



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

**Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con seguimiento de la
humedad mediante sonda de capacitancia TDR**

**ORTIZ DIAZ VICTOR DIONICIO
INGENIERO AGRONOMO**

**ARMIJOS ROMERO BRYAN ANDRES
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

**Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con
seguimiento de la humedad mediante sonda de capacitancia TDR**

**ORTIZ DIAZ VICTOR DIONICIO
INGENIERO AGRONOMO**

**ARMIJOS ROMERO BRYAN ANDRES
INGENIERO AGRONOMO**

**MACHALA
2024**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con
seguimiento de la humedad mediante sonda de capacitancia TDR**

**ORTIZ DIAZ VICTOR DIONICIO
INGENIERO AGRONOMO**

**ARMIJOS ROMERO BRYAN ANDRES
INGENIERO AGRONOMO**

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

**MACHALA
2024**

Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con seguimiento de la humedad mediante sonda de capacitancia TDR

por Bryan Andres ARMIJOS ROMERO

Fecha de entrega: 10-ago-2024 06:46p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2430098287

Nombre del archivo:

Estimación_del_consumo_de_agua_en_cultivo_de_Maíz_con_seguimiento_de_la_humedad_mediante_sonda_de_capacitancia_TDR.pdf (4.6M)

Total de palabras: 15656

Total de caracteres: 90299

Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con seguimiento de la humedad mediante sonda de capacitancia TDR

INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

- 1 Jose Alfredo Torres Duque, Antonio Lenín Argudo Garzón. "Exploring the Transformative Impact of ICT Integration in the EFL Classroom", Religación, 2024
Publicación <1%
- 2 cienciasagricolas.inifap.gob.mx
Fuente de Internet <1%
- 3 repositorio.uan.edu.co
Fuente de Internet <1%
- 4 Stefania León-Parrales, Taryn Ghia, Jaime Salas, Andrea Narvaez. "Evaluación preliminar de la diversidad de escarabajos en un paisaje fragmentado del bosque seco tropical ecuatoriano", Revista Peruana de Biología, 2024
Publicación <1%
- 5 JADER RODRIGUEZ CORTINA.
"CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA <1%

INTENSIFICACION DEL PROCESO DE SECADO
DE TOMILLO (Thymus Vulgaris L.):
APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE
POTENCIA Y SECADO INTERMITENTE",
'Universitat Politecnica de Valencia', 2015

Fuente de Internet

6

aprendeonline.udea.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

7

dehesa.unex.es:8080

Fuente de Internet

<1 %

8

www.redalyc.org

Fuente de Internet

<1 %

9

www.withings.com

Fuente de Internet

<1 %

10

bioline.org.br

Fuente de Internet

<1 %

11

budzianowski.eu

Fuente de Internet

<1 %

12

conference.globallandscapesforum.org

Fuente de Internet

<1 %

13

dspace.utb.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

14

grupo-rama.es

Fuente de Internet

<1 %

15

iris.uniupo.it

Fuente de Internet

<1 %

16

redpav-fpolar.info.ve

Fuente de Internet

<1 %

17

repositorio.cinvestav.mx

Fuente de Internet

<1 %

18

www.revistabionatura.com

Fuente de Internet

<1 %

19

"Rotary-moulded biscuits : understanding the effect of sugar concentration and wheat bran enrichment on key quality attributes to develop healthier options", Pontificia Universidad Catolica de Chile, 2021

Publicación

<1 %

20

Ramón Tejada Oliveros. "Optimización de las propiedades de tenacidad e impacto de formulaciones de ácido poliláctico (PLA), mediante mezclas con polímeros flexibles y optimización de los sistemas de compatibilización", Universitat Politecnica de Valencia, 2023

Publicación

<1 %

21

findafacilitator.com

Fuente de Internet

<1 %

22

repositorio.continental.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

23	riubu.ubu.es Fuente de Internet	<1 %
24	ssbfnet.com Fuente de Internet	<1 %
25	tr-ex.me Fuente de Internet	<1 %
26	www.actaodontologica.com Fuente de Internet	<1 %
27	www.biouls.cl Fuente de Internet	<1 %
28	www.bivica.org Fuente de Internet	<1 %
29	www.colibri.udelar.edu.uy Fuente de Internet	<1 %
30	www.dafp.gov.co Fuente de Internet	<1 %
31	www.elpadul.es Fuente de Internet	<1 %
32	www.msn.com Fuente de Internet	<1 %
33	Diego Sebastiano Intrigliolo Molina. "Efectos del riego deficitario y de la carga de cosecha sobre las relaciones híbricas y la respuesta agronómica del ciruelo japonés cv. Black-	<1 %

Gold", Universitat Politecnica de Valencia, 2005

Publicación

34

dokumen.pub

Fuente de Internet

<1 %

35

ediciones.inca.edu.cu

Fuente de Internet

<1 %

36

icarito.tercera.cl

Fuente de Internet

<1 %

37

library.wmo.int

Fuente de Internet

<1 %

38

ojs.uv.es

Fuente de Internet

<1 %

39

ouci.dntb.gov.ua

Fuente de Internet

<1 %

40

patents.google.com

Fuente de Internet

<1 %

41

prezi.com

Fuente de Internet

<1 %

42

rds.org.hn

Fuente de Internet

<1 %

43

repositorio.unsm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

44

repository.unimilitar.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

45	www.alternativenews.org Fuente de Internet	<1 %
46	www.buenastareas.com Fuente de Internet	<1 %
47	www.cippecc.org Fuente de Internet	<1 %
48	www.cps.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
49	www.e3s-conferences.org Fuente de Internet	<1 %
50	www.fundacionaquae.org Fuente de Internet	<1 %
51	www.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
52	www.produce.org.mx Fuente de Internet	<1 %
53	www.redpav-fpolar.info.ve Fuente de Internet	<1 %
54	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
55	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
56	aefa-agronutrientes.org Fuente de Internet	<1 %

57

Eda Vasquez-Anaya, Lucero Mogrovejo-Torres, Vanessa Aliaga-Ahuanari, Ivan Iraola-Real. "Chapter 9 Comparative Study of Academic Performance in the 2018 PISA Test in Latin America", Springer Science and Business Media LLC, 2022

Publicación

<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias Apagado

Excluir bibliografía

Apagado

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, ORTIZ DIAZ VICTOR DIONICIO y ARMIJOS ROMERO BRYAN ANDRES, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Estimación del consumo de agua en cultivo de Maíz con seguimiento de la humedad mediante sonda de capacitancia TDR, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

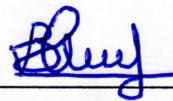
Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



ORTIZ DIAZ VICTOR DIONICIO

0706809068



ARMIJOS ROMERO BRYAN ANDRES

0707083564

DEDICATORIA

A mis queridos padres Julio Armijos y Elsi Romero por su amor incondicional y apoyo constante a lo largo de mi carrera, por sus innumerables sacrificios, por siempre creer en mí, agradecerles por enseñarme el valor del esfuerzo y perseverancia a cada paso que dé en mi vida, espero que esta meta cumplida los llene de orgullo y sea una pequeña retribución de todo lo que han hecho por mí, fueron mi pilar fundamental.

A mis hermanos Jimmy y Ariana quienes me guiaron y aconsejaron desde el primer día, motivándome a seguir y no rendirme con ningún obstáculo, por todos sus logros y dedicación fueron una gran fuente de inspiración para mí, gracias por su voz de aliento.

A mis amigos, gracias por estar presentes en los buenos y malos momentos, por su paciencia y comprensión durante este largo proceso. Su amistad y las anécdotas han sido un regalo invaluable en este viaje.

Bryan Andres Armijos Romero

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia, por su amor, comprensión y sacrificios constantes. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor fuente de inspiración y motivación. Sin su apoyo incondicional, este logro no habría sido posible.

Agradezco a mi asesor de tesis, Ing. Julio Chabla Carrillo, por haberme brindado su confianza y amistad, así como su orientación inquebrantable, sus valiosos consejos y su paciencia durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Extiendo mi más profundo agradecimiento a todos mis profesores de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. A lo largo de mi carrera, cada uno de ustedes ha dejado una huella significativa en mi formación académica y profesional. Gracias por compartir sus conocimientos, por su dedicación en la enseñanza, y por guiarnos con sabiduría en nuestro desarrollo como futuros profesionales.

Finalmente, mi más sincero agradecimiento a mis compañeros y amigos, quienes me brindaron su apoyo moral y su ayuda en los momentos difíciles. Sus palabras de ánimo y compañía fueron esenciales para superar los desafíos de este camino.

Bryan Andres Armijos Romero

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación está dedicado, en primer lugar, a Dios, por ser la guía espiritual y la fuerza que me ha sostenido en cada etapa de este camino académico. A mi familia, cuyo constante apoyo ha sido fundamental a lo largo de este proceso, y cuyo aliento ha sido una fuente inagotable de motivación para seguir esforzándome y cumplir cada uno de mis sueños.

En especial, dedico este trabajo a mi madre, Amabilia Diaz, quien siempre me ha alentado y guiado con su sabiduría y amor incondicional. Su ejemplo de perseverancia y fortaleza me ha inspirado a nunca rendirme, incluso en los momentos más difíciles.

También quiero reconocer a mis abuelos, Virgilio Ortiz y María Nieves. Su dedicación y esfuerzo han sido una luz que me ha guiado en la búsqueda de este título. Ellos me han demostrado que con sacrificio y esfuerzo, todo es posible, y su legado ha sido una inspiración constante

A mi padrastro, Gonzalo Herrera, extendiendo mi más profundo agradecimiento. Su presencia constante, su conocimiento y su apoyo incondicional han sido pilares fundamentales a lo largo de todo este proceso. Su compromiso y confianza en mí han sido un gran impulso para seguir adelante.

Finalmente, agradezco de corazón a mis compañeros y docentes. Sus enseñanzas y experiencias han sido invaluable durante este tiempo. La camaradería y el intercambio de conocimientos con mis compañeros han enriquecido mi formación, mientras que la dedicación de mis docentes ha sido clave para mi crecimiento académico y profesional. A todos ustedes, gracias por ser parte de esta travesía y por contribuir de manera significativa a la realización de este logro.

Víctor Dionicio Ortiz Diaz

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero agradecimiento a los tres tutores de esta tesis, quienes han sido pilares fundamentales a lo largo de toda mi formación académica. En especial, al Ingeniero Julio Chabla, cuya guía experta y constante respaldo han sido invaluable. Su dedicación, compromiso y paciencia han sido esenciales para el desarrollo y la calidad de esta investigación.

Extiendo también mi gratitud a todos los docentes que, a lo largo de esta carrera, han compartido generosamente sus conocimientos y experiencias. Cada uno de ellos ha dejado una huella imborrable en mi formación académica y profesional. Sus enseñanzas han sido fundamentales no solo para el logro de este objetivo, sino también para mi crecimiento personal y profesional. Agradezco especialmente su disposición para aclarar dudas, ofrecer orientación y fomentar un ambiente de aprendizaje enriquecedor.

