

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE



COMPOSTA ORGÁNICA Y TENSIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO EN EL
CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE UN CULTIVO DE MAÍZ

POR:

LUIS MARIO HEREDIA DOMÍNGUEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO

MAYO 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

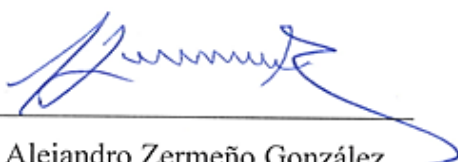
COMPOSTA ORGÁNICA Y TENSIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO EN EL
CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE UN CULTIVO DE MAÍZ

POR:

LUIS MARIO HEREDIA DOMÍNGUEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN
APROBADA POR H. JURADO EXAMINADOR


Dr. Alejandro Zermeno González
Asesor Principal


Dr. José Alexander Gil Marín
Coasesor


M.C. Pascual Ervidan Pérez Díaz
Coasesor


Dr. Luis Samaniego Moreno
Coasesor




M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Mayo 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

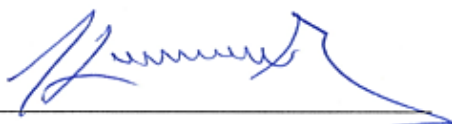
COMPOSTA ORGÁNICA Y TENSIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO EN EL
CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE UN CULTIVO DE MAÍZ

POR:

LUIS MARIO HEREDIA DOMÍNGUEZ

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN
APROBADA POR EL COMITÉ ASESOR



Dr. Alejandro Zermeno González
Asesor Principal



Dr. José Alexander Gil Marín
Coasesor



M.C. Pascual Ervidan Pérez Díaz
Coasesor



Dr. Luis Samaniego Moreno
Coasesor

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Mayo 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO



DECLARATORIA DE NO PLAGIO

Yo, Luis Mario Heredia Domínguez, estudiante de la carrera de Ingeniero Agrónomo en Irrigación en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, manifiesto de manera libre, consciente y voluntaria que la presente tesis titulada *Composta orgánica y tensión de humedad del suelo en el crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz* ha sido elaborada íntegramente por mí, y representa el resultado de mi trabajo académico, investigativo y personal.

Declaro que esta obra es completamente original, que no ha sido plagiada, copiada ni reproducida total ni parcialmente de ningún otro trabajo académico, publicación impresa o digital, ni de cualquier otro medio de divulgación del conocimiento sin que se haya dado el debido crédito a los autores y fuentes consultadas.

En este sentido, asumo plenamente la responsabilidad sobre la veracidad, originalidad y autoría del contenido de este trabajo de tesis. Firmo la presente declaración con el compromiso de mantener una conducta ética en todo el proceso académico y profesional al que me conduzca este trabajo.

Luis Mario Heredia
Luis Mario Heredia Domínguez

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por permitirme llegar hasta este instante, por brindarme de salud y sabiduría a mí persona y a mi familia, por siempre rodearme de excelentes personas y nunca dejarme solo en mi sendero, gracias por concederme las herramientas para realizar este trabajo.

Con todo el amor y admiración del mundo a mi **Madre Armida Idalia Domínguez Valenciana**, estaré eternamente agradecido por todo el cariño y apoyo que me ha brindado sin pedirme alguna explicación, por ser ese enorme pilar en mi vida, que antes las fuertes adversidades nunca doblego y siempre hizo lo mejor para mí. Este trabajo es tuyo mami **TE AMO**.

A mi Querido **Padre Antonio Nicolás Heredia García (†)** siempre estaré agradecido por llenarme de valores y compromiso por conseguir lo que deseara, por forjarme desde pequeño y enseñarme a siempre subsistir, finalmente somos colegas, te llevaré toda la eternidad en mi mente y corazón, un orgullo portar tu apellido. **Te amo papi**

Mi **Hermanita hermosa Judith Anai Heredia Domínguez (†)** fuiste la principal persona que siempre confió en mí, todo mi agradecimiento y respeto por lo que lograste en tu vida, muchas gracias por estar a mi lado cuando más lo necesite, por nunca abandonarme y sobre todo por ser mi confidente, te mando infinitos besos y abrazos hasta el cielo. **Te amo yulito**

Mi más sincero y profundo agradecimiento a mi alma mater, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, por brindarme la oportunidad de formar parte de esta prestigiosa institución. Así como al **Departamento de Riego y Drenaje**, por brindarme un espacio de aprendizaje, crecimiento y desarrollo académico y profesional.

A mi asesor principal, el **Dr. Alejandro Zermeño González**, le agradezco profundamente por su invaluable apoyo, orientación y confianza a lo largo de todo este proceso de investigación, por la paciencia que tuvo para guiarme en los momentos de incertidumbre y la manera en que me impulsó a superar obstáculos, siempre con un enfoque crítico y constructivo.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al **Dr. José Alexander Gil Marín**, quien fue un pilar fundamental en la realización de esta tesis. Agradezco profundamente la dedicación, paciencia y compromiso que demostró al igual la orientación precisa y acertada, siempre fomentando el pensamiento crítico y estimulando mi crecimiento académico.

Al **Dr. Luis Samaniego Moreno** por su gran amistad y los valiosos consejos que me brindó a lo largo de mi carrera y su gran impacto dentro de este trabajo de investigación. No solo en el ámbito académico, sino también en los momentos personales en los que su orientación y palabras de aliento fueron un gran sostén.

Mi agradecimiento al **Ing. German Kamara y a la empresa INTRAKAM**, por su valioso apoyo en la realización de este trabajo, apoyando en la colaboración de material influyente para la investigación realizada, como también por sus grandes consejos y asesoría.

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a los **M.C. Ervidan Pérez Díaz y M.C. Armando Moreno Ibarra**, quienes, en el poco tiempo de haberlos conocido, se convirtieron en grandes amigos y maestros fundamentales en el desarrollo de mi tesis.

A mi gran mentor, el **Dr. Fernando Augusto Villarreal Reyna**, le debo un agradecimiento infinito por su orientación y apoyo a lo largo de mi formación académica. Su influencia ha sido determinante en mi crecimiento tanto personal como profesional, y es un honor haber tenido la oportunidad de aprender de su vasta experiencia.

Mi más sincero agradecimiento al **Dr. Sergio Garza-Vara**, por su valiosa asesoría, sus consejos sabios y su amistad, los cuales han sido una fuente constante de apoyo durante mi trayectoria académica y personal.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al **Dr. Alberto Flores Olivas**, Rector de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por considerarme y brindarme la oportunidad de ser parte de equipo de campaña, aumentando significativamente mi confianza y autoestima.

A la **Dra. Manuela Bolívar Duarte**, le agradezco de todo corazón por haber sido un gran pilar en toda mi carrera académica. Su apoyo, orientación y sabiduría han sido fundamentales no solo en la realización de esta tesis, sino en mi formación desde los primeros días de mi trayectoria universitaria.

Al **Dr. Javier de Jesús Cortés Bracho** por su invaluable apoyo y orientación durante mi trayectoria académica. Gracias por siempre brindarme su conocimiento y experiencia con generosidad y profesionalismo.

Mi más sincero agradecimiento al **Ing. Carlos Rojas Peña**, no solo por su invaluable apoyo técnico y profesional sino también por ser un gran amigo de mi padre, y por el impacto que tuvo en mi formación personal.

Al **M.C. Tomás Reyna Cepeda** por sus valiosos consejos y apoyo a lo largo de todo este proceso. Siempre dispuesto a compartir su conocimiento y experiencia.

Al **M.C. Aarón Isain Melendres Álvarez**, quien ha sido un gran asesor y guía durante toda mi estancia en la universidad, por el apoyo incondicional, tanto académico como personal, ha sido fundamental para el desarrollo de mi formación profesional.

Al **M.C. Luis Edmundo Ramírez Ramos** por sus consejos que me ayudaron a enriquecer mi visión, por su constante disposición para brindarme su tiempo y conocimiento.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al **M.C. Gregorio Briones Sánchez** por sus grandes enseñanzas, no solo en el ámbito estudiantil, sino también en la vida.

Agradezco especialmente las historias que compartió conmigo, relatos llenos de experiencias vividas junto a mi padre y mi abuelo. Esas historias, cargadas de enseñanzas y recuerdos, me ayudaron a comprender mejor los valores que guían mi camino y la importancia de la perseverancia, el compromiso y la ética en todo lo que hacemos.

Al **Ing. José Enrique Mandujano Álvarez**, mi tutor de carrera, por su apoyo y orientación constante a lo largo de mi formación académica, donde todo fue fundamental para mi desarrollo como estudiante y profesional.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la **Sra. Vicky**, trabajadora del Departamento, por su amabilidad y apoyo constante durante todo mi tiempo en la universidad. Al igual a **Bri, a Melquiades y a Christian** por todo su apoyo y consejos durante mi estadía dentro de la universidad.

A las secretarias **Claudia y Mary**, por su amabilidad, apoyo y por todas las pláticas y consejos que me ofrecieron a lo largo de mi tiempo en la universidad.

MI más sincero agradecimiento a las laboratoristas **Finita, Paola y Silvia**, por su valioso apoyo, paciencia y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Por su experiencia, acompañamiento y amabilidad.

Mi más sincero agradecimiento al **Ing. Raúl Gándara Huitrón**, por su valioso apoyo y orientación durante mi período de prácticas académicas en la universidad. Sus consejos, siempre acertados y generosos, fueron una guía fundamental en mi proceso de aprendizaje y desarrollo profesional.

Al **Dr. Perpetuo Álvarez Vázquez**, por su amabilidad y generosidad al facilitarme las instalaciones necesarias para llevar a cabo el proceso de desarrollo de mi tesis.

Al **Ing. Alberto Rodríguez Hernández**, por haber sido un pilar fundamental en mi primer semestre y por brindarme el sentido de pertenencia a esta universidad, fue crucial para que pudiera superar los desafíos iniciales de la carrera.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mentora de inglés y asesora de servicio social, **Dra. Erika Patricia Carrizales Ruiz**, por su invaluable apoyo, dedicación y compromiso a lo largo de todo este proceso.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al **Ing. Juan Carlos Ibarra Flores**, por brindarme la invaluable oportunidad de realizar mis prácticas profesionales dentro del Área Natural Protegida Cuatrociénegas. Al igual que al **Ing. Cristino Villarreal Wislar**, por sus valiosos consejos y las experiencias compartidas a lo largo de este proceso por todas sus enseñanzas que me han permitido no solo enriquecer mis conocimientos técnicos, sino también entender la importancia de la práctica y la perseverancia en el desarrollo profesional.

Quiero dedicar un especial agradecimiento al **Ing. Fernando Gloria** y al **Ing. Francisco Zamorano**, por su amistad y por compartir todos sus conocimientos y enseñanzas. A lo largo de mi formación académica, ambos han sido una fuente constante de apoyo.

Así como también mi total agradecimiento al **Ing. Erwin Morales**, a la **Ing. Alejandrina Rueda**, al **Ing. Benjamín Ornelas** y a **Gloria Jordán**, por los valiosos consejos, enseñanzas y el apoyo constante que me brindaron durante mi estancia en las prácticas profesionales.

Mi más grande agradecimiento al **G.A.D.U.** y a mis **Q.: H.: Leopoldo Adame, Ricardo González, Enrique Ferriño, Luis Rodríguez, Diego Rodríguez, Luis Alberto, Estanislao Campos, Juan Manuel Ruiz, Gilmer Rodríguez, Carlos Rodríguez, Juan Antonio Castro, Noé Ruiz, Jorge Flores, Gabriel Villarreal y Antonio Palacios**, por su gran hermandad y afecto hacia mi persona y mi querida familia. TAF

No puedo dejar de expresar mi profundo agradecimiento a mis grandes amigos, a quienes considero mis hermanos: **Jaime Cobas, Marco Baltazar, Rodolfo Guajardo, Víctor Hugo Sandoval y Luis Lauro Lugo**. Por su amistad, apoyo incondicional y buenos consejos han sido esenciales para mantenerme enfocado y motivado.

Quiero dedicar un agradecimiento muy especial a mis mejores amigos de la carrera, **David Alvarado García y Luis Eduardo Gómez Díaz**. Además de ser un gran apoyo durante mi estancia universitaria, ambos han sido una parte esencial de mi vida personal.

A mi gran amigo **Víctor Contreras**, alias "Miguel", una de mis primeras y más valiosas amistades en la universidad. Desde el primer momento en que nos conocimos, su apoyo, camaradería y su actitud siempre positiva fueron una gran fuente de motivación para mí.

A mi gran amiga **Isabel Torres**, cuya amistad fue muy importante y especial durante todo este proceso. Gracias por tu apoyo constante, tus palabras de aliento y tu compañía.

Quiero dedicar unas palabras de agradecimiento a mi primera amiga de la universidad, **Esmeralda González**, y a su familia, por la bonita amistad que me han brindado durante estos años, me siento profundamente agradecido por cada momento compartido.

Mi más sincero y profundo agradecimiento a mis queridas amigas **Cristina Mondragón y Carmen Vargas**, no solo por su apoyo incondicional, sino también por su valiosa amistad. Gracias por ofrecerme siempre un espacio para compartir risas, preocupaciones y, sobre todo, por brindarme su tiempo y sabiduría.

Agradezco profundamente a mi amiga **Karen Luna**, por su constante apoyo, compañía y palabras de aliento a lo largo de este proceso. En mis momentos más desfavorables, su presencia y comprensión fueron un verdadero refugio que me ayudaron a seguir adelante

A mis mejores amigas de la infancia, **Mariam Valdez** y **Dulce Valdez**, quienes han sido mis compañeras incondicionales a lo largo de los años y mis grandes apoyos en los momentos más difíciles de mi vida. No hay palabras suficientes para expresar lo agradecido que estoy por su amistad.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a **Teresita Cabello** y **Jocelyn Ramírez**, por su incondicional amistad y los valiosos consejos que me brindaron a lo largo de este proceso.

A mi amiga y paisana **Jacqueline Bravo**, por su bonita amistad y por sus grandes consejos, especialmente en los momentos complicados que he atravesado durante estos años. Tu capacidad para escucharme y brindarme tu apoyo incondicional ha sido una de las cosas más valiosas que he tenido.

Mi más sincero agradecimiento a **Ana González**, por estar siempre para mí en cada momento, sin importar las circunstancias. Agradezco profundamente tu constante presencia, tus palabras de aliento y tu capacidad para estar a mi lado cuando más lo necesitaba.

Quiero dedicar un especial agradecimiento a mis compañeros de carrera **Armando Aparicio, Gerardo Arroyo, Gabriel Cantor, Oziel Devora, Jhonni Espinoza, Santiago Coria, Berenice Mejía, Carmen Morales, Edgar Dimas, Argenis Rangel, Juan Salazar, Fernando Ramírez, Jesús Rosales, Cristhian Valle y Eduardo Villa**, quienes han sido una parte fundamental de mi formación académica y personal.

Mi más enorme agradecimiento a mi **TEAM Muñecos: Ángel Gavilán, Daniel Espinoza, Octavio Mitchell, Robin Armendariz, Cain Tomás y José Luis**, por todas las aventuras que hemos vivido juntos y por su invaluable amistad. Cada uno de ustedes ha sido una parte fundamental en este camino, no solo como compañeros, sino como grandes amigos que han hecho de cada momento algo único e inolvidable.

Quiero dedicar unas palabras llenas de gratitud a mis grandes amigos **Juan Trinidad e Ismael Martínez**, quienes han sido una parte fundamental en el desarrollo de mi tesis, y en la consolidación de una amistad verdadera, tanto dentro como fuera de la universidad.

