíz mas conocidos de México. *Food & Wine*, pág. Actualidad.
- Hafez, M. P. (2021). *The response of saline-sodic soils to reclamation using biological and organic amendments under arid region of Egypt*. Saint Petersburg: EDP Sciences.
- Hagbrink, I. (2017). *El agua en la agricultura*. Washington, DC: World Bank Group Water Global.
- Halopka, R. (2018). Corn-maturity calculations detailed University of Wisconsin-Extension
- Hassani, A. A. (2020). Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. *National Academy of Sciences*, 33017-33027.
- Hazelton, P. &. (2007). *What Do. All the Numbers Mean? - A Guide to the Interpretation of Soil Test Results. 2nd edition* . Victoria, Australia: CSIRO Publishing.
- Henández-Hernández, M. P.-G.-C. (2020). Carbón vegetal como mejorador de un Acrisol cultivado con caña de azúcar (*Saccharum* spp.) - Charcoal as improvement of an Acrisol cultivated with sugarcane (*Saccharum* spp.). *ResearchGate*, 35-41.
- Hong, S., Gan, P., & Chen, A. (2019). Environmental controls on soil pH in planted forest and its response to nitrogen deposition. *Environmental research*, 172, 159-165.
- Hoornweg, D. B.-T. (2013). Waste production must peak this century. *Nature*, 615-617.

- Horneck, D. E. (2007). *Managing salt-affected soils for crop production*. Corvallis, OR: Oregon State University Extension Service.
- Huang, M. Z. (2019). Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil. *Scientia Horticulturae*, 405-413.
- Hunt, J. D. (2010). The basic of biochar: a natural soil amendment. *Soil and Crop Management*, 1-6.
- Ibañez, J. (2007). *Suelos salinos*. Madrid: Madrid Blogs.
- Intagri. (2017). La Conductividad Eléctrica del Suelo en el Desarrollo de los Cultivos. *Artículos técnicos de Intagri*, (26), 1-5.
- IPCC. (2022). *Climate change: a threat to human wellbeing and health of the planet. Taking action now can secure our future*. Berlín: The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Jackson, M. L. (1974). *Soil Chemical Analysis*. Madison: Jackson, M.L.
- Jamil, A. R. (2011). Gene expression profiling of plants under sal stress. *Critical Review of Plant Sciences*, 435-458.
- Jeyabal, A. &. (2001). Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice–legume cropping system and soil fertility. *European Journal of Agronomy*, 153-170.
- Kaur, T. (2020). Vermicomposting: An Effective Option for Recycling Organic Wastes. En S. K. Das, *Organic Agriculture*. London: IntechOpen.
- Kim, H. (1996). *Soil sampling, Preparation and Analysis*. New York : Markal Dekker Inc.
- Klute, A. C. (1986). *Methods of Soil Analysis: Part 1. Physical and Minerological Methods, Second Edition*. . Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America.
- Kumari, R. B. (2022). Potential of organic amendments (AM fungi, PGPR, vermicompost and seaweed) in combating salt stress - A review. *Plant Stress*, (6), 1-13.
- Laich, F. (2011). *El papel de los microorganismos en el proceso de compostage*. Santa Cruz de Tenerife: Instituto Canario de Investigaciones Agrarias.
- Laird, D. B. (2009). Review of the platform pyrolysis for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuel, Bioproducts & Biorefining*, 547-562.
- Lakhdar, A. R. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affect soil. *Journal of Hazardous Materials*, 29-37.
- Lakhdar, A. R.-.. (2009). Effectiveness of compost use in salt-affected soils. *Journal of Hazardous Materials*, 29-37.