A mis compañeros y amigos, quienes han sido una fuente constante de apoyo y colaboración a lo largo de esta travesía. Su compañía y el esfuerzo compartido han hecho de este camino una experiencia verdaderamente enriquecedora y gratificante. Los momentos de estudio conjunto, las discusiones académicas y los momentos de esparcimiento han sido invaluable para mantener la motivación y el ánimo en alto.

Víctor Dionicio Ortiz Díaz

Resumen

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, esencial tanto para la alimentación humana como animal. La gestión adecuada del agua es crucial para su crecimiento óptimo y rendimiento máximo. Este estudio se centra en estimar el consumo de agua del maíz mediante el uso de sondas de capacitancia TDR y el software CROPWAT, con el objetivo de mejorar la eficiencia del riego en la agricultura de precisión. La investigación se llevó a cabo en la granja experimental "Santa Inés" de la Universidad Técnica de Machala. Se empleó un diseño experimental completamente al azar con cuatro tratamientos de lámina de riego diferentes, utilizando sondas TDR para medir el contenido de humedad del suelo y CROPWAT para calcular las necesidades hídricas del cultivo.

Los objetivos fueron calcular el consumo de agua en el periodo vegetativo del cultivo de maíz, estimar la evapotranspiración potencial del cultivo utilizando CROPWAT y evaluar el consumo y disponibilidad de agua en tiempo real mediante sondas TDR. Los tratamientos con mayores láminas de agua mostraron un mayor consumo y retención de agua en el suelo, lo que se tradujo en un mejor rendimiento del cultivo. Por otro lado, los tratamientos con menor cantidad de agua incentivaron un mayor desarrollo radicular en búsqueda de agua profunda. La tecnología de sondas TDR y el software CROPWAT demostraron ser herramientas efectivas para la gestión eficiente del riego. La investigación subraya la importancia de aplicar estrategias de riego basadas en las necesidades específicas del cultivo de maíz y las condiciones edafoclimáticas locales.

Palabras claves: Evapotranspiración, CROPWAT, riego, sondas TDR, humedad del suelo,

Abstract

Maize is one of the most important crops worldwide, essential for both human and animal consumption. Proper water management is crucial for its optimal growth and maximum yield. This study focuses on estimating maize water consumption using TDR capacitance probes and CROPWAT software, with the aim of improving irrigation efficiency in precision agriculture. The research was conducted at the "Santa Inés" experimental farm of the Technical University of Machala. A completely randomized experimental design was employed with four different irrigation treatments, using TDR probes to measure soil moisture content and CROPWAT to calculate the crop's water requirements.

The objectives were to calculate water consumption during the vegetative period of the maize crop, estimate the potential evapotranspiration of the crop using CROPWAT, and evaluate real-time water consumption and availability through TDR probes. Treatments with higher water levels showed greater water consumption and retention in the soil, which translated into better crop yield. On the other hand, treatments with lower water levels encouraged greater root development in search of deeper water. TDR probe technology and CROPWAT software proved to be effective tools for efficient irrigation management. The research highlights the importance of implementing irrigation strategies based on the specific needs of the maize crop and local edaphoclimatic conditions.

Keywords: Evapotranspiration, CROPWAT, irrigation, TDR probes, soil moisture.

Índice

I. INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Objetivos	7
1.1.1 Objetivo general	7
1.1.2 Objetivos específicos.....	7
II MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. Importancia del maíz en la agricultura	8
2.2 Cultivo de maíz en el ecuador	8
2.3 Clasificación taxonómica	8
2.4 Requerimientos edafoclimáticos	9
2.5 El suelo y su capacidad de retención	10
2.5.1 La textura del suelo.	10
2.5.2 Retención de agua.....	11
2.6 Necesidades hídricas del cultivo	12
2.6.1 Coeficiente del cultivo	12
2.6.2 La evapotranspiración potencial del cultivo (ETc).....	12
2.7. Contenido de humedad en el suelo	13
2.7.1 Capacidad de campo	14
2.7.2 Punto de marchitez permanente.....	14
2.7.3 Balance hídrico.....	14
2.8 Técnicas de monitoreo de humedad del suelo	15
2.8.1 Método gravimétrico	15
2.8.2 Sensores de Humedad de Suelo Basados en Capacitancia	16
2.8.3 Sensores de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)	16
2.8.4 Sondas de detección de neutrones de rayos cósmicos.....	17
2.8.5 Sonda de reflectometría de dominio temporal (TDR)	18
2.9 Modelos de simulación y software	19
2.9.1 Modelos de simulación	20
2.9.2 Software Cropwat de la FAO.....	20
III- MATERIALES Y MÉTODOS.....	21
3.1 Localización del área de estudio.....	21
3.1.1 Ubicación geográfica y caracterización de la zona de estudio	21
3.1.2 Mapa de ubicación del área experimental	21
3.2 Materiales y equipos	22
3.3 Diseño Experimental	22

3.4 Croquis del experimento	23
3.5 Preparación de terreno	23
3.5.1 Limpieza del área	23
3.5.2 Desinfección del área	24
3.5.3 Preparación de camas	25
3.6 Instalación del sistema de riego por goteo.....	25
3.7 Propiedades físicas y químicas del área	28
3.7.1 Densidad aparente	28
3.7.2 Densidad real	28
3.7.3 Porosidad	28
3.7.4 Textura	29
3.8 Toma de datos en el tanque evaporímetro	29
3.9 Calculo de la lámina de agua.....	29
3.10 Calculo de la lámina con el software CROPWAT	31
3.11 Uso de la sonda de capacitancia TDR	33
3.13 Variables de estudio	33
3.13.1 Variables independientes	34
3.13.2 Variables dependientes	34
IV RESULTADOS Y DISCUSION	37
4.2 Análisis Descriptivo del contenido de humedad por tratamiento	38
4.3 Análisis Descriptivo de los milímetros de agua por tratamiento (mm).....	40
4.4 Análisis Descriptivo de la longitud de raíces por tratamiento	41
4.5 Análisis Descriptivo del diámetro de mazorca por tratamiento.....	43
4.6 Análisis Descriptivo del Peso de Mazorca por Tratamiento	45
4.7 Análisis Descriptivo del número de granos por tratamiento	46
4.8 Análisis Descriptivo de altura de la planta por tratamiento	47
4.9 Correlación múltiple.....	48
4.10 Análisis de varianza	49
4.11 Consumo de agua.....	52
V. CONCLUSIONES	54
VI. RECOMENDACIONES.....	55
VII. BIBLIOGRAFÍA	56
VIII. ANEXOS.....	60

Índice de figuras

Figura 1. Relaciones entre los tipos de suelo, la capacidad de	14
Figura 2. Entradas y salidas de agua del sistema.....	15
Figura 3. Tipos de sondas FDR. (X): placas planas,	17
Figura 4. Mapa de ubicación.....	22
Figura 5. Croquis del experimento.....	23
Figura 6. Preparación del terreno, roturación y nivelación.....	24
Figura 7. Formación de camas.	25
Figura 8. Instalación de laterales del riego por goteo.....	26
Figura 9. Instalación de los goteros.....	27
Figura 10. Aforo del riego por goteo.....	28
Figura 11. Datos climatológicos en el software CROPWAT	31
Figura 12. Datos del suelo en el software CROPWAT	31
Figura 13. Datos del cultivo en el software CROPWAT	32
Figura 14. Requerimientos del cultivo en el software CROPWAT	32
Figura 15. Uso de la sonda TDR, antes de la siembra.	33
Figura 16. Altura de planta.....	34
Figura 17. Peso de mazorca	35
Figura 18. Longitud de raíces	35
Figura 19. Diámetro de mazorca.....	36
Figura 20. Longitud de mazorca	36
Figura 21. Número de granos.....	37
Figura 22. Distribución de la lámina de agua aplicada en diferentes fases vegetativas por tratamiento	38
Figura 23. Distribución del Porcentaje de Humedad en Diferentes Fases Vegetativas	39
Figura 24. Contenido de humedad en los tratamientos.....	40
Figura 25. Distribución de los milímetros de agua consumidos en diferentes fases vegetativas	41
Figura 26. Distribución de longitud de raíces	42
Figura 27. Distribución del diámetro de mazorca	43
Figura 28. Distribución de la longitud de mazorca	44
Figura 29. Distribución del peso de mazorca	45
Figura 30. Distribución del número de granos por tratamiento.	46
Figura 31. Distribución de la altura de planta por tratamiento	47
Figura 32. Correlación múltiple entre variables	48
Figura 33. Contenido de humedad en los tratamientos.....	52
Figura 34. Lámina de agua aplicada y consumo de agua en los tratamientos.....	53

Índice de tablas

Tabla 1 . Características taxonómicas del maíz.	9
Tabla 2. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo de maíz.	9
Tabla 3. Coeficiente del cultivo de maíz en las etapas de crecimiento.	12
Tabla 4. Descripción de los tratamientos.	23
Tabla 5. Descripción de las variables, unidades e instrumentos empleados en las mediciones.	33
Tabla 6. Estadísticas descriptivas de la lámina de agua por tratamiento en diferentes fases vegetativas	37
Tabla 7. Estadísticas descriptivas por tratamiento del contenido de Humedad.	38
Tabla 8. Estadísticas descriptivas por tratamiento con milímetros de agua consumidos.	40
Tabla 9. Estadísticas descriptivas por tratamiento con longitudes de raíces.	42
Tabla 10. estadísticas descriptivas por tratamiento del diámetro de mazorca.	43
Tabla 11. Estadísticas descriptivas por tratamiento de longitud de mazorca.	44
Tabla 12. estadísticas descriptivas por tratamiento del peso de mazorca.	45
Tabla 13. Estadísticas descriptivas por tratamiento del número de granos.	46
Tabla 14. Estadísticas descriptivas de las alturas de plantas en 4 tratamientos.	47
Tabla 15. Análisis de varianza entre tratamientos.	49
Tabla 16. Milímetros de agua consumida en cada fase vegetativa.	52
Tabla 17. Comparación entre la lámina aplicada y el agua consumida por tratamiento.	52

I. INTRODUCCIÓN

El maíz es un cereal de alta relevancia a escala global, perteneciente al grupo botánico de las gramíneas, es cultivado ampliamente en un total de más de 70 países, lo que refleja su increíble diversidad genética, es decir, las variaciones inherentes en la herencia, diferencias entre los individuos de una población y entre los distintos grupos dentro de la especie maíz (Pérez, et al., 2019)

Para implementar eficazmente las prácticas de agricultura de precisión, es esencial utilizar técnicas que permitan medir en tiempo real los cambios en los niveles de agua del suelo, tanto en diversas regiones como en diferentes épocas del año. La cantidad de agua presente en el suelo está influenciada por una variedad de factores críticos, entre los cuales se encuentran la topografía del terreno, el tamaño y la textura de las partículas del suelo, el contenido de arcilla y el porcentaje de materia orgánica (Guaman, 2022).