Muchas gracias a mis compañeros **Roxana García, Heriberto Calihua, Guadalupe Benítez, Felipe Cruz, Cristo Jesús, Arely Lugo, Alexsander Méndez, Ángela Ramírez, Nayeli Ramírez, Karen González Omar Pérez, Alejandro Garrido, Emmanuel Pozos, Miguel Moreno, Karina Aguilar, Oscar Rodríguez, Rolando Pérez, Joel Sebastián y Ángel Rodríguez** por su gran apoyo durante todo el proceso de realización de esta tesis.

Mi más sincero agradecimiento a mis compañeros de dormitorio **Alberto Frutos, Edgar Mendoza, Iván Meza y Cristino Villaseñor**, por su increíble amistad y apoyo durante todo este tiempo. Gracias por los buenos momentos, por siempre estar ahí cuando más lo necesitaba. Recordando siempre nuestra estadía en el **Módulo 6** que quedará en mi memoria por siempre. ¡Arriba Michoacán!

Quiero dedicar unas palabras de sincero agradecimiento a mi gran amigo **Juan Cortés**, su querida madre y toda su maravillosa familia, por darme la oportunidad de vivir en su casa al finalizar mi etapa universitaria. No solo me ofrecieron un hogar, sino que me hicieron sentir uno más de su familia desde el primer momento.

De igual manera, agradezco profundamente a mis renteros **Charles y Marco Antonio**, por darme la confianza y la oportunidad de brindarme un hogar al principio de esta aventura universitaria. Gracias por siempre hacerme sentir bienvenido y por ser parte importante en este proceso.

DEDICATORIAS

A mi madre, y en memoria eterna de mi padre y mi hermana, que ahora viven en el cielo.

Esta tesis representa mucho más que un logro académico; es el reflejo de un camino lleno de desafíos, ausencias que duelen, noches largas y silenciosas... pero también es el testimonio de una historia de amor, resistencia y esperanza.

A mi madre, **Armida Idalia Domínguez Valenciana**

A ti, mamá, gracias por ser el corazón valiente que nunca se rindió. Cuando la vida nos arrebató lo más sagrado, tú seguiste de pie, aun con el alma rota, abrazándome más fuerte y enseñándome que sí se puede seguir, aunque duela. Juntos lloramos, juntos caímos... pero también juntos nos levantamos, aprendimos a vivir con la ausencia y a convertir el dolor en fuerza.

Tu amor incondicional fue el faro que me guió en medio de la oscuridad. Tu entrega, tu sacrificio, tu ternura y tu ejemplo me dieron las herramientas para resistir, para creer en mí y para seguir luchando cuando todo parecía perdido. Gracias por enseñarme que el amor verdadero no se quiebra ante la adversidad, sino que se transforma en coraje.

A mi padre, **Antonio Nicolas Heredia García (†)**

A ti, papá, mi ejemplo silencioso, mi guía eterno. Aunque la vida no me permitió tenerte en este tramo del camino, siento tu presencia en cada paso. Tus enseñanzas siguen vivas, tu voz aún resuena cuando necesito firmeza, y tu amor me sigue arropando en los momentos en que más lo necesito. Te pienso, te extraño, te honro. Espero que donde estés, puedas ver esto que hoy he logrado, y sepas que tu legado vive en mí. Siempre serás mi orgullo y mi fuerza.

A mi hermana, **Judith Anai Heredia Domínguez (†)**

A ti, hermanita, mi compañera de vida, mi alegría eterna. No hay palabras que alcancen para describir lo que significas para mí. Crecimos de la mano, soñamos juntos, compartimos lo más bonito y también lo más duro. Tu ausencia ha sido un dolor profundo, pero también una inspiración constante. En cada página de este trabajo estás tú, con tu risa, tu cariño, tu presencia que nunca se fue. Gracias por lo que fuiste, por lo que sigues siendo en mi corazón. Esta meta es también tuya, porque fuiste parte de mi vida en los momentos más importantes... y lo sigues siendo cada día.

Gracias a los tres, por ser mi raíz, mi historia, mi amor más grande. Esta dedicatoria es un pequeño intento de rendir homenaje a todo lo que me han dado, y a lo que me sostendrá por siempre.

Con el alma agradecida y el corazón lleno de amor,

Luis Mario Heredia Domínguez (Mayito)

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARATORIA DE NO PLAGIO.....	¡Error! Marcador no definido.
AGRADECIMIENTOS	I
DEDICATORIAS	VIII
ÍNDICE DE CUADROS	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
HIPÓTESIS	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Composta	4
Proceso de Compostaje y Factores que lo Afectan.....	5
Aplicaciones de la Composta en Diferentes Tipos de Suelos.....	6
Beneficios Ambientales de la Composta	7
La Composta en la Agricultura Sostenible	7
Sistema de Riego por Goteo	8
Aspectos Técnicos del Riego por Goteo.....	9
Impacto Económico y Productividad Agrícola.....	10
Desafíos y Consideraciones en la Implementación	11
Avances Tecnológicos y Futuro del Riego por Goteo	11
Tensiómetros.....	12
Funcionamiento y Principios de Operación.....	13

Optimización del Riego y Evitación de Daños a los Cultivos	13
Estudio de la Dinámica del Agua en el Suelo.....	14
Contribución a la Agricultura Sostenible.....	14
Watermark	15
Principio de Funcionamiento del Sensor Watermark	15
Optimización del Riego y Reducción del Desperdicio de Agua	16
Aplicaciones en la Investigación y la Ciencia del Suelo	16
Ventajas en la Agricultura Moderna.....	16
Sonda TDR (Time Domain Reflectometry).....	17
Estrés Hídrico	18
Causas	19
Síntomas.....	19
Estrategias para contrarrestar.....	20
Maíz	21
Características climáticas.....	22
Clasificación	23
MATERIALES Y MÉTODOS	26
Localización del sitio de estudio.....	26
Clima, agua y suelo del sitio experimental	26
Establecimiento y manejo agronómico del cultivo.....	29
Manejo nutricional del cultivo y control fitosanitario	29
Tratamientos evaluados	30
Mediciones realizadas.....	32
RESULTADOS	33
DISCUSIÓN	38
CONCLUSIONES	44

BIBLIOGRAFÍA	45
--------------------	----

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo del área de estudio.	27
Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del agua de riego utilizada en el estudio	28
Cuadro 3. Relación de fertilizantes aplicados a cada una de las camas del lote experimental (dosis semanal).....	30
Cuadro 4. Factores principales de estudio y tratamientos correspondientes.....	31
Cuadro 5. Relación de componentes de la composta orgánica y su composición porcentual.....	31
Cuadro 6. Tensión de la humedad del suelo (medida con tensiómetros) para reponer la humedad del suelo, contenido de humedad correspondiente y el tiempo de riego para reponer la humedad consumida por las plantas.....	32
Cuadro 7. Tensión de la humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en los parámetros de crecimiento de un cultivo de maíz (hibrido Lucero L-025)	34
Cuadro 8. Tensión de la humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en los parámetros de rendimiento de un cultivo de maíz (hibrido Lucero L-025)	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación del área de estudio	26
Figura 2. Efecto de la interacción entre la tensión de humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en: A el contenido relativo de clorofila (unidades SPAD), B la altura de planta, C diámetro del tallo (5 cm de altura), D peso seco de la planta.....	36
Figura 3. Efecto de la interacción entre la tensión de humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en el peso seco de la mazorca.	37

RESUMEN

El maíz es el cultivo básico más importante de México por lo que es importante desarrollar tecnologías para mejorar el crecimiento y rendimiento de este cultivo, por medio de una adecuada fertilización y uso eficiente del agua, principalmente en las regiones donde el agua es el recurso más limitante para la producción de este cultivo. Por lo que, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de una composta orgánica al suelo (Compomax) en tres concentraciones (0, 1, y 3 kg m⁻³ de suelo) y dos niveles de tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos (20 y 40 kPa). Para la evaluación estadística de los parámetros de crecimiento y rendimiento de las plantas se utilizó un diseño estadístico bloques al azar con arreglo en parcelas divididas, donde la parcela mayor fue la tensión de humedad del suelo, y la menor la concentración de aplicación de la composta orgánica, para un total de seis tratamientos que se repitieron cuatro veces. Para la comparación múltiple de media de tratamientos se aplicó la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). El estrés hídrico al regar a 40 kPa de tensión de humedad del suelo no afectó el contenido relativo de clorofila, la altura de planta, el peso seco de la planta ni el peso seco de la raíz, pero si redujo 6.27 % el diámetro del tallo y 20 % el peso seco de la planta. La incorporación de la composta orgánica al suelo en cualquiera de las tres concentraciones evaluadas no afectó la altura de planta, diámetro del tallo, peso seco de la planta, ni el peso seco de la raíz. La incorporación de composta a 3 kg m⁻³ de suelo aumentó 9.09 % el peso seco de planta. El estrés hídrico al regar a 40 kPa redujo el número de mazorcas por planta, peso de la mazorca, el peso de los granos por mazorca, grano por mazorca, y el rendimiento. La incorporación de la composta orgánica al suelo solo incremento el peso de granos por mazorca y el peso seco de 100 semillas. El mayor peso seco de las mazorcas se obtuvo al regar a 20 kPa de tensión de humedad del suelo y 1 kg m⁻³ de composta incorporada al suelo. Pero, al regar a la tensión de 40 kPa el peso seco de la mazorca es mayor en la concentración de la composta de 3 kg m⁻³.

Palabras clave: *Zea mays* L., composta orgánica, tensión de humedad del suelo, estrés hídrico, tensiómetro, sonda TDR.

ABSTRACT

Corn is one of Mexico's main crops, so it is fundamental to develop technologies to improve its growth and yield through proper fertilization and efficient water use, especially in regions where water is the most limiting resource for its production. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effect of applying an organic compost to the soil (Compomax) at three concentrations (0, 1, and 3 kg m⁻³ of soil) and two levels of soil moisture tension for irrigation application (20 and 40 kPa). For the statistical evaluation of plant growth and yield parameters, a randomized block design with a split-plot arrangement was used. The highest plot was the soil moisture tension, and the lowest was the concentration of organic compost application. There were six treatments, each replicated four times. For multiple comparisons of treatment means, the Tukey test was applied ($\alpha \leq 0.05$). When the plants were irrigated at 40 kPa soil moisture tension, water stress did not affect relative chlorophyll content, plant height, plant dry weight, or root dry weight, but it did reduce stem diameter by 6.27 % and plant dry weight by 20 %. Incorporating the organic compost into the soil at any of the three concentrations tested did not affect plant height, stem diameter, plant dry weight, or root dry weight. But, the organic compost at 3 kg m⁻³ of soil increased plant dry weight by 9.09 %. Water stress when irrigated at 40 kPa reduced the number of ears per plant, ear weight, kernel weight per ear, kernel per ear, and yield. Incorporating organic compost into the soil only increased kernel weight per ear and the 100-seed dry weight. The highest dry weight of the cobs was obtained when irrigated at 20 kPa soil moisture tension and 1 kg m⁻³ of organic compost incorporated into the soil. However, when irrigated at 40 kPa soil moisture tension, the dry weight of the cobs was greater at a compost concentration of 3 kg m⁻³.

Keywords: *Zea mays* L., organic compost, soil moisture tension, water stress, tensiometer, TDR probe.

INTRODUCCIÓN

Las compostas son fertilizantes orgánicos que se generan por la acción de microorganismos que descomponen y petrifican materia orgánica presente en el suelo. La elaboración de esta clase de fertilizantes es sencilla de implementar y de bajo costo (Díaz-Rodríguez 2018). El uso de abonos orgánicos en la agricultura se ha realizado por décadas mostrando su efecto favorable en la fertilidad de los suelos (Alvarenga *et al.*, 2015). Aunque su origen, edad y contenido de humedad afectan la composición química, los abonos orgánicos aportan nutrimentos y mejoran las propiedades físicas y químicas del suelo (Romero *et al.*, 2000; Epelde *et al.*, 2018).

Diversos estudios han mostrado que las compostas que se incorporan al suelo aumentan su fertilidad, la capacidad de retención de agua, la mineralización del nitrógeno, fósforo y potasio, y se incrementa la actividad microbiana (Ding *et al.*, 2021; Hussein *et al.*, 2022). El uso de las compostas tiene un impacto mayor en los suelos de las zonas áridas y semiáridas, ya que generalmente son de baja fertilidad, contenido de materia orgánica y capacidad de retención de humedad (Delgado-Arroyo *et al.*, 2020; Núñez *et al.*, 2023). Estudios previos han mostrado que la incorporación de compostas al suelo puede incrementar el rendimiento de cultivos hortícolas. (Aguilar Jiménez *et al.*, 2024; Javier-López *et al.*, 2022; González-Betancourt *et al.*, 2020).

El agua es el recurso más importante en la agricultura y el más limitante en las regiones agrícolas de las zonas áridas y semiáridas. Para el uso eficiente del agua es indispensable determinar los volúmenes de agua requeridos y el tiempo oportuno para la aplicación de los riegos. Para esto, es fundamental conocer la tensión de humedad del suelo para establecer el tiempo oportuno de riego y la profundidad del suelo por irrigar (Vatta *et al.*, 2018; Khan y Mohammadi., 2019) La aplicación de los riegos a valores altos de tensión de humedad del suelo (mayor estrés hídrico) puede tener un alto impacto en el crecimiento y rendimiento de las plantas. Una tensión de humedad del suelo igual o mayor de 50 kPa, tiene un fuerte impacto en la pérdida de materia seca y reducción significativa del rendimiento del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) (Lince *et al.*, 2024). El estudio de Bahadur, y Singh (2021) mostró que, un incremento del estrés hídrico de 40 kPa a 80 kPa de tensión de la humedad del suelo reduce hasta 33 % el rendimiento de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L. cv. Pusa

Rohini). Con el manejo controlado de la tensión de humedad del suelo se mejoró la eficiencia del uso del agua y se aumentó el peso seco de la biomasa de la raíz de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) (Núñez *et al.*, 2016).

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes en el mundo, ya que representa el 38.1 % de la producción total de granos (Imade y Babalola, 2021). Sin embargo, es un cultivo de origen tropical, que actualmente se cultiva en regiones templadas y subtropicales, con siembra en forma intensiva a nivel mundial y que puede cultivarse con éxito dos veces al año. Aproximadamente el 61% de la producción mundial de maíz se utiliza como alimento para animales, el 19% en la elaboración de etanol y otros productos industriales, el 15% como alimento humano directo, el 4% como pérdidas de almacenamiento y el 1% como semillas (García-Lara y Sena-Saldívar, 2019).

En México, el maíz es el cereal más importante, ya que es el alimento principal de la población, por su superficie sembrada y por generar 36% del valor de la producción agrícola. El uso principal es el consumo directo en sus diferentes formas en la alimentación humana, y por la alta demanda del sector pecuario (Molina, 2021). En el año 2023, la importación de maíz fue de 19.7 millones de toneladas (récord de importación), debido a la baja producción nacional y la alta demanda agroindustrial y pecuaria (Estrada Chavira *et al.*, 2024).

Bajo la hipótesis de que la aplicación de una composta orgánica al suelo mejora el crecimiento y rendimiento para diferentes niveles de tensión de humedad del suelo y que el crecimiento y rendimiento no decrece con el incremento de la tensión. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la aplicación de una composta orgánica al suelo y dos niveles de tensión de la humedad en el crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.)

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la incorporación de composta orgánica y la tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos en el crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar el efecto de diferentes tensiones de humedad del suelo para la aplicación de los riegos (20 y 40 kPa) en los parámetros de crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz. (*Zea mays* L.).