- Larney, F. J. (2011). Residual effects of one-time manure, crop residue and fertilizer amendments on desurfaced soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1029-1043.
- Larney, F. J. (2012). The role of organic amendments in soil reclamation. *Canadian Journal of Soil Science*, (92), 19-38.
- Larson, E. (13 de March de 2013). *10 keys to high corn yields*. Obtenido de FarmProgress: <https://www.farmprogress.com/corn/10-keys-high-corn-yields>
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and Environment*, 381-387.
- Li, S. L. (2022). Cow Manure Compost Promotes Maize Growth and Sustainability. *Sustainability*, (14), 2-11.
- Liu, L. S. (2014). effects of biochar on nitrous oxide emission and its potential mechanisms. *Journal of Air & Waste Management Association*, 894-902.
- Liu, M. W. (2020). Saline-alkali soil applied with vermicompost and humic acid fertilizer improved. *Applied Soil Ecology*, (156), 103705.
- Mao, X. Y. (2022). Remediation of organic amendments on soil salinization: Focusing on the relationship between soil salts and microbial communities. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, (239), 2-11.
- Martínez, M. P. (26 de Enero de 2020). México, lejos de ser autosuficiente en maíz. *el Economista*, pág. Empresas.
- Mata-Fernández, I. R.-G.-B.-C. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *El Hombre y su Ambiente*, 34-43.
- McBratney, A. D. (2014). The dimensions of soil security. *Geoderma*, 203-213.
- McHenry, M. (2011). Soil organic carbon, biochar and applicable research results for increasing farm productivity under Australian agricultural conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1187-1199.
- Meng, X., Zhou, J., & Sui, N. (2018). Mechanisms of Salt Tolerance in Halophytes: Current Understanding and Recent Advances. *Open Life Sciences*. 18(13), 149-154
- México, G. d. (2018). *Con los colores del maíz, México se pinta solo*. CDMX: Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera.
- Mohamed, E. M. (2011). Assessment of soil salinity in the Eastern Nile Delta (Egypt) using Geoinformatic Techniques. *Moscow University Soil Science Bulletin*, 11-14.
- Montoya, S. A. (2020). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68.
- Morales-Basantes, E. (9 de enero de 2017). Manejo del cultivo de maíz. *El Productor*, pág. Artículos Técnicos.

- Mosquera, B. (17 de Abril de 2013). *Fonag.org*. Obtenido de http://www.fonag.org.ec/doc_pdf/abonos_organicos.pdf
- Mousa, A. (2017). Effect of using some soil conditioners on salt affected soil properties and its productivity at El-Tina Plain Area, North Sinaí, Egypt. *Egypt Journal of Soil Science*, 101-111.
- Muktamar, Z. A. (2018). Residual effect of vermicompost on sweet corn growth and selected chemical properties of soils from different organic farming practices. *International Journal of Agricultural Technology*, (14), 1471-1482.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 239-250.
- Murillo-Montoya, A., Mendoza-Mora, A. and Fadul-Vásquez, C. J. (2019). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*. 7 (1), 58-68
<https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
- Mutammimah, U., Minardi, S. and Suntoro. (2020). Organic amendments effect on the soil chemical properties of marginal land and soybean yield. *Journal of Degraded and Mining Lands Management* 7 (4), 2263-2268 <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2020.074.2263>.
- Nachson, U. (2018). Cropland soil salinization and associated hydrology: Trends, processes and examples. *Water*, 10(8), 1030.
- Nations, U. (2015). *World population projected to reach 9.7 billion by 2050*. New York: United Nations.
- Nelson, D. &. (1996). Total carbon, organic carbon and organic matter. En J. Bigham, *Methods of Soil Analysis* (págs. 961-1010). Madison: Soil Science Society of America.
- New South Wales, D. o. (2005). *Annual Report*. New South Wales: Department of Primary Industries. Obtenido de How salinity is measured.
- O'Leary, M. (2016). *Maize: From Mexico to the world*. El Batán, México: CIMMYT.
- Ortigoza-Guerrero, J. L.-T.. (2019). *Guía Técnica del cultivo del Maíz*. San Lorenzo, Paraguay: JICA.
- Otlewska, A. M.-S.-Ś. (2020). When Salt Meddles Between Plant, Soil, and Microorganisms. *Frontiers in Plant Science*, 1-23.
- Page, A. M. (1982). *Methods of Soil Analysis, Part 2*. Madison: Soil Science Society of Agronomy.
- Peralta-Vásquez, C. (9 de 7 de 2019). En riesgo, cultivo de maíz en México. *Universo*, págs. 1-6.
- Perihar, P. S. (2014). Effects of salinity stress on on plants and its tolerance strategies: a review. *Environment Science Pollution Research*, 4055-4075.