Además de los métodos indirectos utilizados en campo para medir el contenido de agua en el suelo, destacan las sondas de neutrones y otras, basadas en la medición de la constante dieléctrica del suelo como por ejemplo las sondas de capacitación TDR y FDR. La sonda de neutrones es considerada una técnica de medición de confianza, sin embargo, tiene una desventaja importante que consiste en la necesidad de una calibración individualizada para cada terreno, y también en el manejo de fuentes de radiación (Guaman, 2022).

En un estudio realizado por Salgado (2007) se aplicaron cinco tratamientos junto con el testigo. El tratamiento V presentó el valor más alto de lámina de agua con un kc de 1.15, mientras que el testigo mostró el valor más bajo. Por otro lado, la mayor producción la obtuvo el tratamiento IV, con un kc: 1.0 siendo estadísticamente igual al tratamiento III. El testigo registró la menor producción en comparación con los otros tratamientos.

Según Atanacio (2022), en un estudio realizado en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, se evaluó el rendimiento de sondas electromagnéticas TDR para medir el contenido de agua en diversos sustratos. Se analizaron tres tipos de sondas: la sonda portátil Campbell TDR con varillas de 12 y 20 cm de longitud, y la TDR300 Fieldscout. Los resultados indicaron que la sonda portátil Campbell de 12 cm ofreció el mejor rendimiento, ya que la ecuación lineal generada mostró un alto coeficiente de determinación y una baja dispersión de los datos. En contraste, la sonda TDR300 Fieldscout presentó una alta dispersión de datos y un

bajo coeficiente de determinación, lo que la hace menos recomendable para la medición del contenido de agua en sustratos.

El maíz es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial, siendo esencial tanto para la alimentación humana como animal. La gestión adecuada del agua es crucial para asegurar un crecimiento óptimo del maíz y maximizar el rendimiento de los cultivos. Sin embargo, estimar el consumo de agua de manera precisa y eficiente representa un desafío significativo para los agricultores.

El manejo eficiente del agua es esencial para el cultivo de maíz, ya que influye directamente en su rendimiento y en la sostenibilidad de la agricultura. Abordar la problemática de la estimación ineficiente del consumo de agua en el cultivo de maíz requiere un enfoque integral que combine tecnología avanzada, capacitación y estrategias de manejo adecuadas.

La tecnología de la sonda de capacitancia TDR permite a los agricultores medir el contenido de agua del suelo, lo que les ayuda a estimar la demanda de agua de sus cultivos y ajustar de manera eficiente el riego. Sin embargo, la precisión y la fiabilidad de estas estimaciones pueden verse afectadas por diversos factores si no se controlan a tiempo.

Este estudio busca estimar el consumo de agua en el cultivo de maíz mediante la sonda de capacitancia TDR. Estas sondas funcionan midiendo el tiempo que tarda una señal electromagnética en viajar a través del suelo y regresar a la sonda. El principio del método se fundamenta en la determinación de la velocidad de propagación de una onda electromagnética en un suelo. La medida de la constante dieléctrica del suelo depende de la frecuencia de emisión de la señal electromagnética.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Calcular el consumo de agua en el periodo vegetativo en el cultivo de maíz y estimar la variación del contenido de agua en el perfil del suelo mediante un balance hídrico con el uso de la sonda TDR.

1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Estimar la evapotranspiración potencial del cultivo de maíz (ETc), utilizando el software CROPWAT de la FAO
- ✓ Estimar el consumo de agua en el cultivo de maíz con seguimiento de la humedad mediante la sonda de capacitancia TDR.
- ✓ Evaluar el consumo y disponibilidad de agua para el cultivo de maíz de maíz basado en el seguimiento en tiempo real el contenido volumétrico, mediante el uso de la sonda de capacitancia TDR.

II MARCO TEÓRICO

2.1. Importancia del maíz en la agricultura

La producción de maíz en Ecuador contribuye con un notable 4,4% al Producto Interno Bruto (PIB) agrícola del país y representa una fuente fundamental de ingresos para más de 180 000 personas. La mayoría de estos productores son pequeños agricultores con menos de 10 hectáreas, mientras que los medianos, que poseen entre 10 y 20 hectáreas, representan el 6,3%, y solo el 0,5% son grandes agricultores con más de 20 hectáreas (FAO, 2022).

De acuerdo con la FAO (2022), la cosecha abarca 362.473 hectáreas, con un rendimiento promedio de 4,52 toneladas por hectárea, alcanzando una producción total de 1.641.131 toneladas. Estos datos destacan la importancia del maíz en el país, cuya producción se utiliza principalmente para la alimentación humana y animal.

2.2 Producción de maíz en el Ecuador

En Ecuador, el cultivo de maíz tiene una mayor presencia en las provincias de Los Ríos, Manabí y Guayas, cosechando un promedio de 5.5 t/ha (Vásconez, et al., 2021). La producción de esta semilla es cada vez mayor debido a las semillas híbridas, las cuales son conocidas por sus altos rendimientos que permiten recoger más producto de una superficie de terreno determinada (Marín, et al., 2020).

La mayoría de los agricultores ecuatorianos han optado por cultivar variedades de maíz certificadas por Agrocalidad e INIAP debido a que ofrecen mejores resultados en comparación con las variedades tradicionales. Específicamente estos híbridos han sido diseñados para ser accesibles para pequeños agricultores que generalmente carecen de información sobre el cultivo, falta de tecnología, asesoramiento técnico en manejo de plagas y requerimientos nutricionales del cultivo (Guamán, et al., 2020).

2.3 Clasificación taxonómica

La taxonomía del maíz se describe de la siguiente manera (Ruiz et al., 2020).

Tabla 1. Características taxonómicas del maíz.

Clasificación taxonómica	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Cyperales
Familia	Poaceae
Genero	Zea
Especie	mays
Nombre científico	Zea mays

Respecto a su morfología, el maíz es una planta de gran envergadura con un sistema de raíces fibrosas y un tallo que soporta un denso follaje, alcanzando hasta 30 hojas en total. Generalmente, una o dos yemas laterales se desarrollan en la axila de las hojas en la mitad superior de la planta, formando la inflorescencia femenina que da lugar a las mazorcas. En la parte superior de la planta se encuentra la inflorescencia masculina, conocida como panoja (Roca, 2019).

2.4 Requerimientos edafoclimáticos

Comprender las necesidades particulares de suelo y clima que presentan los diferentes cultivos es importante para establecer sistemas de producción agrícola exitosos. Esto implica utilizar y manejar adecuadamente los recursos del suelo y el clima, con el fin de maximizar la producción agrícola, considerando los requerimientos edáficos, climáticos y nutricionales de cada cultivo (Guaña, 2019).

Tabla 2. Requerimientos edafoclimáticos del cultivo de maíz.

Cultivo	Textura	N	P	K	pH	Pp (mm)	Temp (°C)	Pendiente	Altitud (msnm)
Maíz	Franco	150 a	200 a	150 a	5.5	600 a	18 a	20 %	5 a 3000
	Arcilloso	200	250	200	a	1400	30		
	Franco arenoso	kg/ha	kg/ha	kg/ha	7.5				

Fuente: (Zambrano et al., 2021).

2.4.1 Temperatura

El maíz es una planta de clima tropical, pero su potencial de rendimiento es bajo en los ambientes tropicales típicos, debido a las altas temperaturas en el día y en la noche. La temperatura ideal para la germinación se sitúa entre 18 y 20 °C. Si la germinación de las semillas se retrasa, pueden pudrirse, lo que resulta en una disminución de la población de plantas. (Álvarez & Borja, 2022).

Durante la fase de crecimiento, la temperatura óptima oscila entre 24 y 30 °C. Las temperaturas superiores a los 30 °C pueden afectar la actividad celular, reduciendo la capacidad de las raíces para absorber agua. Además, las noches cálidas son desfavorables para el maíz, ya que la respiración es muy intensa y la planta consume importantes reservas de energía acumuladas durante la fotosíntesis diurna. (Ruiz et al., 2020).

2.4.2 Suelo

El maíz se adapta a diversos tipos de suelos donde puede producir buenas cosechas y de alta calidad, si se emplean los cultivares adecuados y técnicas de cultivo apropiadas. Generalmente los suelos más idóneos para el cultivo del maíz son los de textura media (francos), fértiles, bien drenados, profundos y con una alta capacidad de retención de agua (Deras, 2020).

El laboreo del suelo es una práctica mecanizada utilizada en la agricultura para preparar la superficie terrestre con el fin de facilitar las diferentes labores agrícolas que benefician el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Una labranza adecuada mejora la productividad de los cultivos y debe preservar la fertilidad del suelo, manteniendo los niveles de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, la capacidad de intercambio catiónico y la estructura del suelo. Sin embargo, el uso intensivo e inadecuado de equipos de labranza puede resultar en la degradación del suelo. (Kirkegaard et al., 2020).

2.5 El suelo y su capacidad de retención

2.5.1 La textura del suelo.

La textura del suelo es una característica crucial que afecta varios aspectos de su calidad. Se define por el porcentaje de arena, limo y arcilla presentes. Las partículas de arena son relativamente grandes, las partículas de arcilla son mucho más pequeñas en comparación con las de arena, y las partículas de limo tienen un tamaño intermedio entre ambas. (Stivers, 2023).

Las partículas de arcilla y limo son más efectivas en retener agua y nutrientes para las plantas en comparación con las partículas de arena. Sin embargo, los suelos con un alto contenido de arcilla y limo tienden a compactarse más fácilmente cuando se trabajan y cultivan. Esta compactación del suelo puede dificultar el crecimiento y la expansión de las raíces de las plantas (Stivers, 2023).

Los suelos con textura arcillosa pueden ser difíciles de manejar, ya que la arcilla tiende a volverse densa y pegajosa cuando está húmeda. Estos suelos tienen una mayor capacidad para retener agua y nutrientes debido a su microporosidad y elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC), lo que les permite retener iones positivos como potasio, sodio y calcio.

En contraste con los suelos arcillosos, los que son de textura arenosa poseen baja plasticidad y son fáciles de trabajar. Las partículas de gran tamaño que componen el suelo arenoso contribuyen a una excelente aireación, proporcionando así un suelo con un alto porcentaje de poros (Gisbert et al., 2019).

A pesar de su excepcional aireación y baja probabilidad de encharcamiento o escorrentía, un suelo arenoso puede experimentar estos fenómenos durante tormentas intensivas de lluvia en las que la erosión laminar se vuelve un factor significativo. La escasa acumulación de materia orgánica y la elevada lixiviación de minerales provocan un desplazamiento de nutrientes (Gisbert et al., 2019).