Evaluar la influencia de tres concentraciones de composta orgánica incorporada al suelo (0 kg m^{-3} , 1 kg m^{-3} y 3 kg m^{-3}) sobre los parámetros de crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz. (*Zea mays* L.).

Analizar la interacción entre la composta orgánica y la tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos en los parámetros de crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz. (*Zea mays* L.).

HIPÓTESIS

La combinación de la tensión de humedad del suelo para la aplicación de los riegos y la incorporación al suelo de una composta orgánica en tres concentraciones tienen efecto en los parámetros de crecimiento y rendimiento de un cultivo de maíz. (*Zea mays* L.).

REVISIÓN DE LITERATURA

Composta

La composta es un material orgánico altamente beneficioso que se obtiene a partir de la descomposición controlada de residuos vegetales, tales como restos de frutas y verduras, hojas secas, ramas, césped cortado, entre otros (Harris, 2003). Este proceso de transformación es facilitado por una amplia gama de microorganismos, incluyendo bacterias, hongos y otros organismos descomponedores, que desintegran los residuos orgánicos y los convierten en un material oscuro, esponjoso y rico en nutrientes, con una textura similar a la tierra (Epstein, 2011).

La composta actúa principalmente como un abono natural que mejora la calidad del suelo. Al descomponer los residuos orgánicos, se libera una variedad de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes que son cruciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (García, 2007). Además de enriquecer el suelo, la composta mejora su estructura, favoreciendo una mejor aireación, lo que permite un desarrollo radicular más saludable. También aumenta la capacidad del suelo para retener agua, lo que resulta en una mayor eficiencia en el uso de recursos hídricos, especialmente en áreas con climas secos o en suelos que tienden a ser arcillosos o arenosos.

Para producir composta de manera eficaz, es esencial contar con una mezcla balanceada de materiales ricos en carbono y nitrógeno. Los residuos ricos en carbono incluyen hojas secas, ramas pequeñas, paja o cartón, mientras que los residuos ricos en nitrógeno comprenden restos frescos de frutas, verduras y recortes de césped (Cooperband, 2002). Esta combinación favorece la actividad microbiana y acelera el proceso de descomposición, asegurando que la composta se convierta en un material rico en nutrientes de manera eficiente.

Los beneficios de la composta van más allá de la mejora de la fertilidad del suelo. Su uso ayuda a reducir la dependencia de fertilizantes químicos, disminuyendo el impacto ambiental asociado con su producción y uso (Lazcano, 2015). Además, al incorporar composta en los suelos, se favorece la biodiversidad microbiana, lo que contribuye a la salud a largo plazo

del ecosistema terrestre, promoviendo un ciclo natural de nutrientes y reduciendo la erosión del suelo.

La composta no solo es un recurso valioso para la agricultura y jardinería, sino también una herramienta esencial para promover prácticas agrícolas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. A través de su correcta implementación, se puede mejorar la calidad del suelo, aumentar la biodiversidad y disminuir el impacto ambiental, lo que la convierte en una práctica clave en la gestión de residuos y la conservación de los recursos naturales.

La composta, también conocida como humus o abono orgánico, es el producto de la descomposición controlada de materiales orgánicos. Este proceso es realizado por microorganismos, hongos, bacterias y otros descomponedores que transforman residuos orgánicos en un material oscuro y esponjoso, muy parecido a la tierra, rico en nutrientes esenciales que benefician a los suelos (Harris, 2003; Epstein, 2011). A continuación, se detallan más aspectos sobre el proceso de compostaje, sus beneficios y su impacto ambiental.

Proceso de Compostaje y Factores que lo Afectan

El proceso de compostaje es complejo y depende de varios factores, como la temperatura, la humedad, el oxígeno, la proporción de materiales ricos en carbono (como hojas secas) y los materiales ricos en nitrógeno (como restos de comida y césped cortado). Cuando estos factores se combinan adecuadamente, se crean las condiciones ideales para la actividad microbiana, que es la que descompone la materia orgánica.

Fase de Calor: Durante las primeras semanas del proceso de compostaje, se produce un aumento significativo de la temperatura, que puede alcanzar hasta 60°C debido a la actividad de los microorganismos descomponedores. Esta fase ayuda a destruir patógenos, semillas de maleza y otros microorganismos no deseados, lo que hace que la composta sea un producto más seguro para el suelo (Cooperband, 2002).

Fase de Enfriamiento: Después de la fase de calor, la temperatura disminuye y la descomposición se ralentiza. En esta etapa, la materia orgánica se descompone aún más lentamente, y es cuando se produce el humus, que es el material final que se incorpora al suelo. La duración de este proceso varía según las condiciones

ambientales y la mezcla de materiales, pero puede tomar entre 2 y 6 meses para completar (Epstein, 2011).

Oxigenación y Humedad: El compostaje requiere una constante aireación para asegurar que los microorganismos aeróbicos, aquellos que necesitan oxígeno para descomponer la materia, puedan trabajar eficientemente. Es importante voltear regularmente la pila de compost para permitir que el aire llegue a todas las partes y evitar la compactación del material. La humedad también juega un papel crucial: el compost debe mantenerse lo suficientemente húmedo, pero no empapado, para que los microorganismos puedan prosperar (Lazcano, 2015).

Aplicaciones de la Composta en Diferentes Tipos de Suelos

La composta es un abono versátil que puede mejorar significativamente una variedad de suelos. Dependiendo del tipo de suelo, los beneficios varían:

Suelos Arenosos: Los suelos arenosos tienen baja capacidad para retener agua y nutrientes. La incorporación de composta mejora la estructura de estos suelos, ayudando a retener mejor la humedad y proporcionando una fuente de nutrientes que es liberada de manera más eficiente para las plantas. Además, la composta mejora la agregación de partículas en suelos arenosos, lo que resulta en una mayor estabilidad estructural y menos erosión.

Suelos Arcillosos: En suelos arcillosos, la composta mejora la aireación, reduce la compactación y permite un mejor drenaje. Esto es especialmente importante porque los suelos arcillosos tienden a volverse compactos y mal aireados, lo que dificulta el crecimiento de las raíces y puede contribuir al desarrollo de enfermedades fúngicas debido a la falta de oxígeno.

Suelos Ácidos o Básicos: La composta también actúa como un corrector de la acidez o alcalinidad del suelo, ya que ayuda a equilibrar el pH. Su uso en suelos con pH muy ácido o alcalino puede ayudar a moderar las condiciones para que las plantas

puedan absorber mejor los nutrientes, favoreciendo un ambiente más estable para el crecimiento (García, 2007).

Beneficios Ambientales de la Composta

El uso de composta no solo tiene efectos directos sobre la fertilidad y estructura del suelo, sino que también tiene importantes beneficios para el medio ambiente:

Reducción de Residuos Orgánicos: Uno de los mayores beneficios ambientales de la composta es la reducción de residuos orgánicos en vertederos. Los residuos de alimentos, restos de jardinería y otros desechos orgánicos que de otro modo se desecharían pueden ser reciclados a través del compostaje, lo que ayuda a reducir la cantidad de basura que se envía a los vertederos. Esto también reduce las emisiones de metano, un gas de efecto invernadero que se genera en los vertederos cuando los residuos orgánicos se descomponen anaeróbicamente.

Reducción de la Necesidad de Fertilizantes Químicos: La incorporación de composta reduce la dependencia de fertilizantes sintéticos, que tienen un impacto negativo en los ecosistemas acuáticos debido al escurrimiento de nitrógeno y fósforo. Al utilizar composta, se disminuye la contaminación de cuerpos de agua y se mejora la calidad del agua al promover un ciclo natural de nutrientes en el suelo.

Fomento de la Biodiversidad Microbiana: La composta mejora la biodiversidad microbiana del suelo, creando un ambiente más saludable para organismos benéficos como lombrices, insectos, bacterias y hongos. Estos organismos son esenciales para la salud general del suelo y ayudan a mantener la integridad del ecosistema. La biodiversidad microbiana también mejora la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades, lo que reduce la necesidad de pesticidas y herbicidas químicos (Lazcano, 2015).

La Composta en la Agricultura Sostenible

En el contexto de la agricultura sostenible, la composta juega un papel clave en la reducción de la huella ecológica de las prácticas agrícolas. Su uso en sistemas agrícolas permite mantener la productividad sin agotar los recursos del suelo, lo que es fundamental para la agricultura regenerativa. Además, la composta promueve el ciclo cerrado de

nutrientes, en el cual los residuos orgánicos se reciclan en el sistema, lo que reduce la necesidad de insumos externos y minimiza la contaminación (Epstein, 2011).

Sistema de Riego por Goteo

El riego por goteo es un sistema de irrigación avanzado que consiste en suministrar agua de manera precisa y controlada directamente a las raíces de las plantas mediante una red de tubos y goteros (Keller, 2006). Este sistema se ha destacado por su alta eficiencia, especialmente en comparación con métodos tradicionales de riego, ya que minimiza significativamente las pérdidas de agua por evaporación y escurrimiento, permitiendo un uso más racional y eficaz del recurso hídrico (Burt, 2004).

Una de las ventajas clave del riego por goteo es su capacidad para reducir la erosión del suelo. Debido a que el agua se aplica de manera localizada y directa en la zona radicular, se evita la dispersión del agua sobre la superficie del terreno, lo que generalmente causa el arrastre de partículas del suelo y el deterioro de la estructura del mismo. Esta aplicación eficiente también ayuda a prevenir la contaminación de las aguas superficiales, ya que no se produce un exceso de agua que podría transportar fertilizantes y productos químicos hacia los cuerpos de agua cercanos (O'Brien, 2011).

El sistema de riego por goteo ofrece una gran flexibilidad al poder ser automatizado. Esto permite que el riego se programe para adaptarse a las necesidades específicas de cada cultivo, considerando factores como el tipo de planta, el clima y la fase de crecimiento. La automatización de este proceso no solo optimiza el consumo de agua, sino que también reduce la necesidad de mano de obra y asegura una distribución más uniforme del agua, lo que puede resultar en un incremento en la productividad y la salud de los cultivos (Haman, 2017).

El riego por goteo es una tecnología de irrigación que no solo contribuye al uso eficiente del agua, sino que también promueve la sostenibilidad agrícola al reducir el impacto ambiental asociado con el riego convencional. Su implementación adecuada puede tener efectos positivos significativos en la conservación del suelo, la calidad del agua y el rendimiento de los cultivos, convirtiéndolo en una opción clave para la agricultura moderna, especialmente en áreas donde el recurso hídrico es limitado.

El riego por goteo no solo se destaca por su eficiencia en la aplicación del agua, sino que también está relacionado con la optimización de otros recursos y la mejora de la sostenibilidad en la agricultura. Con la creciente preocupación por el cambio climático, la escasez de agua y la necesidad de prácticas agrícolas más responsables, el riego por goteo se ha posicionado como una solución integral en el manejo de cultivos.

Aspectos Técnicos del Riego por Goteo

Componentes del Sistema: El sistema de riego por goteo está compuesto por varios componentes interconectados que trabajan en conjunto para garantizar una distribución eficiente del agua:

- **Tuberías principales:** Son las que transportan el agua desde la fuente hasta los puntos de aplicación.
- **Tubos laterales:** Conectan la tubería principal con los goteros, y están diseñados para distribuir el agua a lo largo de las filas de cultivo.
- **Goteros:** Son pequeños dispositivos que controlan la cantidad de agua que se libera de manera precisa a cada planta. Existen diferentes tipos de goteros, como los autocompensantes, que mantienen un flujo constante independientemente de las variaciones en la presión.
- **Filtros:** Evitan que los residuos del agua bloqueen los goteros y otros componentes del sistema.
- **Válvulas y controladores automáticos:** Permiten programar y ajustar el sistema de riego, lo que facilita la gestión del agua según las condiciones climáticas y las necesidades de las plantas.

Tipos de Riego por Goteo: Existen distintos tipos de riego por goteo que pueden adaptarse a diversas condiciones de cultivo y terreno:

- **Riego subterráneo:** Los tubos de goteo se colocan bajo tierra, lo que reduce la evaporación y la dispersión del agua. Es ideal para cultivos perennes como viñedos y olivos.

- **Riego superficial:** Los tubos se colocan en la superficie, lo que permite una mayor flexibilidad en cuanto a la instalación y el mantenimiento, y es más adecuado para cultivos anuales.
- **Riego a nivel de banda:** Se utiliza en cultivos en hileras, como el maíz, donde se instalan cintas de goteo que permiten cubrir una mayor superficie de forma eficiente.

Impacto Económico y Productividad Agrícola

Reducción de Costos Operativos: Aunque la instalación inicial de un sistema de riego por goteo puede ser más costosa que otros métodos de riego, a largo plazo resulta más económico debido a los ahorros en el consumo de agua, la reducción de la necesidad de fertilizantes (debido a la entrega precisa de nutrientes) y la menor mano de obra requerida para el riego. Además, los sistemas automatizados pueden reducir considerablemente los costos operativos, ya que requieren menos intervención humana.

Mejora de la Productividad: El riego por goteo no solo asegura una aplicación eficiente de agua, sino que también puede aumentar la productividad de los cultivos al proporcionar un ambiente más estable para el crecimiento de las raíces. Las plantas reciben una cantidad constante de agua, lo que mejora su desarrollo y reduce el estrés hídrico. En muchos casos, se ha observado que el rendimiento de los cultivos puede aumentar hasta en un 40-50% en comparación con los métodos de riego tradicionales (Keller, 2006).

Adaptabilidad a Diferentes Tipos de Suelo y Clima: El riego por goteo se adapta fácilmente a diferentes tipos de suelo, desde terrenos arcillosos hasta suelos arenosos, ya que se controla la cantidad de agua que se suministra, evitando la saturación y la escorrentía. Además, este sistema es adecuado tanto para climas secos como para zonas más húmedas, ya que puede ser ajustado para optimizar el uso del agua según la humedad y las condiciones climáticas locales.

Desafíos y Consideraciones en la Implementación

A pesar de sus numerosos beneficios, la implementación del riego por goteo también presenta ciertos desafíos que deben ser considerados:

Mantenimiento Regular: Los sistemas de riego por goteo requieren un mantenimiento constante para evitar obstrucciones en los goteros y asegurar que los filtros estén limpios. Además, la acumulación de sales en el agua de riego puede afectar la eficiencia del sistema, lo que requiere monitoreo regular de la calidad del agua.

Diseño y Planificación Inicial: La planificación adecuada del sistema de riego por goteo es crucial para su efectividad. El diseño debe tener en cuenta la distribución de las plantas, las características del terreno, la fuente de agua disponible y las necesidades específicas de cada cultivo. Un diseño deficiente puede llevar a una distribución ineficiente del agua y afectar negativamente el rendimiento de los cultivos.

Costo Inicial de Instalación: Aunque los costos operativos son menores, la instalación inicial de un sistema de riego por goteo puede ser costosa. Esto puede ser una barrera para los pequeños agricultores o aquellos con recursos limitados. Sin embargo, existen opciones de financiamiento y subsidios en algunas regiones que pueden facilitar la adopción de esta tecnología.

Avances Tecnológicos y Futuro del Riego por Goteo

Tecnología de Sensores y Monitoreo Remoto: Con el avance de la tecnología, muchos sistemas de riego por goteo ahora están equipados con sensores que monitorean las condiciones del suelo y el clima en tiempo real. Estos sensores permiten ajustar automáticamente el riego según la humedad del suelo y las necesidades de las plantas, optimizando aún más el uso del agua y los nutrientes. Además, los sistemas de monitoreo remoto permiten a los agricultores gestionar el riego de sus cultivos desde cualquier lugar a través de aplicaciones móviles o plataformas en la nube (Haman, 2017).