- Perri, S. S. (2020). River basin salinization as a form of aridity. *Procedure National Academy of Sciences* , 17635-17642.
- Phillip, M. (2020). *Corn in México and the US*. Washington, DC: Wilson Center.
- Pioneer. (2015). *Maíz crecimiento y desarrollo*. Johnston, IA: DuPont.
- Poshanov, M. L. (2022). The Effects of the Degree of Soil Salinity and the Bio preparation on Productivity of Maize in the Shoulder Irrigated Massif . *Online Journal of Biological Sciences*, 22(1), 58-67, DOI: 10.3844/ojbsci.2022.58.67 .
- Proain. (08 de Marzo de 2021). *Principales plagas en el cultivo de maíz en México*. Obtenido de Proain: Tecnología Agropecuaria: <https://proain.com/blogs/notas-tecnicas/principales-plagas-en-el-cultivo-de-maiz-en-mexico>
- Qadir, G. C. (2007). Relationship of heat units accumulation. *Journal of Agricultural Sciences*, 44(1), 24-29.
- Qadir, M. S. (2006). Sodicty-induced land degradation and its sustainable management: problems and perspectives. *Land Degradation Development*, 661-676.
- Queensland, T. S. (2016). *Impacts of salinity*. Queensland: Queensland Government.
- Ramamoorthy, P. K. (2021). Management of saline and sodic soils. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 24-27.
- Rebolledo, S. (m de 2017). *Redagricola*.
- Rebolledo, S. (23 de Marzo de 2017). *Redagrícola*. Obtenido de <https://www.redagricola.com/cl/conductividad-electrica-salinidad/>
- Renard, D. I. (2012). Ecological engineers ahead of their time: The functioning of pre-Columbian raised-field agriculture and its potential contributions to sustainability today. *Ecological Engineers* , 30-44.
- Reuters. (21 de Febrero de 2020). Cultivo de maíz en México, en riesgo por el cambio climático. *Forbes*, págs. 1-5.
- Rezaei, N. &. (2018). *Effect of different levels of water salinity and biochar on wheat yield under greenhouse conditions*. Leuven, Belgium: International society for horticultural Science.
- Rich, C. (1965). Elemental Analysis by Flame Photometry. En C. Black, *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and microbial properties of* (págs. 849-864). Madison: American Society of Agronomy.
- Rodríguez-Navarro, A. &. (2005). High affinity potassium and sodium transport systems in plants. *Journal of Experimental botany*, 1149-1160.
- Rui-dong, H. (2018). Research progress in plant tolerance to soil salinity and alkalinity in sorghum. *Journal of Integrative Agriculture*, 739-746.

- Ruíz-Lau, N. O.-L.-M.-M. (2020). Mitigation of Salinity Stress by Using the Vermicompost and Vermiwash. En K. K. Bauddh, *Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture* (págs. 3-15). Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- SADER. (2016). *Tipos de cultivo, estacionalidad y ciclos*. CDMX: Secretaría de Agricultura y Desarrollo rural.
- SADER. (2020). *Maíz el cultivo de México*. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SADER. (2020). *Reporte del mercado de maíz*. CDMX: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Sánchez, M. (2020). *¿Que son las halítas?* *JardineríaOn*, Publicidad.
- Sánchez-Aquino, V. (2022). Soluciones al problema de salinidad en suelos agrícolas. *Uroganadería.eu*, Reportajes y Entrevistas.
- Sangoquiza-Caiza, C. V.-T.-G.-M. (2021). Efecto del estrés salino sobre el crecimiento de plántulas de. *Centro Agrícola, Universidad Central "Marta Abreu"* , 14-23.
- Schofield, R. V. (2003). Application of salinization indicators and initial development of potential global soil salinization scenario under climatic change. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1-18.
- Sharma, K. & Garg, V.K. (2019). Chapter 10 - Vermicomposting of Waste: A Zero-Waste Approach for Waste Management, Editor(s): Mohammad J. Taherzadeh, Kim Bolton, Jonathan Wong, Ashok Pandey, Sustainable Resource Recovery and Zero Waste Approaches, Elsevier, Pages 133-164, <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64200-4.00010-4>.
- Sciences, I. U. (2014). *Soil embrace life and the universe*. Jeju, Korea: 20th World Congress of Soil Science.
- Segura-Gutierrez, J. (2018). *Halófitas como alternativas en la fitorremediación, producción agrícola y otros usos*. Jaén, España: Universidad de Jaén.
- Sela, G. (2009). *La fertilidad del suelo y su manejo adecuado*. Hod Hasharon, Israel: Cropaia.
- Sela, G. u. (2020). El efecto de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas. *Smart Fertilizer*.
- SEMARNAT. (2009). *El medio ambiente en México*. CDMX: Gobierno Federal.
- Shahbaz, M. &. (2013). Improving salinity tolerance in cereals. *Critical Review in Plant Sciences*, 237-249.
- Shrivastava, P. &. (2014). Soil salinity: A seroius environmental issue and plant growth prooting bacteria as one of its tool for alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences, King Saud University*, 22(29, 123-131.