La ausencia de partículas coloidales en los suelos limosos dificulta la formación de estructuras internas, lo que los hace propensos a aglomerarse y compactarse. Esto impide una adecuada aireación y circulación del agua en el suelo, lo que puede afectar negativamente tanto al crecimiento de las plantas como a la conservación del suelo (Gisbert et al., 2019).

2.5.2 Retención de agua

La retención de humedad en el suelo se refiere a la relación entre el contenido de agua y su potencial matricial, indicando la capacidad del suelo para retener agua en función de la succión. Esta relación está influenciada por la textura del suelo y la cantidad de poros que pueden contener aire y agua (Bejar et al., 2020).

Los suelos arenosos poseen menor capacidad de retención de agua en comparación con los suelos limosos y arcillosos cuyas propiedades les permiten almacenar mayores cantidades de agua, resultando en una capacidad de retención alta (Stivers, 2023).

Los cultivos plantados en suelos arenosos requieren una irrigación más frecuente, pero con menos agua, ya que estos suelos tienen una capacidad de retención inferior a la de los suelos arcillosos o limosos. Por otro lado, los suelos arcillosos o limosos tienen una mayor capacidad de retención de agua, lo que reduce la necesidad de riego frecuente. En contraste, los suelos compactos presentan una baja capacidad de retención de agua debido a su estructura, que disminuye los espacios porosos disponibles para almacenar agua y aire (Stivers, 2023).

2.6 Necesidades hídricas del cultivo

La evapotranspiración es un proceso integral en el ciclo del agua, donde se refiere a la transferencia de agua de los suelos y plantas a la atmósfera, mediante la evaporación y la transpiración. La evapotranspiración es un fenómeno que combina las demandas de la atmósfera y las condiciones de la superficie terrestre, es un factor clave en la determinación de la sequía en regiones con escasa precipitación (Monterroso & Gómez, 2021).

La demanda de agua de los cultivos se calcula generalmente en función de la evapotranspiración potencial, que es la cantidad de agua que una superficie de suelo cubierto con pasto o alfalfa puede evaporar o transpirar. La humedad disponible en esta superficie debe ser abundante y no presentar ningún problema de deficiencias nutrimentales, daños causados por plagas o enfermedades para asegurar una estimación precisa de la demanda de agua de los cultivos (Monterroso & Gómez, 2021).

2.6.1 Coeficiente del cultivo

El coeficiente del cultivo es un indicador de la capacidad con la que una planta extrae agua del suelo a lo largo de su periodo vegetativo, que comprende desde la siembra hasta la cosecha. Este coeficiente puede variar dependiendo de las características de la planta y las distintas fases del periodo vegetativo (Valdivieso, 2013).

Diversas fuentes técnicas reportan valores distintos del coeficiente de cultivo (K_c) para cada una de las etapas del crecimiento de un cultivo.

Tabla 3. Coeficiente del cultivo de maíz en las etapas de crecimiento.

Etapas inicial	Etapas de desarrollo	Etapas intermedia	Etapas final
0.50	0.70	1.05	0.80

(Valdivieso, 2013)

2.6.2 La evapotranspiración potencial del cultivo (ETc)

El consumo de agua es el resultado de la suma de los procesos de transferencia de agua desde la superficie del cultivo hacia la atmósfera, por un lado, se encuentra la evaporación directa que ocurre en la superficie del suelo y por otro la transpiración que es el proceso mediante el cual las plantas devuelven el agua al entorno a través de sus tejidos (Andrade, et al., 2023).

El consumo de agua varía de acuerdo al equilibrio entre la demanda evaporativa del medio ambiente, las características de las plantas relacionadas principalmente con su cobertura y la cantidad de agua disponible en el suelo (Andrade, et al., 2023).

En condiciones óptimas de riego y nutrición el cultivo de maíz ha demostrado un rango de evapotranspiración de 450 y 900 mm durante todo su periodo de crecimiento (Curín, et al., 2021). Este amplio rango es directamente atribuible a la gran diversidad de ambientes en los que el cultivo de maíz se encuentra presente, siendo clave para la oferta y la demanda hídrica. En consecuencia, la demanda evaporativa del ambiente constituye una combinación de los efectos de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento. (Andrade, et al., 2023).

El principal obstáculo para lograr una producción abundante de maíz en regiones tropicales se encuentra en la deficiente disponibilidad de agua. Durante la fase inicial de establecimiento del cultivo, si se presenta sequía o escasez de agua en el entorno (15 y 30 días), puede provocar la pérdida de plantas que aún están en su etapa de crecimiento, lo cual puede significar una reducción en el rendimiento o productividad del cultivo (Deras, 2020).

El requerimiento de agua del cultivo del maíz es de 500 a 700 mm, los cuales deben suministrarse de forma adecuada y regular a lo largo de las distintas fases fenológicas, siendo las fases de floración y llenado de grano las más críticas. Las variaciones en la intensidad, duración y distribución de las precipitaciones pueden provocar alteraciones fisiológicas en las plantas, lo que hace necesario aplicar el riego, para suplir estas necesidades (Cartagena et al., 2021).

2.7. Contenido de humedad en el suelo

El contenido de humedad del suelo, así como los valores específicos para la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, se pueden determinar utilizando el método gravimétrico y sensores TDR y FDR. Estos parámetros son esenciales para establecer un régimen de riego adecuado durante el periodo de crecimiento vegetativo (Valdivieso, 2013).

2.7.1 Capacidad de campo

Corresponde al agua existente en un suelo después de una lluvia o irrigación y luego este exceso se ha drenado, siendo los microporos quienes retienen agua. La capacidad de campo varía según el tipo de suelo, para suelos arenosos 1/10 atm, suelos francos 1/3 atm y suelos arcillosos 1/2 atm (Valdivieso, 2013).

2.7.2 Punto de marchitez permanente

Es el punto mínimo de humedad que puede ser usada por las plantas. Dicha cantidad se mide en una muestra de suelo sometida a 15 atmósferas de presión, esta cantidad se expresa en porcentaje en base al peso seco del suelo

(Valdivieso, 2013).

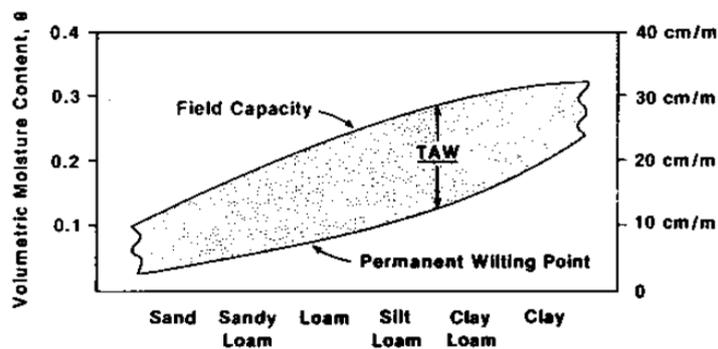


Figura 1. Relaciones entre los tipos de suelo, la capacidad de campo y punto de marchitez (FAO, 1987).

2.7.3 Balance hídrico

Es una representación que muestra cómo el agua se mueve entre las plantas, el suelo y la atmósfera durante un período específico. Los intercambios son fáciles de replicar y podrían aplicarse a una gran variedad de factores climáticos, edáficos y de cultivos mediante simulaciones (Zelaya & Rodríguez, 2021).

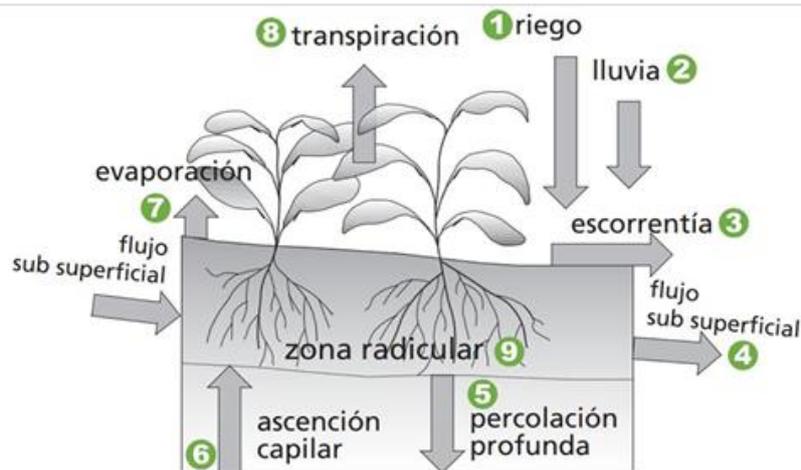


Figura 2. Entradas y salidas de agua del sistema

El balance hídrico se realiza a partir de datos trascendentales que suponen una fecha de siembra convencional y un suelo con propiedades hídricas especificadas por el investigador incluyendo densidad, capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Zambrano, et al., 2021),

Por otro lado, ofrece un marco referencial para modelar y comprender los impactos de los factores relacionados con el agua en una región específica, incluyendo variaciones climáticas tales como precipitación o evapotranspiración, cambios en el uso del suelo, eficiencia del riego y regulación hidrológica de la cuenca (Zambrano, et al., 2021),

Para aprovechar los recursos hídricos de una zona de forma eficiente, es necesario determinar qué balance hídrico se encuentra presente en los suelos de la zona en cada época del año. Este conocimiento ayuda a determinar el mejor momento de siembra y cultivo de las plantas, así como los mecanismos necesarios para aprovechar al máximo las cantidades de agua durante los periodos de escasez (Zambrano, et al., 2021),

2.8 Técnicas de monitoreo de humedad del suelo

2.8.1 Método gravimétrico

El método gravimétrico es una técnica directa para medir la humedad del suelo. Este método consiste en recolectar una muestra de suelo, determinar su peso antes y después del secado, y calcular el contenido de humedad a partir de estas mediciones (Arango, 2020), Por otro lado, con esta técnica no es posible obtener una lectura continua de valores de humedad del suelo de un espacio determinado, siendo imprescindible extraer muestras del suelo para su análisis en laboratorio (Mamani & Paz, 2022).

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} \times 100$$

2.8.2 Sensores de Humedad de Suelo Basados en Capacitancia

Los sensores capacitivos funcionan a través de un circuito eléctrico que permite medir cambios en la capacitancia C del medio debido a cambios en la permitividad relativa. Esta capacitancia se puede representar mediante la siguiente ecuación (Palomino, 2021):

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 G$$

Donde:

- G es un factor geométrico constante.
- ϵ_r es un factor adimensional que describe como un material afecta campo eléctrico en comparación con el vacío.
- ϵ_0 es una constante física que describe la capacidad del vacío para permitir el paso de un campo eléctrico.

Los sensores capacitivos usan la permitividad relativa para estimar el contenido de agua en suelo, gracias al alto valor de esta magnitud en el agua. Una limitación clave de los sensores capacitivos es su baja precisión, dado que por lo general opera a frecuencias bajas (≤ 100 MHz) hace que la parte imaginaria de ϵ_r alcance valores considerables (Diego et al., 2022).