Riego por Goteo y Energía Solar: El uso de energía solar para alimentar los sistemas de riego por goteo ha ganado popularidad en áreas rurales y regiones áridas donde el acceso a fuentes de energía convencionales puede ser limitado. Los sistemas de riego solar no solo son sostenibles, sino que también reducen los costos operativos a largo plazo y permiten la implementación del riego en zonas donde la electricidad es escasa o inexistente.

Tensiómetros

Los tensiómetros de humedad son dispositivos fundamentales en la gestión eficiente del riego, diseñados para medir la tensión del agua en el suelo. Esta medición proporciona información crucial sobre la disponibilidad de agua para las plantas, lo que permite optimizar los sistemas de riego y garantizar un uso más eficiente de los recursos hídricos (Or, 2001).

El uso de tensiómetros es esencial para determinar el momento adecuado para regar las plantas, ya que tanto la falta como el exceso de agua pueden ser perjudiciales para su desarrollo. Un riego insuficiente puede provocar estrés hídrico y afectar la salud de las plantas, mientras que un exceso de agua puede ocasionar problemas como la asfixia radicular o la lixiviación de nutrientes (Hillel, 2004). Así, el tensiómetro permite a los agricultores y jardineros aplicar el riego solo cuando es necesario, evitando tanto el desperdicio de agua como el daño a los cultivos.

Además de su función principal en la programación del riego, los tensiómetros también son herramientas valiosas para estudiar la dinámica del agua en el suelo. Estos dispositivos permiten analizar la movilidad del agua a través del perfil del suelo y la capacidad de las raíces para absorberla. Este tipo de información es crucial para mejorar la comprensión de los procesos hidrológicos en los cultivos y para diseñar estrategias de riego más efectivas y sostenibles (Baker, 2006).

Los tensiómetros de humedad son instrumentos clave en la agricultura de precisión, ya que permiten una gestión eficiente del agua y contribuyen a la salud y productividad de las plantas. Su uso adecuado no solo optimiza el riego, sino que también promueve la sostenibilidad en la agricultura al reducir el consumo de agua y proteger los recursos hídricos.

Los tensiómetros de humedad desempeñan un papel fundamental en la gestión eficiente del riego al proporcionar datos precisos sobre la tensión del agua en el suelo. Esta medición es crucial para la evaluación de la disponibilidad de agua para las plantas y, por ende, permite optimizar el uso de los sistemas de riego, asegurando una utilización más eficiente de los recursos hídricos. A medida que la presión sobre los recursos naturales aumenta, el uso de tecnologías como los tensiómetros se ha vuelto indispensable para garantizar prácticas agrícolas sostenibles (Or, 2001).

Funcionamiento y Principios de Operación

El principio de funcionamiento de un tensiómetro de humedad se basa en la medición de la tensión del agua en el suelo. Este dispositivo consta de un tubo lleno de agua, que se inserta en el perfil del suelo. En su parte superior, se encuentra un vacuómetro que mide la tensión del agua, expresada generalmente en centímetros de columna de agua (cm H₂O) o kilopascales (kPa), unidades que indican cuánta fuerza deben ejercer las raíces de las plantas para extraer el agua disponible (Topp, 2003).

La medición de la tensión refleja el grado de fuerza de adsorción que ejercen las partículas del suelo sobre las moléculas de agua. Un mayor valor de tensión implica que el agua está fuertemente retenida por el suelo, lo que dificulta su absorción por las raíces. Esto puede ser un indicio de que el suelo está experimentando estrés hídrico, lo que requiere de un riego adicional para satisfacer las necesidades de las plantas (Hillel, 2004). Por el contrario, una tensión baja señala que el agua es fácilmente accesible para las raíces.

Optimización del Riego y Evitación de Daños a los Cultivos

El uso de tensiómetros permite una gestión del riego más precisa y adaptada a las necesidades específicas de cada cultivo. En función de las mediciones, es posible determinar el momento adecuado para realizar el riego, evitando tanto el estrés hídrico por falta de agua como los daños derivados de un exceso de riego. El riego insuficiente puede desencadenar una serie de problemas, como reducción del crecimiento y muerte de las plantas debido a la falta de agua en las raíces. Por otro lado, el exceso de riego puede provocar problemas de asfixia radicular, donde las raíces no pueden respirar adecuadamente debido a la saturación del suelo, además de lixiviación de nutrientes esenciales hacia capas más profundas del suelo (Baker, 2006).

La aplicación adecuada del riego basada en la información proporcionada por los tensiómetros permite optimizar los recursos hídricos y prevenir el desperdicio de agua, promoviendo la sostenibilidad en las prácticas agrícolas y de jardinería. Este tipo de control preciso se convierte en una herramienta esencial en la agricultura de precisión, donde cada recurso se utiliza de forma eficiente para maximizar los rendimientos sin comprometer el medio ambiente.

Estudio de la Dinámica del Agua en el Suelo

Más allá de su función primaria en la programación del riego, los tensiómetros son valiosas herramientas de investigación agronómica. Al permitir la medición precisa de la movilidad del agua a través del perfil del suelo, estos dispositivos facilitan un entendimiento profundo de cómo el agua se desplaza y se distribuye en el suelo, lo cual es crucial para optimizar la capacidad de absorción de las raíces. La información recabada sobre la dinámica del agua también puede servir para ajustar las estrategias de riego según las características particulares de cada cultivo y el tipo de suelo, contribuyendo así a mejorar la eficiencia del riego en sistemas agrícolas más diversos y desafiantes (Baker, 2006).

Contribución a la Agricultura Sostenible

En un contexto global de escasez de recursos hídricos y cambio climático, los tensiómetros de humedad desempeñan un papel crucial en el manejo sostenible del agua. Gracias a su capacidad para medir la humedad del suelo de forma precisa, estos dispositivos permiten a los agricultores gestionar mejor el riego, evitando tanto la sobreexplotación de recursos hídricos como el deterioro del suelo. El uso de tensiómetros facilita la adopción de prácticas agrícolas que son respetuosas con el medio ambiente, favoreciendo la conservación del agua y la salud del suelo a largo plazo. Además, la eficiencia del riego también contribuye a la reducción de costos operativos asociados al consumo de agua, un beneficio importante para los agricultores.

Watermark

El Watermark es un sensor de humedad del suelo altamente eficaz utilizado para medir la tensión del agua en el suelo, proporcionando información clave sobre la disponibilidad de agua para las plantas (Irrometer, s.f.). Esta herramienta es fundamental en la gestión eficiente del riego, ya que permite monitorear de manera precisa el contenido de humedad del suelo y ajustar las prácticas de riego en función de las necesidades reales de los cultivos.

Una de las ventajas del Watermark es su capacidad para ayudar a los agricultores y jardineros a optimizar el uso del agua. Un riego adecuado no solo asegura el buen crecimiento de las plantas, sino que también previene problemas como el encharcamiento o la asfixia radicular, que son consecuencia de un exceso de agua en el suelo. Al utilizar este sensor, se puede mantener el equilibrio adecuado de humedad, lo que mejora la salud general de las plantas y reduce el desperdicio de recursos hídricos.

Así como su utilidad en la gestión del riego, el sensor Watermark también se emplea para investigar la dinámica del agua en el suelo, en particular su movilidad y la absorción de agua por parte de las raíces (Meyer, 2006). Esta capacidad lo convierte en una herramienta valiosa no solo para la agricultura práctica, sino también para los estudios científicos que buscan entender mejor los procesos hidrológicos del suelo y optimizar las técnicas de irrigación.

Es un sensor de humedad preciso y confiable que desempeña un papel crucial en la agricultura moderna. Su uso adecuado permite una gestión más eficiente del agua, promoviendo prácticas de riego más sostenibles y favoreciendo el desarrollo saludable de las plantas.

Principio de Funcionamiento del Sensor Watermark

El sensor Watermark consta de un dispositivo que se inserta en el suelo y un medidor que refleja la tensión del agua en el suelo, normalmente expresada en unidades de centímetros de columna de agua (cm H₂O) o kilopascales (kPa). Esta tensión indica la cantidad de fuerza con la que las partículas del suelo retienen las moléculas de agua, lo cual está directamente relacionado con la facilidad con la que las raíces de las plantas pueden acceder al agua disponible (Irrometer, s.f.). Un valor de tensión más alto indica que el agua está fuertemente retenida por el suelo, dificultando su absorción por las raíces, lo que podría generar estrés

hídrico en las plantas. Por el contrario, valores bajos de tensión indican que el agua está disponible y puede ser fácilmente absorbida por las raíces.

Optimización del Riego y Reducción del Desperdicio de Agua

Una de las principales ventajas del sensor Watermark es su capacidad para optimizar el uso del agua al permitir un riego más preciso y eficiente. La medición precisa de la tensión del agua ayuda a determinar el momento exacto en que el riego es necesario, evitando tanto el riego insuficiente que podría generar estrés hídrico en las plantas, como el exceso de agua que puede llevar a problemas como el encharcamiento o la asfixia radicular (Shock, 2004). Además, este dispositivo contribuye a la reducción del desperdicio de agua, ya que proporciona solo la cantidad necesaria de agua para cada tipo de cultivo, optimizando los recursos hídricos y promoviendo una gestión más sostenible del agua.

Aplicaciones en la Investigación y la Ciencia del Suelo

El sensor Watermark no solo se utiliza en la gestión práctica del riego, sino que también es una herramienta valiosa en la investigación sobre la dinámica del agua en el suelo. Los datos recabados por el sensor permiten estudiar la movilidad del agua en el perfil del suelo, cómo se distribuye en diferentes capas y cómo las raíces de las plantas la absorben. Este tipo de información es clave para entender los procesos hidrológicos del suelo y, a su vez, para mejorar y optimizar las técnicas de irrigación. A través de estos estudios, se pueden desarrollar modelos más precisos que ayuden a prever y gestionar el comportamiento del agua en el suelo, lo que es fundamental para aumentar la eficiencia del riego en diversas condiciones agroecológicas (Meyer, 2006).

Ventajas en la Agricultura Moderna

En el contexto de la agricultura moderna, donde el manejo sostenible de los recursos y la eficiencia en el uso del agua son cada vez más importantes, el sensor Watermark representa una herramienta crucial para los agricultores. Su precisión y fiabilidad en la medición de la humedad del suelo permiten a los cultivadores gestionar de manera más eficiente los sistemas de riego, garantizando el desarrollo óptimo de los cultivos y reduciendo el impacto ambiental asociado con el riego excesivo o insuficiente. Esta herramienta también contribuye a minimizar el uso de fertilizantes y productos químicos, ya que el riego adecuado previene la

lixiviación de estos productos hacia los cuerpos de agua cercanos, protegiendo la salud de los ecosistemas acuáticos (Irrometer, s.f.).

Sonda TDR (Time Domain Reflectometry)

La Sonda TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo) es un instrumento de alta precisión ampliamente utilizado para medir la humedad del suelo de manera rápida y eficiente. Esta tecnología proporciona datos esenciales que permiten la optimización de la gestión del riego y la evaluación de las condiciones del suelo, especialmente en el ámbito agrícola, donde la humedad del terreno es un factor crítico para el crecimiento de las plantas y la conservación del recurso hídrico (Topp, 2003).

El principio de funcionamiento de la Sonda TDR se basa en un cable equipado con un sensor especializado que se inserta directamente en el suelo. A través de este sensor, se emplea la técnica de reflectometría en el dominio del tiempo, que consiste en enviar una señal electromagnética a lo largo del cable y medir el tiempo que tarda en reflejarse. La velocidad de la señal reflejada depende de la constante dieléctrica del suelo, la cual está fuertemente correlacionada con el contenido de humedad en el terreno. Esta medición permite obtener datos extremadamente precisos sobre el nivel de humedad en diversas profundidades del suelo (Topp, 2003). El medidor conectado a la sonda muestra el resultado en términos de porcentaje de humedad, lo que facilita la interpretación de los niveles de humedad y ayuda a tomar decisiones informadas sobre el manejo de los recursos hídricos (Zegelin, 1987).

Una de las principales ventajas de la Sonda TDR es su capacidad para realizar mediciones en tiempo real, lo que permite el monitoreo continuo y detallado de la humedad del suelo. Esta capacidad es fundamental en sistemas agrícolas, donde la gestión adecuada del riego es crucial para evitar tanto el riego insuficiente, que puede estresar a las plantas, como el riego excesivo, que puede llevar a la lixiviación de nutrientes y problemas en la estructura del suelo. El control preciso de la humedad ayuda a maximizar el rendimiento de los cultivos, al tiempo que contribuye a la sostenibilidad del uso del agua en la agricultura.

Además de su aplicación en la agricultura, la Sonda TDR tiene un uso extendido en otros campos, como la hidrología y la geotecnia. En hidrología, se utiliza para estudiar el movimiento y la distribución del agua en el suelo, así como para evaluar la infiltración, el drenaje y la retención de agua en diferentes tipos de terreno. Este tipo de mediciones es clave para modelar el comportamiento de los recursos hídricos y entender fenómenos como las inundaciones y la sequía. En el ámbito geotécnico, se emplea para medir la humedad en suelos de construcción, donde el contenido de humedad del suelo puede influir directamente en la estabilidad y las propiedades mecánicas del terreno, afectando así la seguridad de proyectos de ingeniería civil, como la construcción de carreteras, presas y cimientos (Ledieu, 1986).

Estrés Hídrico

El estrés hídrico se refiere a la condición en la cual las plantas experimentan una insuficiencia de agua, lo que genera una serie de efectos adversos en su fisiología y su capacidad para crecer y desarrollarse adecuadamente. Según Hillel (2004), este déficit de agua puede tener un impacto negativo en diversos procesos biológicos esenciales para las plantas, como la fotosíntesis, la absorción de nutrientes y la regulación de la temperatura interna. Cuando las plantas no disponen de la cantidad necesaria de agua, los mecanismos fisiológicos que dependen del agua se ven comprometidos, lo que puede llevar a una disminución en su rendimiento.

El estrés hídrico afecta principalmente la turgencia celular, lo que reduce la capacidad de las plantas para mantener su estructura, favoreciendo la deshidratación y la marchitez. Además, este fenómeno interrumpe el flujo de nutrientes y agua dentro de las plantas, lo que puede alterar su metabolismo y, a largo plazo, disminuir tanto la productividad como la calidad de los cultivos. En etapas críticas del ciclo de crecimiento, como la floración o la fructificación, el estrés hídrico puede reducir significativamente el rendimiento, afectando no solo la cantidad de cosecha, sino también la calidad de los productos finales.

Por otra parte, el estrés hídrico puede inducir a las plantas a una adaptación mediante la activación de mecanismos de defensa, como el cierre de los estomas para reducir la transpiración. Sin embargo, estos mecanismos de adaptación a menudo conllevan un costo en términos de crecimiento, ya que se priorizan funciones esenciales como la supervivencia

sobre el desarrollo óptimo. Por lo tanto, es fundamental evitar que las plantas lleguen a este estado de déficit hídrico prolongado, ya que los efectos de este estrés pueden ser difíciles de revertir una vez alcanzados ciertos umbrales críticos.

Causas

El estrés hídrico puede ser provocado por diversas condiciones ambientales y agronómicas que afectan la disponibilidad de agua para las plantas. Uno de los factores más comunes es la falta de precipitación o de irrigación, que puede dar lugar a un déficit hídrico prolongado. Según Brady (2002), cuando las precipitaciones son escasas o las fuentes de irrigación no cubren las necesidades hídricas de los cultivos, el agua disponible en el suelo disminuye, afectando directamente la capacidad de las plantas para realizar sus funciones biológicas esenciales, como la fotosíntesis y la absorción de nutrientes.