- Shrivastava, P. &. (2015). Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of its tool for alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 123-131.
- Shuning Z., S. L. (2020). Cow manure application effectively regulates the soil bacterial community in tea plantation. *BMC Microbiol*, 20, 190.
- Sienra, R. (12 de February de 2021). Esta revolucionaria instalación funeraria puede convertir restos humanos en compost. *My Modern Met en Español*.
- Sifuentes-Ibarra, E. (2018). *Los requerimientos hídricos del maíz*. Los Mochis, Sinaloa: INIFAP.
- Singh, K. (2016). Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils . *Land Degradation Development*, 706-718.
- Singh, R.P.; Singh, P.; Ibrahim, M.H. and Hashim, R. (2011). Land application of sewage sludge: Physicochemical and microbial response. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 214, 41-61 https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0668-6_3
- Singh, R. K. (2010). Varietal improvement for abiotic stress tolerance in crop plantas: special reference to salinity in rice. En A. S. Parrek, *Abiotic Stress Adaptation in Plants: Physiological, Molecular and Genomic Foundation* (págs. 387-415). New York: Springer.
- Smith, P. D. (2012). Towards an integrated global framework to assess the impacts of land use and management change on soil carbon: Current capability and future vision. *Global Change Biologia*, 2089–2101.
- Smith, T. S. (2007). *Ecología*. Madrid: Pearson-Addison Wesley.
- Song, Z., Gao, H., Zhu, P., Peng, C., Deng, A., Zheng, C., Mannaf, A.Md., Islam, N. Md. and Zhang, W. (2015). Organic amendments increase corn yield by enhancing soil resilience to climate change. *The Crop Journal* 3 (2), 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.01> climate change. *The Crop Journal* 3 (2), 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2015.01>
- Song, Z., Gao, H., Zhu, P., Peng, C., Deng, A., Zheng, C., Mannaf, A.Md., Islam, N. Md. and Srinivasarao, C. (2011). Nutrient Management Strategies in Rainfed Agriculture: Constraints and Opportunities. *Indian Journal of Fertilizers*, 12-25.
- Srinivasarao, C. (2011). Nutrient Management Strategies in Rainfed Agriculture: Constraints and Opportunities. *Indian Journal of Fertilizers*, 12-25.
- Staff, U. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington DC: USDA Handbook # 60.
- Steppuhn, H. V.-G. (2005). Root-zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. *Crop Science*, (45), 209–220, doi:10.2135/cropsci2005.0209.
- Stiver, L. (2017). Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos. *Pensylvania State Extension*.

- Sun, J. H. (2016). Effects of biochar application on Suaeda sals growth and saline soil properties. *Environement Earth Science*, 2411-2502.
- Sun, R. X. (2015). Bacterial diversity in soils subjected to long-term chemical fertilization can be more stably maintained with the addition of livestock manure than wheat straw. *Soil Biology & Biochemistry*, 88: 9–18.
- Tejada, M. &. (2006). Crushed cotton gin compost on soil biological properties and rice yield. *European Journal of Agronomy*, 22-29.
- Terrazas-Rueda, J. (2019). Aprovechamiento del suelo salino: agricultura salina y recuperación de suelos. *Apthapi*, 5(1), 1539-1563.
- Tilley, N. (14 de June de 2021). *Cow Dung Fertilizer: Learn The Benefits Of Cow Manure Compost*. Obtenido de <https://www.gardeningknowhow.com/>: <https://www.gardeningknowhow.com/composting/manures/cow-manure-compost.htm>
- Tortosa, G. (26 de Enero de 2015). *¿Que es el biochar?* Obtenido de Compostando Ciencia: <http://www.compostandociencia.com/2015/01/que-es-el-biochar/>
- Traunfeld, J. (2022). *Organic Matter and Soil Amendments*. Maryland, USA, <https://extension.umd.edu/resource/organic-matter-and-soil-amendments>: University of Maryland, Extension.
- Trejo-Escareño, H. I.-S.-M.-V. (2013). Impacto del estiércol bovino en el suelo y producción. *Remexca*, 4(5), 727-738.
- Vargas-Rojas, R. A. (2016). Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. *Environmental Earth Science*, 170-180.
- Vasconcelos, A. C. (2017). Cramber growth in a soil amended with biochar and under saline irrigation. *communications in soil Science and Plant analysis*, 1291-1300.
- Venkateswarlu, B. &. (2009). Climate change and agriculture: adaptación and mitigación strategies. *Indian Journal of Agronomy*, 226-230.
- Viana, M. J. (2021). *Benefits of vermicompost in agriculture and how it works*. Miami, Florida: Chloride Free Foundation.
- Wang, Z. X. (2010). Microbial community characteristics in a degraded wetland of the Yellow River Delta. *Pedosphere*, 466-478.
- Warnock, D. L. (2007). Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and Mechanisms. *Plant Soil*, 9-20.
- Waskom, R. B. (2012). *Diagnosing saline and sodic soil problems*. Fort Collins: Colorado State University .
- Wichem, F. R.-I. (2020). Organic Amendments Alleviate Salinity Effects on Soil Microorganisms and Mineralisation Processes in Aerobic and Anaerobic Paddy Rice Soils. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4 (30)), 1-14 <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.0003>.