Además, la variación de la permitividad relativa para distintos tipos de suelo y los efectos de la temperatura, salinidad y compactación del suelo en el agua hacen que sea necesaria la calibración específica de estos sensores en cada tipo de suelo, para garantizar que las mediciones sean lo más precisas posibles (Diego et al., 2022).

La constante dieléctrica de en agua $\epsilon = 79.99$, a presión $P = 1 \text{ atm}$ y una temperatura de $T = 293.15 \text{ K}$, mientras que en el aire es de 1.00

2.8.3 Sensores de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)

Este método se basa en la propiedad de la permitividad dieléctrica del suelo, la cual está relacionada con la cantidad de agua presente en el perfil del suelo. La permitividad dieléctrica se refiere a la capacidad de un material para retener cargas eléctricas. Por lo tanto, cuanto mayor sea la constante dieléctrica, mejor será la capacidad del material para funcionar como un capacitor y, en consecuencia, podrá almacenar más cargas eléctricas (Abanto et al., 2020).

Los sensores FDR realizan un barrido de frecuencias dentro de un rango específico para obtener la frecuencia de resonancia, la cual se relaciona con el contenido de humedad del suelo (CHS). Estos sensores operan a frecuencias entre 10 y 150 MHz, y utilizando frecuencias de 500 MHz, es posible determinar tanto la salinidad del suelo como su humedad, gracias a su capacidad para medir las propiedades dieléctricas del suelo. Las sondas de estos dispositivos suelen presentarse en tres formas diferentes: placas planas, barras cilíndricas y anillos metálicos que rodean un cilindro (Caicedo et al., 2021).

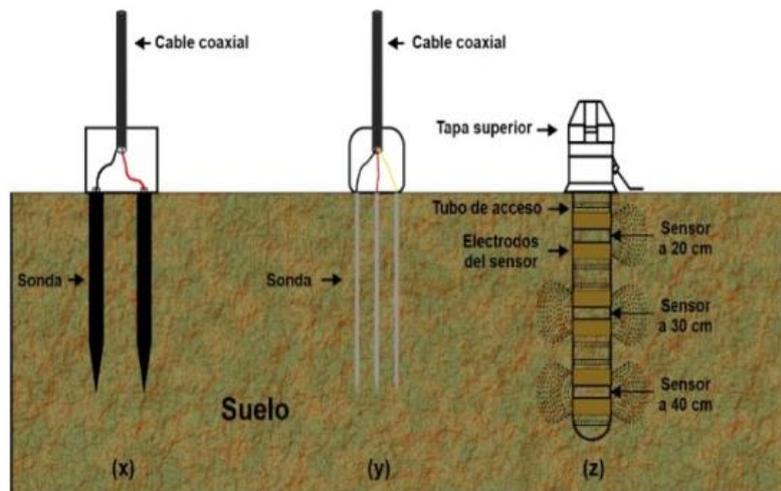


Figura 3. Tipos de sondas FDR. (X): placas planas, (y): barras cilíndricas, (z): anillos metálicos alrededor de un cilindro. (Caicedo et al., 2021)

2.8.4 Sondas de detección de neutrones de rayos cósmicos

Las sondas de detección de neutrones de rayos cósmicos (CRNS) se a presentado como una alternativa para la medición de la cantidad de agua en el suelo en profundidades de hasta 80 cm, con un alcance que puede variar entre 130 y 240 metros a nivel del mar (Dazhi, et al., 2019).

El origen de la radiación cósmica proviene de fuentes extrasolares y penetra la atmosfera terrestre, esta interacción crea neutrones con alta energía que chocan con átomos en

el aire, el suelo y la vegetación produciendo neutrones con una energía media (Dazhi, et al., 2019).

La sonda CRNS ofrece la ventaja de poder determinar el estado de humedad del suelo en áreas más extensas y en capas de suelo más profundas de manera no invasiva. Además, su uso implica menores costos de mantenimiento y es más económico en comparación con los sensores tradicionales (Dazhi, et al., 2019).

2.8.5 Sonda de reflectometría de dominio temporal (TDR)

El método TDR (Reflectometría en el Dominio del Tiempo) se basa fundamentalmente en medir la velocidad de transmisión de una onda a través de una línea de transmisión. La señal TDR se registra a la salida de un generador de impulsos y refleja la suma de las tensiones incidentes y reflejadas. La amplitud de esta señal varía con el tiempo, ya que la onda encuentra diferentes discontinuidades de impedancia a medida que se propaga por el medio, lo que provoca que una parte de la energía se refleje hacia el generador (Guaman, 2022).

Estos instrumentos utilizan la reflectometría para analizar el sistema aire-agua-suelo en relación con el tiempo. Las sondas TDR miden el contenido de humedad del suelo basándose en la variación temporal (Guaman, 2022).

a.- Principios y procedimientos

La técnica TDR se fundamenta en la relación entre el tiempo que tarda una onda electromagnética en viajar a través del suelo, la constante dieléctrica del suelo y su contenido de agua volumétrico (Guaman, 2022).

Aunque las mediciones con TDR ofrecen una gran precisión, su uso requiere de una adecuada calibración para evitar errores y de un apropiado mantenimiento y revisión de las sondas cuando se demanda de mediciones constantes, para garantizar un funcionamiento óptimo (Guaman, 2022).

Para medir el contenido de agua en la superficie del suelo utilizando TDR, se necesitan dos varillas metálicas que actúan como líneas de transmisión de ondas electromagnéticas, insertadas de manera paralela en el suelo. La muestra para evaluar por el par de varillas es cilíndrica (Portilla & Martínez, 2021).

Para las mediciones con sondas FDR y TDR, se puede calcular la velocidad de propagación, v , de una onda electromagnética a través de un medio dieléctrico de la siguiente manera:

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}}$$

Donde: c representa la velocidad de la onda electromagnética en el espacio libre (3×10^8 m/s), K_a es la constante dieléctrica aparente, y el tiempo de viaje t de una onda electromagnética a través de un medio con una longitud L se calcula como

$$t = \frac{2L}{v}$$

Expresando la constante dieléctrica obtenemos:

$$K_a = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2$$

l_a se define como la longitud aparente

$$l_a = \left(\frac{ct}{2}\right)^2$$

La constante dieléctrica aparente puede expresarse en función de la longitud aparente y la longitud del medio.

b.- Aspectos prácticos al usar el equipo TDR.

Las mediciones con TDR proporcionan una alta precisión, pero es necesario calibrarlas para evitar errores. Además, es importante revisar y mantener las sondas regularmente cuando se realizan mediciones continuas (Guaman, 2022).

El daño que este equipo suele experimentar se produce en los vástagos o sondas de puntas delgadas. Esto ocurre cuando se intenta evaluar en áreas muy compactas o cuando una piedra se queda atrapada entre los vástagos o puntas. Por ello, es crucial no forzar los vástagos contra el perfil del suelo. Si no entran con una fuerza moderada, es aconsejable realizar la medición unos centímetros hacia un lado. (Contreras, 2022).

2. 9 Modelos de simulación y software

Los modelos de simulación en cultivos agrícolas son una categoría de modelos ambientales que en general, prevén el rendimiento de los cultivos, el desarrollo y crecimiento

de las plantas, además de cambios en los niveles de humedad y otros nutrientes (Figarola, et al., 2020).

Estos modelos son una herramienta que combina información y permite analizar, medir y calcular las conexiones existentes entre los factores agrícolas y sus efectos en el sistema, permitiendo valorar alternativas de producción o examinar del impacto individual de cada factor, mientras se mantiene constante el resto (Figarola, et al., 2020).

2.9.1 Modelos de simulación

- ✓ Permiten determinar cuánta agua necesitan los cultivos, lo que ayuda a definir un calendario de riego apropiado según la disponibilidad de agua del suelo para las plantas.
- ✓ Ayudan a determinar las mejores fechas de siembra para un cultivo en específico con base en los pronósticos meteorológicos, facilitando un plan de producción adecuado.
- ✓ Es posible generar estimaciones de cosecha con base en modelos sencillos, que normalmente calculan reducciones en el rendimiento real del cultivo.
- ✓ Estos modelos de balance hídrico permiten supervisar el grado de abastecimiento de agua de los cultivos y evitar que se desarrollen deficiencias hídricas en cualquier momento durante su ciclo.

2.9.2 Software Cropwat de la FAO

El software CROPWAT es una herramienta útil para la gestión del agua debido a su habilidad para ejecutar y combinar varias estimaciones y cálculos, agrupándolos en una sola aplicación, permitiendo un análisis detallado del uso y gestión de este recurso (Zelaya & Rodríguez, 2021).

El programa utiliza el método de cálculo de evapotranspiración (ET_o) llamado Penman Monteith, considerado como el estándar a nivel mundial por expertos en el área. Este método es ampliamente utilizado en investigaciones y proyectos relacionados con el uso del agua debido a su gran precisión y fiabilidad (Rodríguez et al., 2023)

Al realizar el cálculo de precipitación efectiva, el programa dispone de cuatro opciones. La selección de la opción aplicable depende de los datos disponibles, así como la experiencia y el conocimiento del especialista responsable del manejo de la zona. Las cuatro opciones proveen diversas alternativas para determinar la opción más adecuada y precisa para las condiciones particulares de la región (Zelaya & Rodríguez, 2021).

Para determinar con precisión la precipitación efectiva en una zona, es necesario considerar las propiedades físicas del suelo, las características de la lluvia y la naturaleza de los cultivos (Zelaya & Rodríguez, 2021).

III- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

Este estudio se llevó a cabo en la granja experimental "Santa Inés", perteneciente a la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. La granja está ubicada en la provincia de El Oro, en el cantón Machala, específicamente en el kilómetro 5 y medio de la vía Machala-Pasaje.

3.1.1 Ubicación geográfica y caracterización de la zona de estudio

Latitud: 3°17'37.98" S

Longitud: 79°54'48.43" W

Altitud: 6 msnm.