Otro factor significativo que contribuye al estrés hídrico es la alta evapotranspiración, especialmente en condiciones de altas temperaturas o baja humedad relativa. Lal (2006) señala que, durante los períodos de calor intenso, las plantas pierden grandes cantidades de agua a través de la transpiración, y cuando la humedad en el aire es baja, la evaporación desde el suelo se incrementa, lo que agrava aún más la situación. Este aumento en la evapotranspiración puede resultar en una pérdida excesiva de agua, superando la capacidad de las raíces para absorberla y, por ende, afectando el equilibrio hídrico de la planta.

Además, la mala absorción de agua por el suelo o las raíces también puede ser una causa significativa de estrés hídrico. Según Grossman y Reinsch (2002), la capacidad del suelo para retener agua y la eficiencia de las raíces para captarla dependen de factores como la textura del suelo, su estructura y su nivel de compactación. En suelos mal drenados o compactados, las raíces tienen dificultades para acceder al agua disponible, lo que impide que las plantas reciban el agua necesaria, incluso cuando la cantidad de agua en el suelo es suficiente. Esta deficiencia en la absorción puede generar un estrés adicional para la planta, limitando su crecimiento y afectando negativamente su desarrollo.

Síntomas

Los síntomas del estrés hídrico son manifestaciones visibles y fisiológicas que indican que las plantas están experimentando un déficit de agua. Estos síntomas no solo reflejan la condición de las plantas, sino que también proporcionan una señal temprana de que se deben

tomar medidas para evitar daños irreversibles. Uno de los primeros y más evidentes signos de estrés hídrico es la marchitez y la pérdida de turgencia en las hojas. Según Hillel (2004), cuando las plantas carecen de agua, pierden la presión interna en sus células, lo que disminuye la turgencia, haciendo que las hojas se vean flácidas y caídas. Este fenómeno es una respuesta directa a la falta de agua que impide que las células mantengan su forma y rigidez, lo que afecta tanto la fotosíntesis como la absorción de nutrientes.

Otro síntoma característico del estrés hídrico es la reducción del crecimiento y la productividad de las plantas. Brady (2002) explica que la falta de agua limita los procesos metabólicos esenciales para el desarrollo vegetal, como la división celular y la elongación de las células. Como resultado, las plantas experimentan un crecimiento lento, que puede afectar su altura, el tamaño de sus hojas y la formación de frutos. Además, la escasez de agua afecta la productividad, reduciendo tanto la cantidad de cosecha como la calidad de los productos agrícolas, lo que puede tener consecuencias económicas significativas.

Los cambios en la coloración y textura de las hojas también son síntomas típicos del estrés hídrico. Según Lal (2006), las hojas de las plantas estresadas pueden volverse amarillas (clorosis) debido a la reducción en la fotosíntesis, ya que la falta de agua interrumpe el transporte de nutrientes y la actividad metabólica dentro de la planta. Además, las hojas pueden adquirir una textura más rugosa o seca, debido a la pérdida de turgencia y la evaporación excesiva. Estos cambios visuales no solo afectan la apariencia de la planta, sino que también son indicativos de una disfunción en los procesos vitales de la planta que puede llevar a una pérdida irreversible de rendimiento si no se corrige a tiempo.

Estrategias para contrarrestar

Para mitigar el estrés hídrico, es esencial implementar estrategias efectivas que permitan optimizar el uso del agua y asegurar que las plantas puedan soportar periodos de déficit hídrico sin comprometer su crecimiento y productividad. Una de las principales estrategias es la irrigación eficiente y oportuna, que garantiza que los cultivos reciban la cantidad adecuada de agua en el momento preciso. Según Hillel (2004), un sistema de riego bien gestionado no solo mejora la distribución del agua, sino que también reduce el desperdicio y asegura que el agua llegue de manera efectiva a las raíces de las plantas. El uso de tecnologías avanzadas como los sistemas de riego por goteo o la irrigación automatizada, que ajustan el

caudal según las necesidades de la planta, puede ser clave para mantener un suministro hídrico constante y eficiente, minimizando los efectos del estrés hídrico.

Otra estrategia importante es la selección de cultivos tolerantes a la sequía, que es fundamental para hacer frente a la escasez de agua. Brady (2002) destaca que elegir variedades de plantas adaptadas a condiciones áridas o de baja disponibilidad de agua puede ser una solución eficaz para mitigar los efectos del estrés hídrico. Los cultivos tolerantes a la sequía tienen la capacidad de sobrevivir con menos agua, o de utilizar el agua disponible de manera más eficiente, lo que les permite mantener su crecimiento y rendimiento incluso en condiciones de déficit hídrico. Esta estrategia no solo mejora la resiliencia de los cultivos frente a las sequías, sino que también puede ser más sostenible a largo plazo, al reducir la dependencia de sistemas de riego intensivos.

Finalmente, una de las estrategias agronómicas más efectivas para enfrentar el estrés hídrico es la mejora de la estructura y fertilidad del suelo. Según Grossman y Reinsch (2002), un suelo bien estructurado tiene una mayor capacidad para retener agua, lo que ayuda a las plantas a acceder al agua de manera más eficiente. Además, la mejora de la fertilidad del suelo, mediante la adición de materia orgánica y nutrientes esenciales, favorece la actividad microbiana y mejora la capacidad de retención de agua del suelo. Un suelo con una estructura adecuada también facilita el desarrollo de raíces más profundas, lo que permite a las plantas acceder a reservas de agua subterránea durante los períodos de sequía.

Maíz

El maíz es una planta que tiene requerimientos climáticos específicos para lograr un crecimiento y desarrollo óptimos. Esta especie, conocida científicamente como *Zea mays*, se adapta mejor a climas cálidos y templados, donde las temperaturas promedio oscilan entre los 18 y 30°C. Su desarrollo es altamente sensible a las variaciones de temperatura, y temperaturas fuera de este rango pueden afectar negativamente su crecimiento. Según diversas investigaciones, el maíz experimenta una disminución en la tasa de crecimiento cuando las temperaturas caen por debajo de los 10°C o superan los 35°C, lo que puede reducir tanto el rendimiento como la calidad del grano (Brady, 2002).

Además de las temperaturas, la radiación solar juega un papel crucial en el proceso de fotosíntesis del maíz, ya que la planta requiere una alta cantidad de luz para producir la energía necesaria para su crecimiento. En climas donde la cantidad de horas de luz diurna es insuficiente o las condiciones meteorológicas impiden una adecuada irradiación solar, el desarrollo del maíz puede verse seriamente comprometido.

El maíz también tiene una alta demanda de agua durante su ciclo de crecimiento, especialmente durante las etapas de floración y llenado de grano. La cantidad de precipitación adecuada para el maíz varía según la región, pero en general, requiere entre 500 y 800 mm de agua durante su ciclo, siendo esencial que esta agua se distribuya de manera uniforme para evitar el estrés hídrico. La falta de riego adecuado o precipitaciones irregulares durante los períodos críticos puede llevar a una pérdida significativa en la productividad (Lal, 2006).

Por último, el maíz se beneficia de condiciones de humedad relativa moderadas. Un exceso de humedad o de lluvias puede aumentar la probabilidad de enfermedades fúngicas, mientras que la sequedad excesiva puede causar problemas de deshidratación. Por lo tanto, la gestión adecuada del clima y los recursos hídricos es fundamental para asegurar una cosecha exitosa de maíz (Grossman & Reinsch, 2002).

Características climáticas

Algunas características climáticas ideales para el cultivo de maíz son fundamentales para garantizar un desarrollo óptimo y un rendimiento elevado. Estos factores climáticos influyen directamente en la fisiología de la planta, su crecimiento y la calidad del grano producido.

Temperatura: El maíz requiere temperaturas que oscilen entre los 20 y 25°C durante el día, mientras que las temperaturas nocturnas no deben ser menores a 15°C. Según Hall (2001), el rango térmico ideal favorece los procesos de fotosíntesis, la transpiración y la asimilación de nutrientes, lo que promueve un crecimiento vigoroso y una mayor productividad. Las temperaturas fuera de este rango pueden restringir el desarrollo de la planta e incluso reducir su capacidad para completar el ciclo de crecimiento.

Precipitación: El maíz necesita una precipitación anual mínima de 600 mm, preferentemente distribuida de manera uniforme a lo largo de su ciclo de crecimiento.

Lal (2006) señala que, para evitar periodos de sequía durante fases críticas como la floración y el llenado del grano, es esencial que la lluvia esté bien distribuida. La escasez de agua en estas etapas puede afectar gravemente el rendimiento de los cultivos, reduciendo tanto la cantidad como la calidad del grano.

Humedad relativa: El maíz prefiere una humedad relativa que oscile entre el 60% y el 80%. Grossman y Reinsch (2002) explican que niveles de humedad fuera de este rango pueden afectar la transpiración de la planta y aumentar la susceptibilidad a enfermedades fúngicas, especialmente durante la fase de maduración del grano. Una humedad demasiado alta puede interferir con la transpiración eficiente y, por lo tanto, con el crecimiento adecuado de la planta.

Luz solar: El maíz requiere una cantidad adecuada de luz solar para llevar a cabo la fotosíntesis de manera eficiente, siendo necesario al menos 6 horas de sol directo al día. Hillel (2004) destaca que una exposición prolongada a la luz solar optimiza la producción de energía, lo que favorece el crecimiento vegetativo y la producción de grano. En zonas con menos horas de luz, el rendimiento del maíz puede verse afectado, ya que la planta no recibe suficiente energía para completar sus procesos metabólicos.

Es importante señalar que estas condiciones climáticas ideales pueden variar dependiendo de la variedad de maíz cultivada y de las condiciones locales. Por lo tanto, una adaptación adecuada de las prácticas agrícolas a las características del clima local es esencial para obtener una cosecha exitosa.

Clasificación

El maíz es una planta que se clasifica en diversas categorías de acuerdo con sus características morfológicas y sus usos agronómicos y comerciales.

A continuación, se presentan algunas de las clasificaciones más comunes, que permiten diferenciar las variedades de maíz en función de aspectos como su color, textura y uso.

Clasificación por color:

Maíz blanco (*Zea mays everta*): Este tipo de maíz tiene granos de color blanco y es comúnmente utilizado para la producción de harina, especialmente en regiones donde se preparan tortillas y otros productos de maíz. Según Hall (2001), el maíz blanco es muy apreciado en diversas culturas debido a su versatilidad en la alimentación humana.

Maíz amarillo (*Zea mays indentata*): El maíz amarillo, de granos amarillos, es una de las variedades más cultivadas y tiene un alto contenido de carotenoides, lo que le da su color característico. Lal (2006) señala que esta variedad es utilizada principalmente para la producción de grano destinado a la alimentación animal y humana, además de ser clave en la industria de los aceites vegetales.

Maíz rojo (*Zea mays rubra*): Este maíz presenta un color rojo en los granos y es menos común en la producción masiva, pero se cultiva en algunas regiones debido a sus características nutricionales y su uso en la elaboración de productos especiales. Grossman y Reinsch (2002) indican que el maíz rojo, aunque no tan prevalente como el amarillo o blanco, se valora por su alto contenido de antioxidantes.

Clasificación por textura:

Maíz duro (*Zea mays indentata*): Este tipo de maíz tiene granos con una textura más dura y resistente, lo que lo hace adecuado para la molienda y producción de harinas gruesas. Hillel (2004) explica que el maíz duro es fundamental en la industria de cereales y otros productos alimenticios procesados debido a su resistencia al triturado.

Maíz suave (*Zea mays everta*): A diferencia del maíz duro, el maíz suave tiene una textura más blanda, lo que lo hace ideal para la producción de productos como palomitas de maíz y algunos tipos de harina. Hall (2001) subraya que esta textura más suave también facilita su digestibilidad y su uso en la fabricación de alimentos procesados.

Clasificación por uso:

Maíz para grano (*Zea mays indentata*): Este maíz es cultivado principalmente para la producción de grano, que se utiliza en la alimentación animal, humana y en la industria de los biocombustibles. Lal (2006) destaca que el maíz de grano es una de las variedades más importantes en términos de volumen de producción mundial.

Maíz para forraje (*Zea mays everta*): Esta variedad se cultiva específicamente para ser utilizada como forraje en la alimentación animal. El maíz para forraje tiene un alto contenido de humedad y se cosecha en su estado inmaduro para asegurar su valor nutritivo. Grossman y Reinsch (2002) indican que el maíz forrajero es esencial para la ganadería en muchas regiones, ya que proporciona una fuente importante de energía para el ganado.

Maíz ornamental (*Zea mays concolor*): El maíz ornamental se cultiva principalmente por su atractivo visual y sus colores vibrantes. Hillel (2004) menciona que este tipo de maíz es utilizado en decoraciones, especialmente durante las festividades, y no tiene un uso comercial significativo en la industria alimentaria.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del sitio de estudio

El estudio se realizó en el Jardín Hidráulico del Departamento de Riego y Drenaje de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Las coordenadas geográficas son: 25° 22' latitud norte y 101° 22' longitud oeste a una altitud de 1765 msnm (Figura 1).



Figura 1 Ubicación del área de estudio

Clima, agua y suelo del sitio experimental

El clima de la localidad es semifrío y semihúmedo con una temperatura promedio anual de 19°C, precipitación media anual de 325.7 mm y evaporación media anual de 1 956 mm. La altitud sobre el nivel del mar es 1 734 m (INIFAP, 2022). De acuerdo con la clasificación climática de Köppen corresponde a un clima BSk (w) (e').

En el **Cuadro 1** se muestran las propiedades físicas y químicas del suelo (0 – 20 cm de profundidad) del lote de estudio. Corresponde a un suelo de textura migajón arcillosa, con bajo contenido de materia orgánica, suelo alcalino.

La porosidad del suelo se obtuvo con el valor de la densidad aparente del suelo (obtenida con la barrena de corazones) y la densidad de partículas (método del Picnómetro), con la siguiente ecuación:

$$\eta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (1)$$

Dónde: ρ_b es la densidad aparente, ρ_p es la densidad de partículas y η la porosidad del suelo. Los valores correspondientes se muestran en el **Cuadro 1**.

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo del área de estudio.

Propiedad	Valor	Unidad
pH	7.92	
CE	0.82	dS/m
NO ₃	0.02	meq/L
K	0.11	meq/L
Ca	1.96	meq/L
Mg	0.24	meq/L
Materia Orgánica	2.38	%
Arcilla	36.8	%
Limo	24	%
Arena	39.2	%
Textura	Migajón-Arcilloso	Migajón-Arcilloso
Densidad Bruta	1.47	g/cm ³
Densidad de partículas	2.37	g/cm ³
Porosidad	37.97	%

El análisis de las propiedades fisicoquímicas del suelo del área de estudio (**Cuadro 1**) indica condiciones moderadamente favorables para el desarrollo del cultivo de maíz (*Zea mays* L.).

El valor de pH de 7.92 indica que el suelo es ligeramente alcalino, que no representa una limitante severa para el crecimiento del maíz, ya que este cultivo tolera bien un rango de pH entre 5.5 y 8. Sin embargo, esta alcalinidad pudo reducir la disponibilidad de micronutrientes como hierro y zinc.

La conductividad eléctrica (CE) de 0.82 dS/m está dentro del rango no salino, lo que significa que no existen riesgos de salinidad para la germinación ni el desarrollo del cultivo.