- Wicke, B. S. (2011). The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. *Energy Environmental Science*, 2669-2681.
- Wiede, J. (2005). *Saline soils: a landscaping challenge*. Switzerland: Wiede Landscape Design.
- Willemijn, J. C. (2020). Compost and soil ecosystem resilience in. En A. F. Van der Wurff, *Handbook for Composting and Compost Use in Organic Agriculture* (págs. 13-27). Wageningen: Biogreenhouse.
- Wong, V. D. (2008). Salinity and sodicity effects on respiration and microbial biomass of. *Biological Fertility of Soils*, 943-953.
- Woolf, D. A.-P. (2010). sustainable biochar to mitigate climate change. *Nature Communication*, 1-9.
- Wu, Y., Yufei, L., Zhang, Y., Bi, Y. & Sun, Z. (2018). Responses of Saline Soil Properties and Cotton Growth to Different Organic Amendments. *Pedosphere*. 28(3), 521-529.
- Yadav, A. A. (2016). Vacuum Pyrolysed biochar for soil amendment . *Resource Technology*, 177-185.
- Yadav, S. I. (2011). Causes of salinity and plant manifestations to salt stress: A review. *Journal of Environment Biology*, (32), 667-685.
- Yupeng, W. (2018). Responses of saline soil properties and cotton growth to different organic amendments. *Pedosphere*, 521-529.
- Yuvaraj, M. C.-B. (2021). Soil Salinity and Its Management. En R. S. Meena, *Soil Moisture Importance*. London: IntechOpen.
- Zaman, M. &. (2018). *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. Switzerland: Springer International Publishing.
- Zaman, M. &. (2018). *Guiline for Salinity Assessment, mitigation and adaptation using Nuclear and Related Techniques*. New York: Springer.
- Zavala-López, M. (2018). *Teocintle: la herencia del maíz*. Monterrey, México: Instituto Tecnológico de Monterrey.
- Zelaya-Molina y Xóchitl, L. (2022). Control biológico de plagas en la agricultura mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*.13(27), 69-79.
- Zhang, T., Wang, T., Liu, K., Wang, L., Wang, K. and Zhou, Y. (2015). Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *Agricultural Water Management* 159, 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.002>
- Zúñiga-Escobar, O. O. (2011). Evaluación de Tecnologías para la Recuperación de Suelos. *Revista de la Facultad Nacional de Agricultura*, (64)1, 5769-5779.

Zwieten, V. K. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 235-246.

ANEXOS

Anexo A. Preparación del terreno



Anexo B. Siembra del cultivar



Anexo C. Aplicación de enmiendas



Anexo D Enmienda tipo biochar o biocarbón



Anexo E. Etapa de crecimiento y desarrollo del maíz



Anexo F. Etapa de floración del maíz



Anexo G. Etapa de madurez (150 días) del cultivo de maíz



Anexo H. Muestras de mazorcas de las parcelas experimentales



Anexo I. Vermicomposta



Anexo J. composta de ganado vacuno



Anexo K. Muestras del suelo para analisis en el laboratorio



Anexo L. Muestras de granos cultivados del maíz