3.1.2 Mapa de ubicación del área experimental

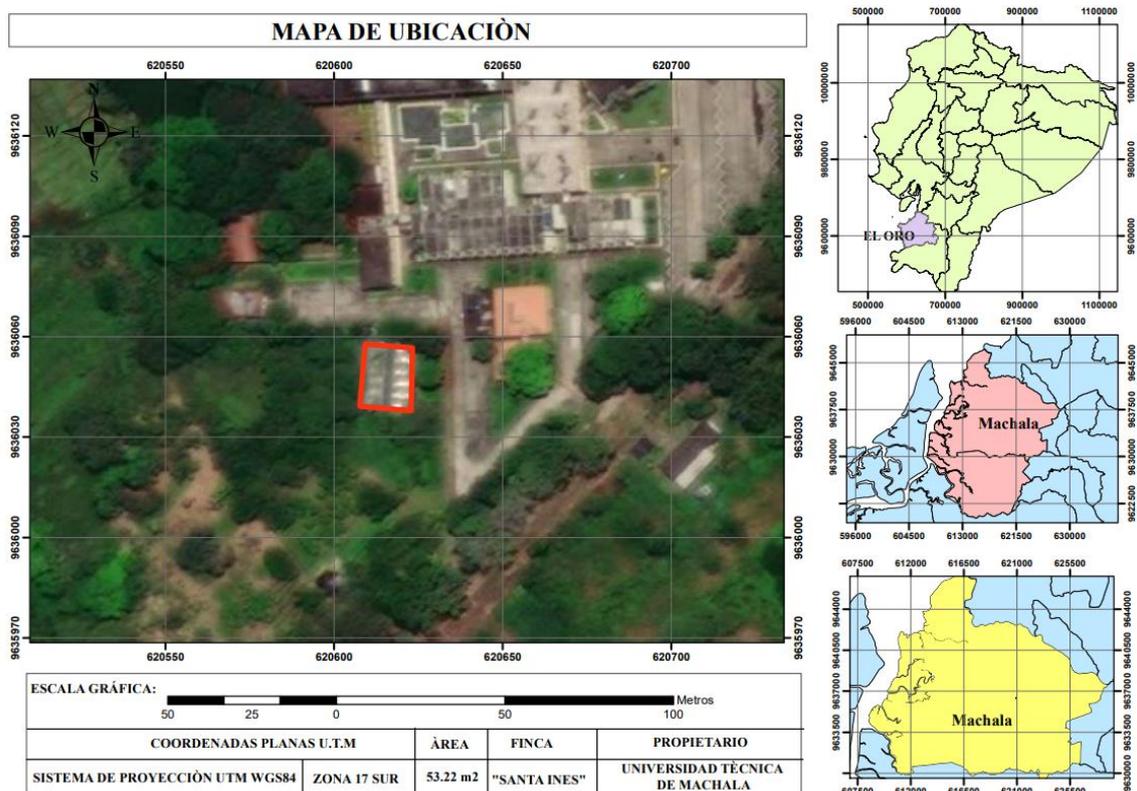


Figura 4. Mapa de ubicación.

3.2 Materiales y equipos

- ✓ Palas
- ✓ Formol 40 %
- ✓ Bomba CP3
- ✓ Cinta métrica
- ✓ Estufa
- ✓ Balanza digital
- ✓ Sonda de capacitancia TDR
- ✓ Calibrador
- ✓ Bandejas
- ✓ Papel aluminio
- ✓ Fundas plásticas negras

3.3 Diseño Experimental

El diseño experimental fue bloques completamente al azar (DCA) debido a la adecuación para condiciones en las que las unidades experimentales son homogéneas, este diseño seleccionado permite que se aleatorice los tratamientos minimizando el sesgo y asegurando que las variaciones se deban a los tratamientos aplicados, por medio de este diseño se evaluará el efecto de cuatro tratamientos diferentes, cada uno con un nivel distinto de lámina de agua aplicada. Cada uno de los tratamientos contará con 60 unidades experimentales, con un total de 240 unidades experimentales.

El área experimental contó con una extensión total de 14 m x 3.2 m, mientras que cada tratamiento ocupó un área de 2.4 m x 3.2 m.

3.4 Croquis del experimento

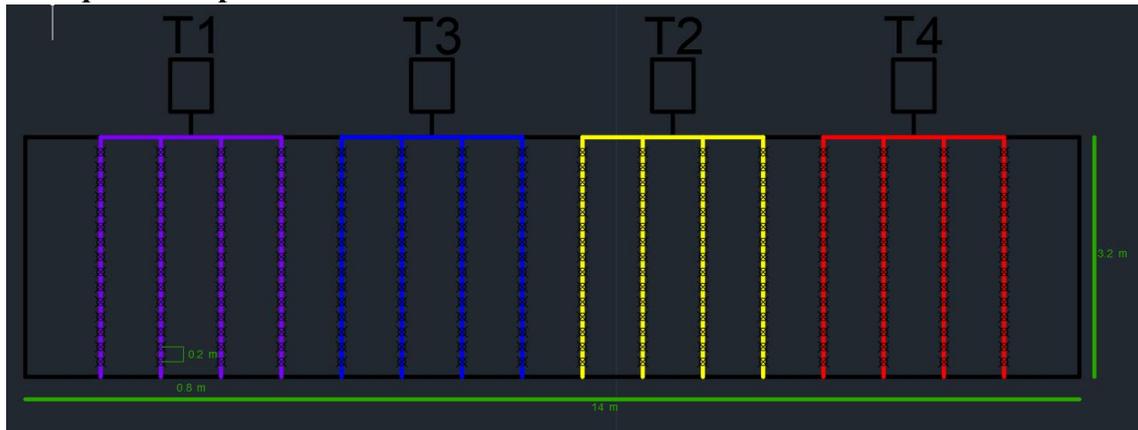


Figura 5. Croquis del experimento.

El croquis del experimento muestra la distribución de los tratamientos, se observa las unidades experimentales perteneciente a cada tratamiento. Dentro de cada tratamiento se cuenta con 60 UE y en cada lateral de riego de cada uno de los tratamientos se cuenta con 16 UE.

Tabla 4. Descripción de los tratamientos

Tratamientos	Característica
T1	Lamina calculada del tanque evaporímetro
T2	Lamina del CROPWAT (10 % menos)
T3	Lamina del CROPWAT
T4	Lamina del CROPWAT (10 % más)

3.5 Preparación de terreno

Para asegurar un buen desarrollo del cultivo y obtener una cosecha exitosa, fue fundamental preparar adecuadamente el terreno. Removiéndolo y su posterior desinfección

3.5.1 Limpieza del área

La limpieza se realizó de forma manual utilizando palas, asegurando la remoción completa de malezas, piedras y cualquier tipo de basura que pueda interferir con el desarrollo óptimo del cultivo. La eliminación de estos elementos es crucial, ya que pueden competir con el cultivo por nutrientes, agua y espacio, además de albergar plagas y enfermedades.

Posteriormente, se procedió a roturar el suelo a una profundidad de entre 15 y 20 cm. Este proceso es esencial para romper cualquier capa de compactación existente, lo que mejora la penetración de las raíces y la aireación del suelo. Una adecuada aireación facilita el intercambio de gases, vital para la respiración de las raíces y la actividad microbiana benéfica. Durante la roturación, también se busca nivelar el terreno en caso de desniveles, lo cual es importante para asegurar una distribución uniforme del agua de riego y evitar encharcamientos o erosiones.

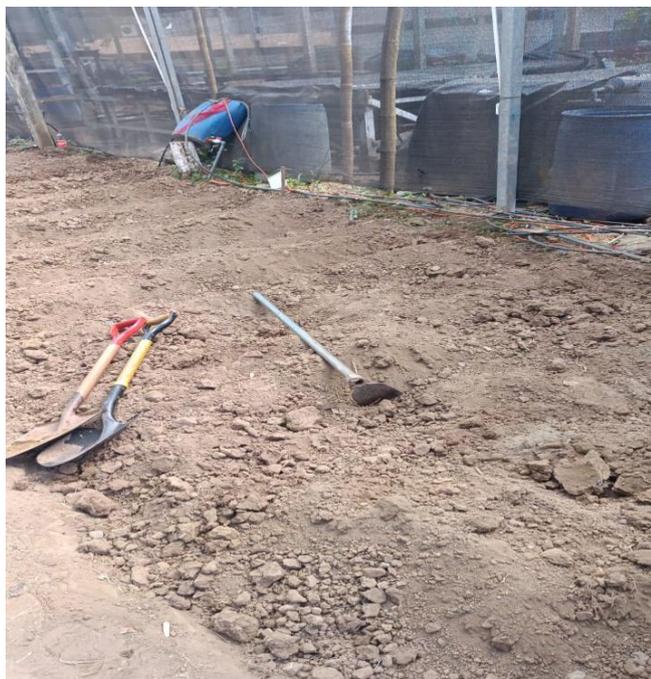


Figura 6. Preparación del terreno, roturación y nivelación

3.5.2 Desinfección del área

Como parte de la preparación del terreno, se procedió a la desinfección de suelo con formol. Este tratamiento es crucial para eliminar patógenos y nematodos que podrían afectar el cultivo. El uso de formol es especialmente importante en suelos que han sido utilizados previamente para la agricultura, estos pueden acumular patógenos que afectan la salud de los nuevos cultivos. La desinfección con formol asegura que el suelo esté libre de organismos dañinos, proporcionando un entorno más seguro y saludable para las plantas.

La desinfección se llevó a cabo con precaución, utilizando mascarillas y una bomba CP3 para la aplicación. La solución desinfectante se prepara mezclando 5 litros de formol al 40% con 20 litros de agua para obtener una concentración al 10%. Esta mezcla se aplica

uniformemente en el suelo, asegurando una distribución homogénea mediante una mezcla inmediata del suelo tras la aplicación.

La importancia de la distribución uniforme del formol radica en la necesidad de asegurar que todos los patógenos en el perfil del suelo sean alcanzados y eliminados, proporcionando así un ambiente estéril y propicio para el crecimiento de las plantas.

3.5.3 Preparación de camas

Para la siembra del cultivo de maíz, se elaboraron camas con un ancho de 0.4 metros y pasillos de 0.4 metros entre ellas. Este diseño mejora el drenaje y facilita el acceso y manejo del cultivo. Los pasillos permiten un mejor movimiento de agua, evitando el encharcamiento y facilitando el acceso para labores de mantenimiento y cosecha. La planificación previa a la siembra es esencial para determinar la densidad de siembra adecuada, asegurando un espacio óptimo entre las plantas. En este caso, se ha determinado una separación de 0.8 metros entre filas y 0.2 metros entre plantas.



Figura 7. Formación de camas.

3.6 Instalación del sistema de riego por goteo

Para proporcionar las láminas de agua, se instaló un sistema de riego por goteo, diseñado específicamente para optimizar la distribución de agua en función de la densidad de siembra previamente determinada.

El proceso de instalación se efectuó, con la colocación de la tubería principal, se realizó perforaciones a intervalos de 0.8 metros para instalar los laterales de goteo. Cada lateral se conectó a la tubería principal en estos puntos de perforación.



Figura 8. Instalación de laterales del riego por goteo

Dentro de cada lateral, se realizaron las perforaciones cada 0.2 metros para colocar los goteros tipo vortex de marca Katif. Estos goteros son cruciales para distribuir el agua de manera uniforme directamente a las plantas. De este modo, se logró una separación entre emisores de 0.2 metros y entre laterales de 0.8 metros. Este espaciamiento es previamente calculado para asegurar una distribución eficiente del agua, optimizando el riego y minimizando el desperdicio.