La concentración baja de nitratos (0.02 meq/L) indica una deficiencia de nitrógeno disponible. También se observa una baja disponibilidad de potasio (0.11 meq/L), otro elemento clave en el llenado de grano y en la resistencia a estrés hídrico. En contraste, los niveles de calcio (1.96 meq/L) y magnesio (0.24 meq/L) son adecuados y no representan limitantes nutricionales. El contenido de materia orgánica de 2.38 % es moderado, lo cual favorece la estructura del suelo, mejora la retención de humedad y contribuye a una mayor disponibilidad de nutrientes.

La textura migajón-arcillosa del suelo es apropiado para el cultivo de maíz, ya que combina buena retención de agua con una aireación aceptable, siempre que se evite la compactación. Por último, la densidad aparente de 1.47 g/cm³ sugiere una compactación media, que puede limitar ligeramente el crecimiento radicular si no se manejan adecuadamente las labores de preparación del terreno. La densidad de partículas (2.37 g/cm³) es característica de suelos minerales, y la porosidad total (37.97 %) se considera adecuada para el desarrollo del cultivo, permitiendo una adecuada circulación de aire y agua en el perfil del suelo.

En el **Cuadro 2** se muestran las características físicas y químicas del agua de riego usada en el estudio, que corresponde a un agua ligeramente alcalina, con baja CE

Cuadro 2. Propiedades fisicoquímicas del agua de riego utilizada en el estudio.

Propiedad	Valor	Unidad
pH	7.69	
CE	0.68	dS/m
NO ₃	0.08	meq/L
SO ₄	0.79	meq/L
Cl	0.9	meq/L
K	0.12	meq/L
Ca	4.13	meq/L
Mg	0.8	meq/L
HCO ₃	4.04	meq/L

El pH (7.69) indica que el agua es ligeramente alcalina, lo cual es generalmente favorable para la mayoría de los cultivos, ya que no provoca acidez que pueda afectar la absorción de nutrientes. La conductividad eléctrica (0.68 dS/m) representa baja salinidad del agua, que es favorables, ya que, altos niveles de salinidad pueden afectar la absorción de agua y nutrientes por las raíces. Los valores de nitratos, sulfatos, cloruros, potasio, calcio, magnesio, y bicarbonatos reflejan una composición química adecuada y equilibrada para el riego de cultivos.

La concentración relativamente alta de calcio y bicarbonatos puede favorecer la estructura del suelo, promoviendo la agregación de partículas y mejorando la aireación y retención de agua. Los niveles de nutrientes como nitratos y potasio son bajos, por lo que el agua no representa una fuente significativa de estos nutrientes para el cultivo, lo que debe ser considerado en el plan de fertilización. En general, el agua de riego presenta una calidad apropiada para uso agrícola, sin riesgos importantes de salinidad o toxicidad.

Establecimiento y manejo agronómico del cultivo

La preparación del terreno se realizó con dos pasos de rastra para después levantar las camas experimentales de siembra de 75 cm de ancho por 8 m de longitud y una distancia de 1 m al centro de las camas. El área promedio de la sección transversal de las camas fue de 0.3391 m² y el volumen de suelo de cada cama de 2.713 m³. La siembra (cultivo de maíz, híbrido Lucero L-025) se realizó manualmente el 1 de junio del 2022, depositando las semillas a 2 cm de profundidad y 12 cm de espaciamiento (la germinación se presentó a los 11 días después de siembra). Los riegos se aplicaron con un sistema de goteo, con cinta de 16 mm de diámetro calibre 6000 (marca Toro), la separación de emisores es de 30 cm y gasto de aplicación de 1 LPH.

Manejo nutricional del cultivo y control fitosanitario

Durante el desarrollo de las plantas y a una frecuencia de 7 días se aplicó (fertirriego) una solución de nutrimentos para un adecuado desarrollo de las plantas. La primera aplicación fue a los 25 días después de siembra. En total se realizaron 12 aplicaciones. En el **Cuadro 3** se muestra la relación de fertilizantes aplicados durante el ciclo de crecimiento de las plantas.

Cuadro 3. Relación de fertilizantes aplicados a cada una de las camas del lote experimental (dosis semanal).

Fertilizante	g/cama
Fosfonitrato	46.6
Nitrato de potasio	9.0
Nitrato de calcio	7.1
Sulfato de magnesio	18.4
Quelato de Fe	1.4

El control se malezas se realizó manualmente. Para el control del gusano cogollero se utilizó el Insecticida sistémico Confidor (Imidacloprid), en una dosis de 1 litro por hectárea.

Tratamientos evaluados

Para evaluar el efecto de la aplicación de la composta orgánica al suelo en tres concentraciones (0, 1 y 3 kg m⁻³ de suelo), y dos niveles de tensión de la humedad del suelo (20 y 40 kPa) para la aplicación del riego en el crecimiento y rendimiento de las plantas, se usó un diseño completamente al azar con arreglo en parcelas divididas y cuatro repeticiones, donde la parcela mayor correspondió a la tensión de humedad del suelo, y la menor a la aplicación de la composta orgánica para un total de 6 tratamientos con sus correspondientes repeticiones (**Cuadro 4**). La comparación de medias se realizó con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$). Cada parcela de estudio fue de dos camas de 8 m de longitud. La composta orgánica se incorporó a 10 cm de profundidad del suelo en las concentraciones descritas, 10 días antes de la siembra. Se usó la composta orgánica Compomax de la compañía Pasto Verde SA de CV. La composición química de esta composta se muestra en el **Cuadro 5**. La tensión de humedad del suelo se obtuvo con dos tensiómetros (marca Irrometer, Irrometer, Inc, Riverside, CA, USA) de 30 cm de longitud, enterrando la capsula poroso de dichos tensiómetros a una profundidad de 20 cm bajo la superficie del suelo al centro de la cama en dos repeticiones de cada tensión de humedad. Para determinar el volumen de agua por aplicar y el tiempo de riego (de cada tensión de humedad del suelo) se determinó el volumen de suelo de las camas de siembra (2.713 m³), y el contenido de humedad volumétrico (cm³ de agua / cm³ de suelo) a capacidad de campo y el correspondiente a cada tensión de humedad

del suelo usando una sonda TDR (HydroSense II, Campbell Sci., Inc., Logan, Utah, USA) con varillas de 20 cm de longitud. En el **Cuadro 6** se muestra el tiempo de riego para cada valor de tensión de humedad del suelo. Los tratamientos de humedad iniciaron a los 20 días después de la germinación de las plantas.

Cuadro 4. Factores principales de estudio y tratamientos correspondientes.

Factor A Tensión de humedad del suelo (kPa)	Factor B Aplicación de la composta orgánica al suelo (kg/m ³ de suelo)	Tratamiento correspondiente
20	0	T1
20	1	T2
20	3	T3
40	0	T4
40	1	T5
40	3	T6

Cuadro 5. Relación de componentes de la composta orgánica y su composición porcentual.

Componente	Composición
Materia Orgánica	39.7 %
Nitrógeno	1.51 %
Fósforo	0.94 %
Potasio	1.31 %
Calcio	2.97 %
Magnesio	0.80 %
Ácido Húmico	0.40 %
Ácido Fúlvico	0.40 %
Acondicionador	51.97 %
Total	100 %

Cuadro 6. Tensión de la humedad del suelo (medida con tensiómetros) para reponer la humedad del suelo, contenido de humedad correspondiente y el tiempo de riego para reponer la humedad consumida por las plantas.

Tensión de humedad del suelo (kPa)	Contenido de humedad (% en volumen)	Tiempo de riego (horas)
20 kPa	34	2 h 35 min
40 kPa	29	3 h 15 min

Mediciones realizadas

La cosecha se realizó del 25 al 28 de septiembre de 2022 y las mediciones realizadas fueron: altura de planta, diámetro del tallo a 5 cm sobre la superficie, número de mazorcas por planta, peso seco de la mazorca, longitud y diámetro mayor de la mazorca, peso seco de la planta, peso seco de 100 semillas, número y peso de gramos por mazorca, rendimiento (kg/planta). El valor de cada repetición de los diferentes tratamientos fue el promedio de 10 plantas de las diferentes variables de respuesta.

RESULTADOS

Tensión de humedad del suelo y la composta orgánica en el crecimiento de las plantas de maíz

Para cualquier concentración de incorporación de la composta orgánica al suelo (0 kg/m^3 , 1 kg/m^3 y 3 kg/m^3), la aplicación de los riegos a 20 o 40 kPa no afectó el contenido relativo de clorofila (unidades SPAD), la altura de planta, el peso seco de la planta ni el peso seco de la raíz (**Cuadro 7**) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Sin embargo, el estrés hídrico provocado al regar a 40 kPa de tensión de la humedad del suelo redujo 6.27 % el diámetro del tallo y 20 % el peso seco de la planta (**Cuadro 7**) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Para cualquier tensión de la humedad del suelo para la aplicación de los riegos (20 kPa, y 40 kPa), la incorporación de la composta orgánica al suelo en las tres concentraciones evaluadas no afectó la altura de planta, diámetro del tallo, peso seco de la planta, ni el peso seco de la raíz (**Cuadro 7**) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Pero, la incorporación de composta de 1 kg m^{-3} de suelo incremento 21.44 % el contenido relativo de clorofila respecto a la no incorporación de composta (0 kg m^{-3} de suelo), sin embargo, 3 kg m^{-3} de composta al suelo no afectó el contenido relativo de clorofila (**Cuadro 7**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$). La incorporación de composta a 3 kg m^{-3} de suelo aumentó 9.09 % el peso seco de planta, pero la incorporación de 1 kg m^{-3} no afectó el peso seco de planta para cualquier tensión de humedad del suelo (**Cuadro 7**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

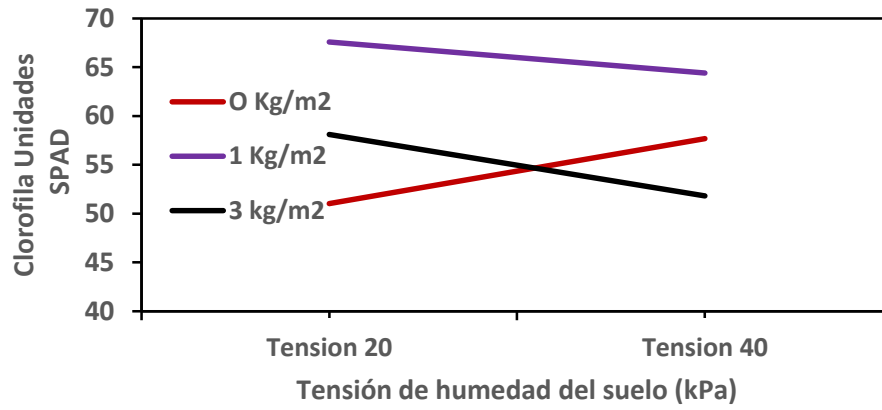
La interacción entre la tensión de humedad del suelo y la incorporación de la composta orgánica al suelo afectó el contenido relativo de clorofila (unidades SPAD), la altura de planta, diámetro del tallo, peso seco de planta, pero no afectó el peso seco de la raíz (**Cuadro 7**) (Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 7. Tensión de la humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en los parámetros de crecimiento de un cultivo de maíz (hibrido Lucero L-025)

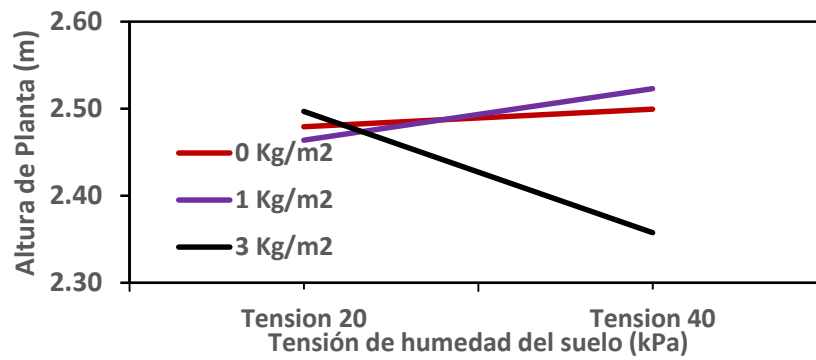
Factor principal	Nivel	Contenido clorofila (SPAD)	Altura de plantas (cm)	Diámetro del tallo (cm)	Peso seco de planta (g)	Peso seco de la raíz (g)
Tensión de la humedad del suelo	20 kPa	58.90 ^a	2.48 ^a	2.71 ^a	240 ^a	87.5 ^a
	40 kPa	57.98 ^a	2.46 ^a	2.55 ^b	200 ^b	93.0 ^a
	MDS (<0.05)	1.79	0.057	0.0875	15.1	19.3
Composta orgánica	0. kg/m ³	54.35 ^b	2.49 ^a	2.62 ^a	220 ^{ab}	82.5 ^a
	1 kg/m ³	66.00 ^a	2.49 ^a	2.65 ^a	200 ^b	93.0 ^a
	3 kg/m ³	59.96 ^b	2.47 ^a	2.63 ^a	240 ^a	97.5 ^a
	MDS (<0.05)	2.67	0.09	0.131	22.7	28.9
Interacción	Tensión - composta	**	*	*	*	ns

La interacción entre la tensión de humedad del suelo y la incorporación de la composta orgánica al suelo mostró que, para 20 kPa de tensión, el contenido relativo de clorofila (unidades Spad) es mayor con 1 kg m⁻³ de composta que con 0 y 3 kg m⁻³, y que a 40 kPa de tensión el contenido relativo de clorofila decrece con la composta de 1 y 3 kg m⁻³ y aumenta en el suelo sin composta (**Figura 2A**). La altura de planta es muy similar en las tres concentraciones de composta en 20 kPa de tensión, aumenta ligeramente sin composta y con 1 kg m⁻³ y decrece apreciablemente con 3 kg m⁻³ en la tensión de 40 kPa (**Figura 2B**).

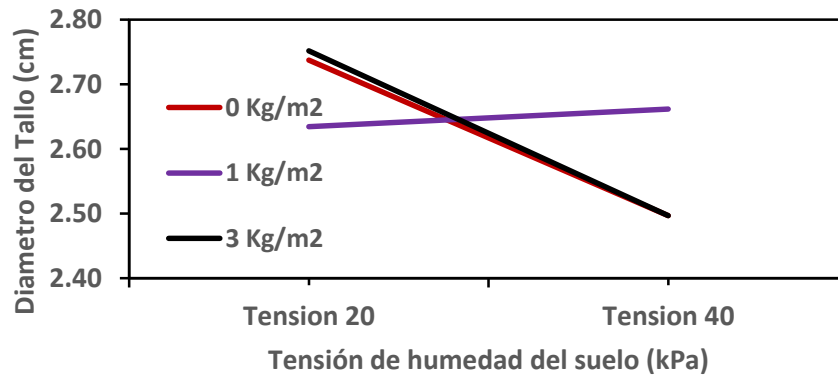
El diámetro del tallo (5 cm sobre la superficie del suelo) fue muy similar sin composta al de 3 kg m⁻³ ambos mayores que al de 1 kg m⁻³ en 20 kPa de tensión de humedad del suelo, el diámetro desciende apreciablemente en ambas concentraciones (0 y 3 kg m⁻³) y aumenta en 1 kg m⁻³ de composta para la tensión de 40 kPa (**Figura 2C**). El peso seco de la planta en 20 kPa de tensión de humedad del suelo fue muy similar sin composta al de 3 kg m⁻³ ambos superiores al de 1 kg m⁻³, el peso seco de la planta decrece en todas las concentraciones para la tensión de 40 kPa siendo mayor en 3 kg m⁻³ que el observado a 0 y 1 kg m⁻³ ambos siendo muy similares (**Figura 2D**).