Figura 9. Instalación de los goteros

El diseño del sistema de riego incluye cuatro tratamientos, cada uno manejando diferentes láminas de riego. Cada tratamiento contó con cuatro laterales y un tanque elevado propio para garantizar una distribución independiente del agua. Para sostener los tanques, se construyeron bancos de madera a una altura de 1.7 metros. Cada tanque tiene una capacidad de 20 litros, lo cual es adecuado para la escala del experimento y proporciona suficiente agua para cada tratamiento.

Una vez finalizado la instalación del sistema de riego, se procedió a su prueba para asegurar su funcionamiento adecuado. Se utilizaron goteros Katif auto compensados con una boquilla roja, que tienen un caudal nominal de 3.75 litros por hora a una presión de 1 bar. Sin embargo, debido a que se trata de un sistema de riego cuyo tanque de almacenamiento tenía una diferencia de altura de 1.70 m logrando esa misma presión para el funcionamiento de los goteros, por lo fue necesario evaluar la descarga de los mismo y establecer su descarga real y así calcular adecuadamente los tiempos de riego.

Para el aforo, se colocaron latas de 100 ml de capacidad debajo del quinto, décimo y decimoquinto gotero en cada tratamiento. Se abrió el riego y se cronometró el tiempo necesario para llenar las latas. En este caso, cada lata se llenó en 2.26 minutos, determinando un caudal de salida de 2.65 l/h. Esta medición permitió ajustar el sistema y garantizar que cada planta reciba la cantidad de agua adecuada según el tratamiento específico.



Figura 10. Aforo del riego por goteo.

3.7 Propiedades físicas y químicas del área

3.7.1 Densidad aparente

Se utilizó el método del cilindro para poder determinar la composición del suelo se tomaron tres muestras a diferentes profundidades las cuales son 10 cm, 20 cm, 30 cm, por medio de un cilindro cuyo diámetro es de 5.7 cm y la altura del mismo de 5 cm. Se colocó el cilindro en el suelo y se utilizó un martillo o mazo de goma, para insertar el cilindro en el suelo, hay que observar que el mismo vaya ingresando de manera uniforme, una vez que el cilindro se encontró lleno de suelo, se cortó alrededor de la base del cilindro para separar la muestra del resto del suelo. Después a la muestra se la envolvió con plástico de embalar para conservarla y luego dentro del laboratorio se pesó la muestra húmeda, luego se la puso en una estufa a 105 °C por 24 horas y se pesó las muestras secas.

3.7.2 Densidad real

Se utilizó el método del picnómetro con un volumen de 100 ml y se procedió a pesar 5 g de cada muestra, primero se pesa el picnómetro vacío, luego el picnómetro con el suelo, luego el picnómetro lleno de agua destilada y suelo, luego el picnómetro lleno de agua destilada, todo eso para registrar la gravedad específica de dicho sólido

3.7.3 Porosidad

Para realizar la porosidad existe una relación entre densidad aparente y real, restando una unidad y el valor resultante de la operación se expresa en forma de porcentaje mediante la siguiente ecuación:

$$Porosidad\ Total = 100 \times \left(1 - \frac{densidad\ aparente}{densidad\ real}\right)$$

3.7.4 Textura

Se utilizó el método de Bouyoucos para determinar el tipo de textura de suelo, que consiste en pesar una muestra de 50 g de tierra fina seca al aire (TFSA) de cada muestra y dejarlas reposando con agua y agregar 10 ml de oxalato de sodio saturado por el tiempo de 24 horas, después de transcurrido este tiempo se utiliza la agitadora durante 3 minutos con las muestras y se colocan en probetas, aforando a 1000 ml y se realizó la toma de dos lecturas a los 40 segundos y las 7 horas.

3.8 Toma de datos en el tanque evaporímetro

El tanque evaporímetro se encuentra dentro del invernadero, se realizó lecturas dos veces al día, en el siguiente horario a las 7 am y a las 5 pm.

El tanque evaporímetro fue colocado a 15 cm del suelo y perfectamente nivelado y al no contar con el tornillo micrométrico se empleó una regla graduada en mm y se efectuaron las lecturas colocando a la misma en posición inclinada y adjunto a la pared del tanque, que tenía una línea diagonal trazada previamente para que su posición en las siguientes lecturas tengan la misma inclinación.

Se calculó la evaporación diaria restando la lectura de la mañana con la de la tarde, se debe realizar un registro diario de todas las mediciones y se verificó regularmente el estado del tanque y la regla para asegurar la precisión de las lecturas.

3.9 Calculo de la lámina de agua

Para calcular las necesidades hídricas del cultivo para cada fase de desarrollo se empleó el siguiente procedimiento empleando la siguiente ecuación:

$$NRD = Eo \times kp \times kc \times Ps \times Au$$

Dónde:

NRD = Necesidades netas de riego diario (litro/planta/día)

Eo = evaporación del tanque

kp = Coeficiente del tanque

kc = Coeficiente del cultivo

PS = Porcentaje de cobertura (%)

AU = Área asignada al cultivo o a la planta (m²)

Para obtener el porcentaje de cobertura **PS** se utilizó la siguiente ecuación:

$$PS = \left(\frac{\pi r^2}{a \times b} \right) \times 100$$

Dónde:

PS = Porcentaje de cobertura.

r = radio del, diámetro promedio de la planta.

a = distancia de siembra entre hilera.

b = distancia de siembra entre plantas.

El área de **AU** se la obtuvo multiplicando la distancia entre hileras y las distancia entre plantas.

Cálculo del consumo de agua

Para calcular en consumo de agua en las diferentes fases vegetativas se empleó la siguiente formula:

$$Ca = L - \left(\frac{Hf - Hi}{100} \right) \times P$$

Donde:

Ca es el consumo de agua (en mm).

L es la lámina de agua aplicada (en mm).

Hf es el contenido de humedad final (en %).

Hi es el contenido de humedad inicial (en %).

P es la profundidad del suelo afectada (en mm).

3.10 Cálculo de la lámina con el software CROPWAT

Para utilizar CROPWAT, se elaboró la base de datos con información de los siguientes parámetros climatológicos: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, horas de sol y precipitación. Estos datos fueron obtenidos de la estación meteorológica local, asegurando la representatividad de las condiciones climáticas de la zona de estudio.

Mes	Prom Temp °C	Humedad %	Viento km/día	Insolación horas	Rad MJ/m ² /día	ET _o mm/día
Enero	26.1	80	35	2.9	13.8	2.91
Febrero	26.4	80	26	3.5	15.0	3.14
Marzo	26.7	79	26	4.4	16.4	3.39
Abril	26.8	79	26	4.6	16.0	3.31
Mayo	25.8	81	26	3.3	13.1	2.73
Junio	24.2	85	26	2.2	11.0	2.27
Julio	23.4	86	26	2.0	10.9	2.21
Agosto	22.8	86	26	1.8	11.4	2.27
Septiembre	22.9	86	35	1.6	11.7	2.38
Octubre	23.0	86	26	0.9	10.9	2.24
Noviembre	23.6	84	35	1.4	11.5	2.36
Diciembre	25.1	81	35	2.5	13.0	2.68
Promedio	24.7	83	29	2.6	12.9	2.66

Figura 11. Datos climatológicos en el software CROPWAT

En los datos del suelo se necesitó información sobre la capacidad de retención de agua del suelo, profundidad del suelo y otros parámetros relevantes fueron obtenidos a través de análisis de campo.

Suelo - C:\Users\Profesional\Desktop\TESIS BRYAN\SueloMaiz2.SOI

Nombre del suelo: Franco Arenoso

Datos generales de suelo:

- Humedad de suelo disponible total (CC-PMP): 120.0 mm/metro
- Tasa máxima de infiltración de la precipitación: 60 mm/día
- Profundidad radicular máxima: 50 centímetros
- Agotamiento inicial de hum. de suelo (como % de ADT): 10 %
- Humedad de suelo inicialmente disponible: 108.0 mm/metro

Figura 12. Datos del suelo en el software CROPWAT

En los datos del Cultivo se incluyeron detalles sobre el ciclo del cultivo, coeficientes de cultivo (Kc) y fases fenológicas específicas del cultivo bajo estudio (Allen et al., 2006).

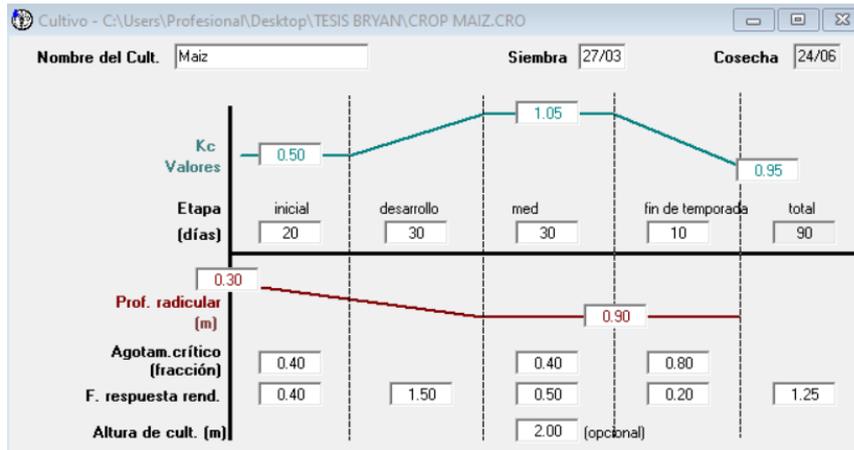


Figura 13. Datos del cultivo en el software CROPWAT

Configurados los datos anteriores, se realizaron cálculos necesarios para determinar la lámina de riego. El proceso incluye Cálculo de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) utilizando la fórmula de Penman-Monteith. Cálculo de la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) ajustando ET_o con los coeficientes de cultivo (K_c) específicos. Determinación de la Necesidad de Riego restando la precipitación efectiva de la ET_c para obtener la cantidad de agua adicional necesaria para el cultivo.

Mes	Decada	Etapa	Kc	ETc	ETc	Prec. efec	Req. Riego
			coef	mm/día	mm/dec	mm/dec	mm/dec
Mar	3	Inic	0.50	1.68	8.4	0.0	8.4
Abr	1	Inic	0.50	1.67	16.7	0.0	16.7
Abr	2	Des	0.51	1.70	17.0	0.0	17.0
Abr	3	Des	0.60	1.88	18.8	0.0	18.8
May	1	Des	0.70	2.05	20.5	0.0	20.5
May	2	Med	0.79	2.14	21.4	0.0	21.4
May	3	Med	0.79	2.05	22.5	0.0	22.5
Jun	1	Med	0.79	1.93	19.3	0.0	19.3
Jun	2	Fin	0.77	1.76	17.6	0.0	17.6
Jun	3	Fin	0.71	1.60	6.4	0.0	6.4
					168.7	0.0	168.7

Figura 14. Requerimientos del cultivo en el software CROPWAT

Con los datos obtenidos en este programa se realizaron tres tratamientos, un tratamiento se utilizó la lámina que fue calculada con el programa, otro tratamiento se utilizó el 10 % más de lo que da el programa, y el otro tratamiento con el 10 % menos de los datos que da este programa, el otro tratamiento se obtuvo de una diferencia de lectura del tanque evaporímetro mediante el uso de una regla graduada en mm.