B



C



D

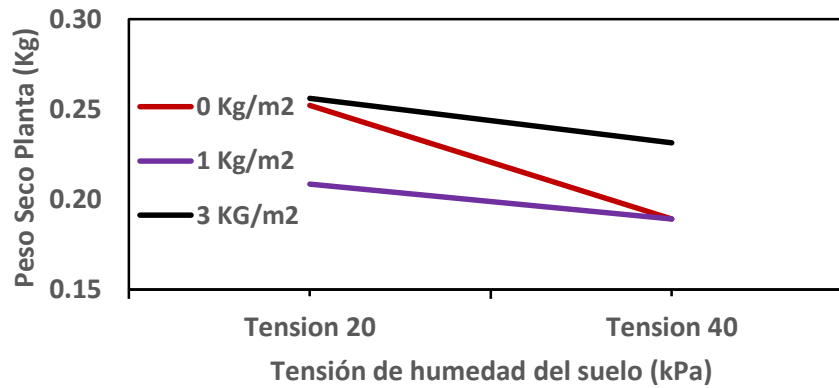


Figura 2. Efecto de la interacción entre la tensión de humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en: A el contenido relativo de clorofila (unidades SPAD), B la altura de planta, C diámetro del tallo (5 cm de altura), D peso seco de la planta.

Tensión de humedad del suelo y la composta orgánica en el rendimiento de las plantas de maíz

Para cualquier concentración de incorporación de la composta orgánica al suelo, el estrés hídrico debido al incremento de la tensión de la humedad del suelo al regar a 40 kPa, redujo 10.87 % el número de mazorcas por planta, 14.68 % el peso seco de la mazorca, 9.85 % el peso de granos por mazorca, 4.25 % el número de granos por mazorca, y 18.99 % el rendimiento, pero no tuvo efecto en el peso de 100 semillas (**Cuadro 8**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Para cualquier tensión de la humedad del suelo para la aplicación de los riegos, la incorporación de la composta orgánica al suelo en cualquier concentración (0 kg/m³, 1 kg/m³, 3 kg/m³) no afectó el número de mazorcas por planta, el peso de la mazorca, el peso de granos por mazorca, número de granos por mazorca, ni el rendimiento (**Cuadro 8**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Sin embargo, incorporar 3 kg/m³ de composta para cualquier tensión de humedad del suelo incrementó 12.47 % el peso de granos por mazorca respecto a no incorporar composta (0 kg/m³), y 9.80 % respecto a la incorporación de 1 kg/m³ (**Cuadro 8**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$). La incorporación de 1 kg/m³ de composta en cualquier tensión de humedad del suelo incremento 6.69 % el peso seco de 100 semillas respecto a la no incorporación de composta, pero la incorporación de 3 kg/m³ tuvo el mismo efecto que la incorporación de 1 kg/m³ y la de 0 kg/m³.

Para el número de mazorcas por planta, peso seco de 100 semillas, peso y número de granos por mazorca, y el rendimiento no se observó ninguna interacción entre la tensión de la humedad del suelo para la aplicación de los riegos y la incorporación de la composta orgánica al suelo (**Cuadro 8**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$). Sin embargo, para el peso seco de la mazorca se tuvo una fuerte interacción, ya que, para la tensión de 20 kPa el mayor peso seco de la mazorca ocurrió con la incorporación de la composta a 1 kg/m³, pero para la tensión de 40 kPa se presentó con la composta a 3 kg/m³ (**Figura 3**; Tukey, $\alpha \leq 0.05$).

Cuadro 8. Tensión de la humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en los parámetros de rendimiento de un cultivo de maíz (hibrido Lucero L-025)

Factor principal	Nivel	Numero Mazorcas planta	Peso de mazorca (kg)	Peso seco 100 semillas (g)	Peso Granos Mazorca (g)	Granos Por mazorca	Rendimiento (g/planta)
Tensión de la humedad del suelo	20 kPa	1.815 ^a	0.214 ^a	27.17 ^a	144.77 ^a	576.94 ^a	284.98 ^a
	40 kPa	1.637 ^b	0.187 ^b	26.44 ^a	131.79 ^b	552.97 ^b	239.49 ^b
	MDS (<0.05)	0.095	0.0153	0.0828	7.27	19.08	22.97
Composta orgánica	0 kg/m ³	1.75 ^a	0.195 ^a	25.86 ^b	128.73 ^b	553.65 ^a	251.32 ^a
	1 kg/m ³	1.71 ^a	0.200 ^a	27.59 ^a	141.34 ^a	566.53 ^a	267.78 ^a
	3 kg/m ³	1.72 ^a	0.206 ^a	26.98 ^{ab}	144.78 ^a	574.67 ^a	267.61 ^a
	MDS (<0.05)	0.143	0.022	1.24	10.91	28.61	34.45
interacción	Tensión - composta	ns	*	ns	ns	ns	ns

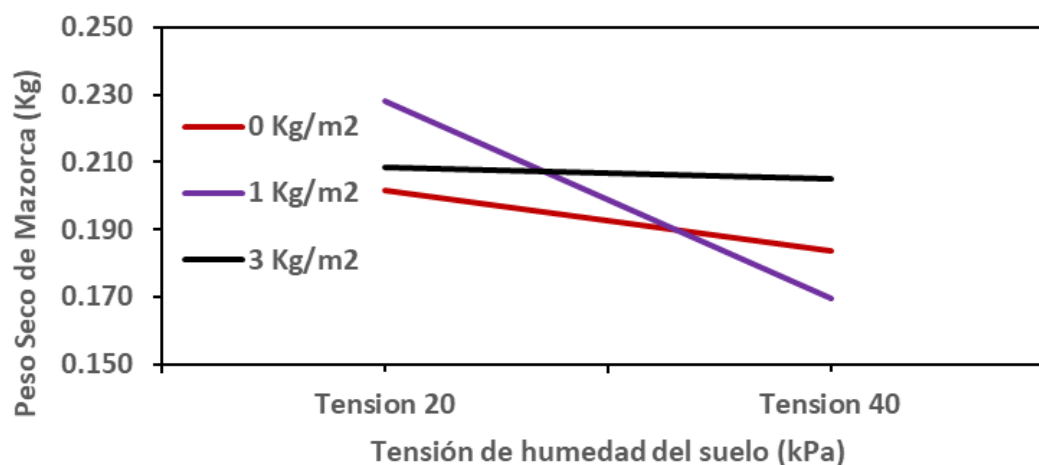


Figura 3. Efecto de la interacción entre la tensión de humedad del suelo para la aplicación del riego y la incorporación de una composta orgánica al suelo en el peso seco de la mazorca.

DISCUSIÓN

Crecimiento de las plantas de maíz

El crecimiento de las plantas de maíz del híbrido Lucero L-025 no fue severamente afectado por el estrés hídrico inducido al regar a 40 kPa de tensión de humedad del suelo ya que, solo redujo el diámetro del tallo (6.27 %) y el peso seco de la planta (20 %) pero no afectó la altura de planta, el peso seco de la raíz, ni el contenido relativo de clorofila. Esto se debió a que el efecto del estrés hídrico al regar a 40 kPa de tensión de humedad, no afectó significativamente la tasa de transpiración, la tasa de asimilación de bióxido de carbono, ni el metabolismo posterior.

El efecto del estrés hídrico en el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz depende de la severidad del estrés y de la etapa de crecimiento de las plantas. Por ejemplo, el estudio de Cheng *et al.* (2021) mostró que la altura de planta, el área foliar, contenido de clorofila foliar y la cantidad de materia seca (sobre la superficie) se redujo significativamente al reducir la aplicación promedio de los riegos de 63 % de la capacidad de campo al 48 %. En otro estudio se demostró que el efecto del estrés hídrico severo en el desarrollo y crecimiento del maíz es mayor en la etapa de plántula que en la de formación de nudos, de espiga y de llenado de grano (Song *et al.*, 2019).

La incorporación de la composta orgánica al suelo tuvo un mínimo efecto en el crecimiento de las plantas ya que solo incrementó el contenido relativo de clorofila (21.44 %) y el peso seco de la planta (9.09 %), pero no afectó la altura planta, el diámetro del tallo, ni el peso seco de la raíz. Esto probablemente se debió a que el tiempo para el aporte de nutrientes al suelo por la composta no fue suficiente para su asimilación por las raíces de las plantas. La composta se aplicó pocos días antes de la siembra por lo que, el tiempo del ciclo de crecimiento de las plantas no fue suficiente para la descomposición e integración de la composta al suelo. Al respecto, Bernal *et al.* (2009) mostraron que la descomposición completa de la composta y la madurez del material orgánico pueden requerir desde varias semanas hasta meses, dependiendo de las condiciones ambientales y el tipo de residuo, lo que afecta directamente la disponibilidad inmediata de nutrientes para los cultivos.

De igual forma, el estudio de López *et al.* (2017) demostró que, en cultivos de maíz, la aplicación de composta pocos días antes de la siembra puede limitar los beneficios agronómicos, ya que la liberación de nutrientes ocurre de manera gradual durante el ciclo del cultivo. También, el trabajo de Zhang *et al.*, (2019) encontró que las compostas orgánicas requieren un período adecuado de tiempo para su descomposición e integración al suelo para mejorar las propiedades físicas y químicas, así como la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

La interacción entre la incorporación de la composta orgánica al suelo y la tensión de humedad muestra que, en las plantas sin composta orgánica el estrés hídrico al regar a 40 kPa incrementa el contenido relativo de clorofila en las hojas. Sin embargo, con la composta orgánica en cualquier concentración el contenido de clorofila tiende a decrecer con el incremento de la tensión de humedad del suelo para la aplicación de riego. Este resultado indica que el estrés hídrico tiene un efecto mayor en las plantas sin composta que son forzadas a elaborar más clorofila para incrementar la tasa de asimilación de bióxido de carbono debido al cierre parcial de los estomas por el estrés hídrico. En las plantas que crecieron con la composta orgánica el efecto del estrés hídrico fue menor y no fue necesario la elaboración de más clorofila por las plantas. Esta respuesta indica que el efecto del estrés hídrico en estas plantas fue mitigado, haciendo innecesaria una producción adicional de clorofila. Las plantas, al enfrentar un cierre parcial de los estomas provocado por el estrés hídrico, incrementan la síntesis de clorofila para maximizar la tasa de asimilación de dióxido de carbono y mantener el proceso fotosintético (Farooq, *et al.*, 2009). Dicho aumento en el contenido de clorofila se considera una respuesta compensatoria para contrarrestar la reducción en la conductancia estomática y la disponibilidad limitada de agua. La mejora en la estructura física del suelo y en la capacidad de retención de agua, por efecto de la incorporación de materia orgánica, mejora la disponibilidad de agua para las raíces, lo que reduce la severidad del estrés y mantiene condiciones más favorables para el desarrollo de las plantas (Zhang, *et al.*, 2016). Además, la materia orgánica contribuye a una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales que apoyan los procesos metabólicos involucrados en la fotosíntesis y el crecimiento.

Estudios recientes han demostrado que el uso de compostas orgánicas no solo mejora las propiedades químicas y físicas del suelo, pero también aumentan la resistencia de las plantas al estrés abiótico, y el déficit hídrico. Ajayi y Agbede (2019) demostraron que la aplicación de compostas orgánicas mejora la capacidad del suelo para retener agua, lo que mejora la nutrición y mantiene mayor estabilidad de los niveles de clorofila en las plantas bajo condiciones de sequía. Esto resulta en un mejor desempeño fotosintético y un incremento en la tolerancia al estrés hídrico.

Sin la composta orgánica incorporada al suelo el estrés hídrico tuvo un mayor efecto en el diámetro del tallo y el peso seco de la planta que en la altura de planta, mientras que con la composta a 1 kg m^{-3} básicamente no se observó efecto del estrés hídrico al regar a 40 kPa de tensión de humedad del suelo en altura de planta, diámetro del tallo y peso seco de la planta. Sin embargo, las plantas que crecieron en la composta de 3 kg m^{-3} el incremento en el estrés hídrico al regar a 40 kPa afectó las tres variables del crecimiento mencionadas. Al regar a 20 kPa de tensión, se tiene mayor contenido de agua en el suelo que facilita la disolución de la composta para su integración al suelo y mayor disponibilidad de agua y nutrimentos para las plantas; mientras que, con el riego a 40 kPa se tiene menor humedad en el suelo, menor disolución de la composta y menor disponibilidad de agua y nutrimentos por lo que el efecto en el menor crecimiento de las plantas es mayor.

Esta diferencia se explica por la relación crítica entre el contenido de humedad del suelo y la disolución y mineralización de la materia orgánica contenida en la composta. En condiciones de mayor humedad, como las asociadas a una tensión de 20 kPa, el suelo presenta una mayor cantidad de agua disponible, lo que facilita la disolución, descomposición y mineralización de la composta, incrementando la liberación gradual y sostenida de nutrientes esenciales y mejorando la disponibilidad hídrica para las plantas (Chen, *et al.*, 2017). Este proceso es fundamental, pues asegura que los nutrientes se encuentren en formas fácilmente absorbibles, optimizando el crecimiento y desarrollo de las plantas. Por el contrario, en condiciones de menor humedad del suelo (40 kPa), la limitada disponibilidad de agua restringe la solubilización y degradación de la materia orgánica, disminuyendo la liberación de nutrientes y, por ende, la capacidad de la planta para tolerar el estrés hídrico (Gao, *et al.*, 2019).

Además, la actividad microbiana, componente clave en la descomposición de la materia orgánica y en la transformación de nutrientes en formas disponibles para las plantas, depende del contenido de humedad en el suelo. La disminución de la humedad reduce la actividad y proliferación microbiana, que retrasa los procesos de mineralización afectando negativamente la dinámica de nutrientes (Rillig & Mummey, 2006). Esta restricción microbiana en condiciones secas provoca un efecto dominó, en el que la composición química del suelo se altera y se reduce la eficiencia del uso de la composta. Por lo tanto, la eficiencia de la composta orgánica no solo depende de su concentración, sino también de la condición de humedad del suelo.

Componentes del rendimiento de las plantas

El rendimiento de las plantas de maíz (híbrido Lucero L-025) es muy sensibles al estrés hídrico, ya que al regar a 40 kPa de tensión de humedad del suelo se reduce significativamente el número de mazorcas por planta, el peso de la mazorca, el número y peso de granos por mazorca y el rendimiento (g/planta). El híbrido Lucero L-025 es de alto rendimiento que requiere un suministro adecuado de agua por lo que, el estrés hídrico afecta marcadamente su rendimiento.

Estudios previos han confirmado que el déficit hídrico, especialmente durante las etapas críticas como floración y llenado de grano, puede reducir el rendimiento de forma considerable en maíz y otros cultivos. Por ejemplo, Farooq *et al.* (2009) documentaron que el estrés hídrico disminuye la expansión foliar, reduce la fotosíntesis y altera la partición de asimilados, lo que resulta en menores tasas de llenado de grano. De igual forma, Otegui *et al.* (1995) encontraron que el déficit hídrico previo a la antesis reduce significativamente el número de granos por mazorca debido al aborto floral inducido por la baja disponibilidad de agua. Además, estudios más recientes, como el de Hussain *et al.* (2019), reportan que tanto el número como el peso de grano se ven comprometidos por el cierre estomático y el estrés oxidativo inducido por el déficit de agua en el suelo, afectando directamente el rendimiento del cultivo.

La incorporación de la composta orgánica al suelo tuvo un pequeño efecto en el rendimiento de las plantas, ya que solo incremento el peso de granos por mazorca y el peso seco de 100 semillas, pero no tuvo efecto en el número de mazorcas por planta, peso de la mazorca, peso y número de granos por mazorca ni el rendimiento. Esto probablemente debido

a que, la composta orgánica incorporada al suelo no tuvo suficiente tiempo para su descomposición y liberación de nutrimentos al suelo que estuvieran disponibles para las plantas.

Diversos estudios han documentado que la mineralización de la composta orgánica (transformación de su contenido en nutrientes disponibles para las plantas), es un proceso gradual que puede tomar varias semanas y hasta meses, dependiendo del tipo de composta, sus características fisicoquímicas y las condiciones edafoclimáticas del sitio. Por ejemplo, Bernal *et al.* (2009) indican que para que la materia orgánica se integre completamente al suelo y se mineralicen sus compuestos, se requieren entre 6 y 12 semanas bajo condiciones óptimas de humedad y temperatura. De igual forma, Mkhabela y Warman (2005) demostraron que el nitrógeno presente en compostas de residuos orgánicos agrícolas comienza a liberarse en cantidades significativas después de 30 a 60 días, siendo este lapso crítico para su absorción por parte de los cultivos. Asimismo, Sánchez-Monedero *et al.* (2004) resaltan que el proceso de humificación y disponibilidad de nutrientes puede extenderse aún más si la composta no está completamente estabilizado al momento de su incorporación.

De los componentes del rendimiento evaluados, solo en el peso seco de la mazorca se observó interacción entre la tensión de humedad del suelo y la concentración de la composta orgánica. En la tensión de 20 kPa, el peso mayor se logró con 1 kg m^{-3} de composta, pero en la tensión de 40 kPa se requirieron 3 kg m^{-3} de composta. A mayor disponibilidad de agua en el suelo (menor tensión) se tiene mayor disolución de la composta y mayor liberación de nutrimentos. Al decrecer la humedad del suelo (mayor tensión) se requiere una mayor concentración de la composta para compensar la menor disponibilidad de agua en la liberación de nutrimentos.

Estudios previos han demostrado que la disponibilidad de agua en el suelo no solo influye en la actividad microbiana, encargada de descomponer la materia orgánica, sino también en la solubilidad de los nutrientes contenidos en la composta. De acuerdo con García-Gil *et al.* (2004), niveles adecuados de humedad favorecen una descomposición más rápida y eficiente de los compuestos orgánicos, aumentando la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno y fósforo. Por su parte, Pascual *et al.* (1997) explican que, bajo condiciones de sequía o estrés hídrico, la mineralización de nutrientes se reduce considerablemente

debido a la inhibición de la actividad enzimática y la menor movilidad de los iones en el suelo. Asimismo, Hue & Sobieszczyk (2000) señalan que, ante una menor disponibilidad de agua, se requiere una mayor cantidad de materia orgánica aplicada para alcanzar un nivel comparable de liberación de nutrientes, como forma de compensar las limitaciones en la disolución. Estos estudios sustentan la observación de que, en suelos con menor humedad, es necesario incrementar la dosis de composta para garantizar un aporte suficiente de nutrientes al cultivo.

CONCLUSIONES

El estrés hídrico al regar a 40 kPa de tensión de humedad del suelo no afectó los parámetros del crecimiento de las plantas evaluadas en el estudio. La concentración de la composta orgánica al suelo en las dos concentraciones evaluadas tuvo un efecto mínimo en los parámetros del crecimiento.

El estrés hídrico al regar a 40 kPa provocó mayor contenido de clorofila en las hojas de las plantas que crecieron sin la composta orgánica incorporada al suelo, respecto a las plantas que se desarrollaron con la composta orgánica incorporada al suelo y regadas a la misma tensión. Los parámetros de crecimiento de las plantas fueron mayores con la composta orgánica incorporada al suelo y regadas a la tensión de 20 kPa.

El estrés hídrico al regar a 40 kPa afectó los componentes del rendimiento de las plantas evaluados en el estudio. La incorporación de la composta orgánica al suelo solo incrementó el peso de granos por mazorca y el peso seco de 100 semillas. El mayor peso seco de las mazorcas se obtuvo al regar a 20 kPa de tensión de humedad del suelo y 1 kg m^{-3} de composta incorporada al suelo. Sin embargo, al regar a la tensión de 40 kPa el peso seco de la mazorca es mayor en la concentración de la composta de 3 kg m^{-3} .

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Jiménez, Carlos Ernesto, Nandayapa Solís, Ferman Alberto, Zapata Hernández, Isidro, Galdámez Galdámez, José, Martínez Aguilar, Franklin B., & Vázquez Solís, Héctor. (2024). Uso de enmienda orgánica y microorganismos eficientes en chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.). *Siembra*, 11(1), 5875. <https://doi.org/10.29166/siembra.v11i1.5875>
- Alvarenga, P., Palma, P., Gonçalves, A. P., Fernandes, R. M., Cunha-Queda, A. C., Duarte, E., & Vallini, G. (2015). Organic residues as fertilizers: An issue of environmental concern. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(2), 2117–2132. <https://doi.org/10.3390/ijerph120202117>
- Ajayi, E. O., & Agbede, T. M. (2019). Organic amendments improve soil water retention and plant growth under drought stress. *Journal of Environmental Management*, 230, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.087>
- Bahadur, A., Singh, J. Optimización de la programación del riego por goteo basada en tensiómetros y su efecto sobre el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia del uso del agua en el tomate (*Solanum lycopersicum*). *Agric Res* 10, 675–681 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40003-020-00529-5>
- Baker, J. M. (2006). Tensiometers and water potential: Measurement techniques and implications for irrigation management. In R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of soil science* (2nd ed., pp. 1788–1790). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780849331353.ch290>
- Bernal, M. P., Albuquerque, J. A., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment: A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444–5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Rhoades, J. D. (1996). Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods* (pp. 417–435). Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
- Burt, C. M. (2004). Drip and micro irrigation design and management for trees, vines, and field crops. Irrigation Training and Research Center, Cal Poly San Luis Obispo.

- Chen, S., Huang, Q., & Chen, H. (2017). Effects of soil moisture on organic matter decomposition and nutrient release in compost-amended soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 110, 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.03.018>
- Cheng, M., Wang, H., Fan, J., Zhang, F., Wang, X. (2021). Effects of Soil Water Deficit at Different Growth Stages on Maize Growth, Yield, and Water Use Efficiency under Alternate Partial Root-Zone Irrigation. *Water*. 13, 148. <https://doi.org/10.3390/w13020148>
- Cooperband, L. R. (2002). *Building soil organic matter with compost: A guide to managing compost for soil improvement*. University of Wisconsin, Center for Integrated Agricultural Systems. <https://cias.wisc.edu/building-soil-organic-matter-with-compost/>
- Delgado-Arroyo, María del Mar, Mendoza López, Karla Luz, González, María Isabel, Tadeo Lluch, José Luis, & Martín Sánchez, José Valero. (2019). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COMPOSTAJE DE RESIDUOS AVÍCOLAS EMPLEANDO DIFERENTES MEZCLAS DE SUSTRATOS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 35(4), 965-977. Epub 22 de diciembre de 2020. <https://doi.org/10.20937/rica.2019.35.04.15>
- Díaz-Rodríguez, A., Martínez-Romero, A., & García-Alvarado, M. A. (2018). *Manual práctico para la elaboración de composta*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.chapingo.mx>
- Ding, J., Jiang, X., Ma, M., Zhou, B., Guan, D., Zhao, B., Li, J., et al. (2021). Soil organic carbon storage in cropland ecosystems of China: Patterns and controlling factors. *Soil and Tillage Research*, 207, 104861. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104861>
- Epelde, L., Jauregi, L., Urrea, J., Ibarretxe, L., Romo, J., Goikoetxea, I., & Garbisu, C. (2018). Characterization of Composted Organic Amendments for Agricultural Use. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2(July), 1-12.
- Epstein, E. (2011). *Industrial composting: Environmental engineering and facilities management*. CRC Press.
- Estrada Chavira, M. E. ., Hernández Velázquez , M. R. ., & Guerrero García, S. V. . (2024). Potencial de producción para Maíz Blanco (*Zea mays* l.) en México. *Semestre Económico*, 13(1), 32–42. <https://doi.org/10.26867/se.2024.v13i1.161>

- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212. <https://doi.org/10.1051/agro/2008021>
- Gao, Y., Zhang, X., & Sun, B. (2019). Soil moisture and temperature effects on organic matter mineralization and nutrient availability in amended soils. *Geoderma*, 337, 621–629. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.024>
- García-Gil, J. C., Plaza, C., Soler-Rovira, P., & Polo, A. (2004). Long-term effects of municipal solid waste compost application on soil enzyme activities and microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(2), 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2003.09.009>
- García-Lara, S., & Sena-Saldívar, J. O. (2019). Maize and human health. In A. M. Watson & C. P. Buiatti (Eds.), *Maize: Nutrition, processing and utilization* (pp. 1–22). AACC International Press. <https://doi.org/10.1094/9780913250914.001>
- González-Betancourt, M. L., Gallegos-Robles, M. Ángel, Sánchez-Chávez, E., Orona-Castillo, I., Espinosa-Palomeque, B. y López-Martínez, J. D. (2020). Estiércol bovino solarizado en la producción de tomate bajo condiciones de malla sombra. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(2), 253-262. 10.29312/remexca.v11i2.2299.
- Grossman, R. B., & Reinsch, T. G. (2002). Bulk density and linear extensibility. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of soil analysis: Part 4 Physical methods* (pp. 201–228). Soil Science Society of America.
- Hall, A. E. (2001). *Crop responses to environment*. CRC Press.
- Haman, D. Z. (2017). *Irrigation system design manual*. University of Florida Extension.
- Harris, R. F. (2003). Soil microbial communities and their roles in soil structure. *Advances in Agronomy*, 78, 41–82.
- Hillel, D. (2008). *Soil in the environment: Crucible of terrestrial life*. Academic Press.
- Hue, N. V., & Sobieszczyk, B. A. (2000). Nutritional value of some bio-waste materials. *Compost Science & Utilization*, 8(4), 340–347. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2000.10701792>

- Hussain, M., Farooq, M., Hasan, W., Ul-Allah, S., Tanveer, M., Ishfaq, M., & Nawaz, A. (2019). Drought stress in sunflower: Physiological effects and its management through breeding and agronomic alternatives. *Agricultural Water Management*, 218, 68–90.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.019>
- Imade, G., & Babalola, O. (2021). Global production and sustainability of maize: A review. *Journal of Agricultural Science*, 13(2), 56–68.
- INIFAP. (2022). Datos climáticos y edafológicos del sitio experimental. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://www.gob.mx/inifap>
- Irrrometer. (s.f.). Watermark soil moisture sensor. Irrrometer Company. <https://www.irrometer.com>
- Javier-López, L., Palacios-Torres, R. E., Ramírez-Seañez, A. R., Hernández-Hernández, H., Antonio-Luis, M. del C., Yam-Tzec, J. A. y Chaires-Grijalva, M. P. (2022). Producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) en lombricomposta con fertilización orgánica. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 9(3). 10.19136/era.a9n3.3348.
- Keller, J. (2006). Irrigation engineering. Utah State University Press.
- Khan, S., & Mohammadi, H. (2019). Tensiometric irrigation management under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 215, 32–40.
- Lal, R. (2006). Enhancing crop yields in the developing world through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. *Land Degradation & Development*, 17(2), 197–209.
- Lara-Reimers, EA, Gómez-Ugues DM, Uresti-Duran D, Encina-Domínguez JA, Peña-Ramos FM (2023). Estudio de plantas medicinales en la zona metropolitana de Saltillo, Coahuila, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 10(3): e3548. DOI:10.19136/era.a10n3.3548
- Lazcano, C. (2015). Compostaje y vermicompostaje: Implicaciones agroambientales. *Revista Iberoamericana de Ciencia y Tecnología*, 6(1), 25–39.
- Ledieu, J., De Ridder, P., De Clerck, P., & Dautrebande, S. (1986). A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *Journal of Hydrology*, 88(3–4), 319–328.

- Lince, L.A, Sadeghian, S. y Sarmiento, N. (2024). Evaluación de parámetros relacionados con el crecimiento de plantas de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta
- López, M., Hernández, T., & García, C. (2017). Influence of compost application on soil properties and maize growth under semiarid conditions. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(3), 692–702. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000300016>
- Meyer, W. S. (2006). Measurement of water availability. In D. L. Sparks (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (Vol. 1, pp. 541–558). ASA, SSSA.
- Mkhabela, M. S., & Warman, P. R. (2005). The influence of municipal solid waste compost on yield, soil phosphorus availability and uptake by two vegetable crops grown in a Pugwash sandy loam soil in Nova Scotia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106(1), 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.07.014>
- Molina, R. (2021). Situación actual del maíz en México: producción, consumo e importaciones. *Agrociencia*, 55(1), 101–113.
- Núñez, J. R., Rodríguez, M., & Alvarado, E. (2016). Manejo de la humedad del suelo con tensiómetros en cultivos de maíz. *Revista de Tecnología Agrícola*, 22(2), 44–53.
- Núñez, J. R., Alarcón, R., & Sandoval, L. (2023). Aplicación de composta en suelos degradados de zonas áridas. *Agro Productividad*, 16(1), 77–83.
- Otegui, M. E., Nicolini, M. G., Ruiz, R. A., & Dodds, P. A. (1995). Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*, 87(1), 29–33. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700010006x>
- O'Brien, D. M. (2011). *Drip irrigation for agriculture: Untapped potential for saving water and improving yields*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/3/i2214e/i2214e.pdf>
- Or, D. (2001). Soil water sensors for irrigation management. In G. J. Hoffman (Ed.), *Irrigation Management for Water Use Efficiency in Agriculture* (pp. 99–124). FAO.

- Pascual, J. A., Garcia, C., Hernández, T., & Moreno, J. L. (1997). Changes in the microbial activity of an arid soil amended with urban organic wastes. *Biology and Fertility of Soils*, 24(4), 429–434. <https://doi.org/10.1007/s003740050266>
- Rillig, M. C., & Mummey, D. L. (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist*, 171(1), 41–53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>
- Romero, C., García, M. T., & Martín, A. (2000). Compostas y fertilidad del suelo. *Edafología*, 7(2), 165–174.
- Sánchez-Monedero, M. A., Roig, A., Cegarra, J., & Bernal, M. P. (2004). Nitrogen transformation during organic waste composting by the Rutgers system and its effects on pH, C/N ratio and maturity. *Bioresource Technology*, 95(2), 181–187. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.02.012>
- Shock, C. C. (2004). Soil water tension measurement for irrigation scheduling. Oregon State University Extension Bulletin, EM8900.
- Song, X., Zhang, J., & Wang, Y. (2019). Water stress and plant yield: A meta-analysis. *Agricultural Water Management*, 213, 468–475.
- Topp, G. C. (2003). State of the art of measuring soil water content. *Hydrological Processes*, 17(14), 2993–2996.
- Vatta, M., Naidoo, D., & Botha, J. (2018). Precision irrigation using tensiometers in arid environments. *Water SA*, 44(4), 586–592.
- Zegelin, S. J., White, I., & Jenkins, D. R. (1987). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 23(4), 755–762.
- Zhang, H., Sun, Y., & Tang, Y. (2019). Effects of organic amendments on soil properties and crop growth: A review. *Agronomy*, 9(4), 194. <https://doi.org/10.3390/agronomy9040194>

Zhang, X., Shen, C., & He, X. (2016). Effects of drought stress on chlorophyll content and photosynthesis in maize (*Zea mays* L.). *Photosynthetica*, 54(4), 521–527.
<https://doi.org/10.1007/s11099-016-0236-5>