3.11 Uso de la sonda de capacitancia TDR

Este instrumento permitió obtener mediciones precisas y en tiempo real el contenido volumétrico de agua en el suelo, en tiempo real, proporcionando datos esenciales para la gestión eficiente del riego. Antes de comenzar las mediciones, se realizó una calibración de las sondas TDR en el aire y en agua para comprobar los valores de la constante dieléctrica y asegurar la precisión de los datos. Para la calibración en agua la constante dieléctrica dió un valor de 80, mientras que la calibración en aire dió un valor de 1.00.

Se tomaron datos a una profundidad de 20 cm, estas lecturas se realizaron antes de sembrar el cultivo y durante las etapas fenológicas en el cual iba cambiando el kc (coeficiente del cultivo), se utilizó varillas de 8 pulgadas (20 cm).



Figura 15. Uso de la sonda TDR, antes de la siembra.

3.13 Variables de estudio

Tabla 5. Descripción de las variables, unidades e instrumentos empleados en las mediciones

Variable evaluada	Unidades	Instrumento de medición
Lámina de riego	mm	Cropwat y Tanque evaporímetro
Humedad	%	Sonda TDR
Peso de mazorca	kg	Balanza
Longitud de raíces	cm	Cinta métrica
Diámetro de mazorca	cm	Calibrador
Altura de mazorca	cm	Cinta métrica
Numero de granos	unidad	Conteo
Altura de planta	m	Flexómetro

3.13.1 Variables independientes

3.13.1.1 Lámina de riego

La lámina de riego es la variable independiente. Se evaluaron cuatro niveles diferentes de tratamientos, cada uno representando una cantidad específica de agua aplicada. Estos niveles han sido cuidadosamente seleccionados para abarcar un rango de condiciones que se espera tengan un impacto significativo en las variables de interés.

Estos niveles permitirán analizar cómo la variación en la cantidad de agua aplicada afecta las variables dependientes del estudio. Al controlar y variar sistemáticamente la lámina de riego, se podrá determinar el nivel óptimo de agua necesario para maximizar los rendimientos de la producción.

3.13.2 Variables dependientes

3.4.2.1 Altura de Planta Final

La altura de la planta final se midió al final del período de crecimiento, utilizando centímetros como unidad de medida. La medición se realizó para observar la variación del tamaño de las plantas en comparación con los diferentes tratamientos aplicados. La altura se midió desde la base de la planta a nivel del suelo hasta el ápice.



Figura 16. Altura de planta

3.4.2.2 *Peso de Mazorca*

El peso de la mazorca se determinó utilizando una balanza electrónica. Las mediciones se realizaron de manera sistemática para evaluar el impacto de los tratamientos en el peso final de las mazorcas.



Figura 17. Peso de mazorca

3.4.2.3 *Longitud de Raíces*

La longitud de las raíces se midió con una cinta métrica, tomando como referencia desde la base de la planta hasta la punta más lejana de la raíz. Estas mediciones permiten comparar el desarrollo radicular entre los diferentes tratamientos aplicados.



Figura 18. Longitud de raíces

3.4.2.4 Diámetro de Mazorca

El diámetro de la mazorca se midió en centímetros utilizando un calibrador. Esta medición se realizó en la parte más ancha de la mazorca para obtener datos precisos sobre el crecimiento y desarrollo de los frutos bajo los diferentes tratamientos.



Figura 19. Diámetro de mazorca

3.4.2.5 Altura de Mazorca

La altura de la mazorca se midió desde la base, llamada pedúnculo, hasta su punta, conocida como ápice. Esta medición proporciona información sobre el tamaño y desarrollo de las mazorcas en respuesta a los tratamientos.



Figura 20. Longitud de mazorca

3.4.2.6 Número de Granos

Para calcular el número de granos en una mazorca de maíz, se contó el número de filas de granos y el número de granos por fila. Luego, se multiplicaron estos valores para obtener el total de granos por mazorca. Esta medida es crucial para evaluar el rendimiento y la productividad de las plantas bajo diferentes condiciones experimentales.



Figura 21. Número de granos

IV RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Análisis descriptivo de Lámina de agua en diferentes fases vegetativas

Tabla 6. Estadísticas descriptivas de la lámina de agua por tratamiento en diferentes fases vegetativas

Lámina de agua	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	40.5975	404.1427	20.1052	60.42	40.015	10.0526	0.4292
T2	41.7425	463.5268	21.5322	55.60	44.685	10.7661	0.6304
T3	45.3250	434.7008	20.8514	61.20	49.650	10.4257	0.8082
T4	50.4075	595.8470	24.4069	67.32	54.615	12.2035	0.5358

El tratamiento 4 con 110% de la lámina calculada por el software Cropwat no solo se aplica la mayor cantidad de agua, sino que también muestra la mayor variabilidad y dispersión en los datos. Esto podría indicar una estrategia de riego que responde más dinámicamente a las necesidades de las plantas en diferentes fases vegetativas. Los tratamientos con menor lámina de agua (T1 y T2) muestran una menor variabilidad, lo que sugiere una aplicación más uniforme pero menos adaptativa a las variaciones en las necesidades hídricas de las plantas.

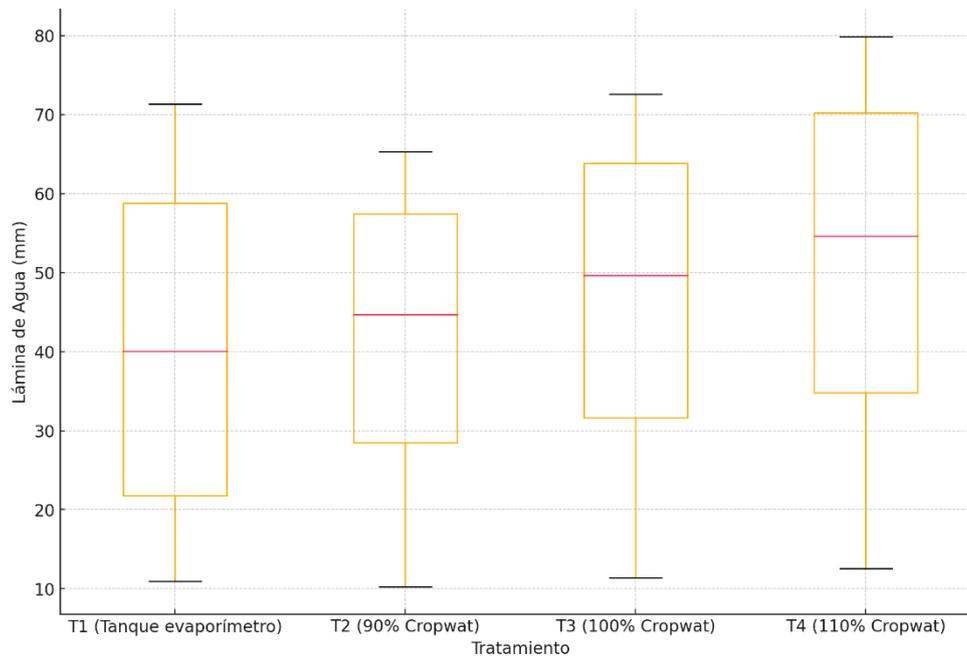


Figura 22. Distribución de la lámina de agua aplicada en diferentes fases vegetativas por tratamiento

La figura 2 proporciona una representación visual clara de cómo varía la lámina de agua aplicada entre los diferentes tratamientos. El análisis de los gráficos confirma que los tratamientos con mayor aplicación de agua (T3 y T4) presentan valores medianos más altos y menos variabilidad en comparación con los tratamientos con menor aplicación de agua (T1 y T2).

4.2 Análisis Descriptivo del contenido de humedad por tratamiento

Tabla 7. Estadísticas descriptivas por tratamiento del contenido de Humedad

Contenido de Humedad	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	28.69	0.105	0.324	0.75	28.61	0.162	0.490
T2	28.39	0.147	0.383	0.80	28.44	0.192	0.420
T3	29.93	1.005	1.002	2.38	30.11	0.501	0.676
T4	29.39	0.637	0.798	1.73	29.49	0.399	0.579

El tratamiento 3 no solo tiene la media más alta de contenido de humedad, sino también la mayor variabilidad en los datos. Esto sugiere una estrategia de riego que busca maximizar la retención de humedad en el suelo, aunque con una mayor dispersión en los resultados.

En contraste, los tratamientos 1 y 2 muestran medias de humedad más bajas y una menor variabilidad, indicando una aplicación de agua más uniforme. El tratamiento 4 presenta

una media alta de humedad con una variabilidad moderada, equilibrando la intensidad de riego con la uniformidad en la retención de agua.

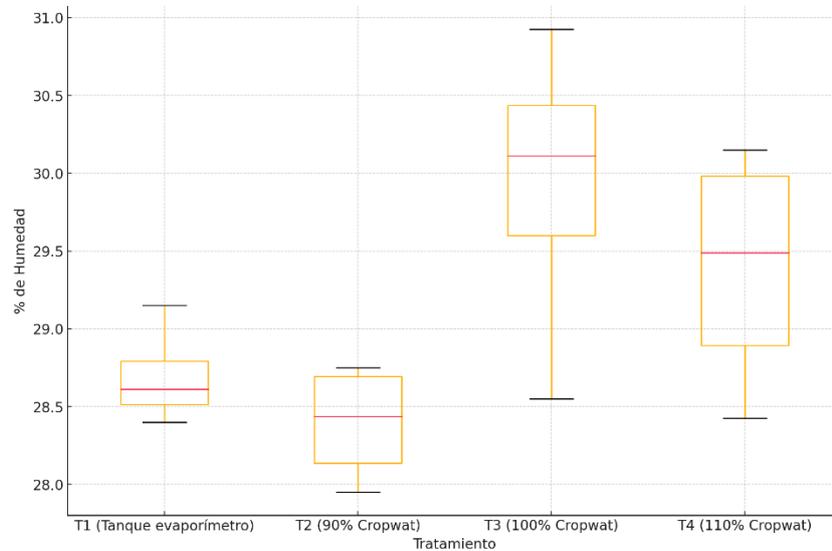


Figura 23. Distribución del Porcentaje de Humedad en Diferentes Fases Vegetativas

En la figura 20 se puede visualizar que el tratamiento 1 (28.61) y 2 (28.44) presentan una mediana similar de contenido de humedad en las fases vegetativas, lo que sugiere una distribución uniforme de los datos. El tratamiento 3 presenta una mayor variabilidad que el resto de los tratamientos con una mediana de 30.11, indicando la mayor cantidad de agua presente en el suelo. La variabilidad es similar a la del tratamiento 4 (29.49) pero con un rango ligeramente mayor.

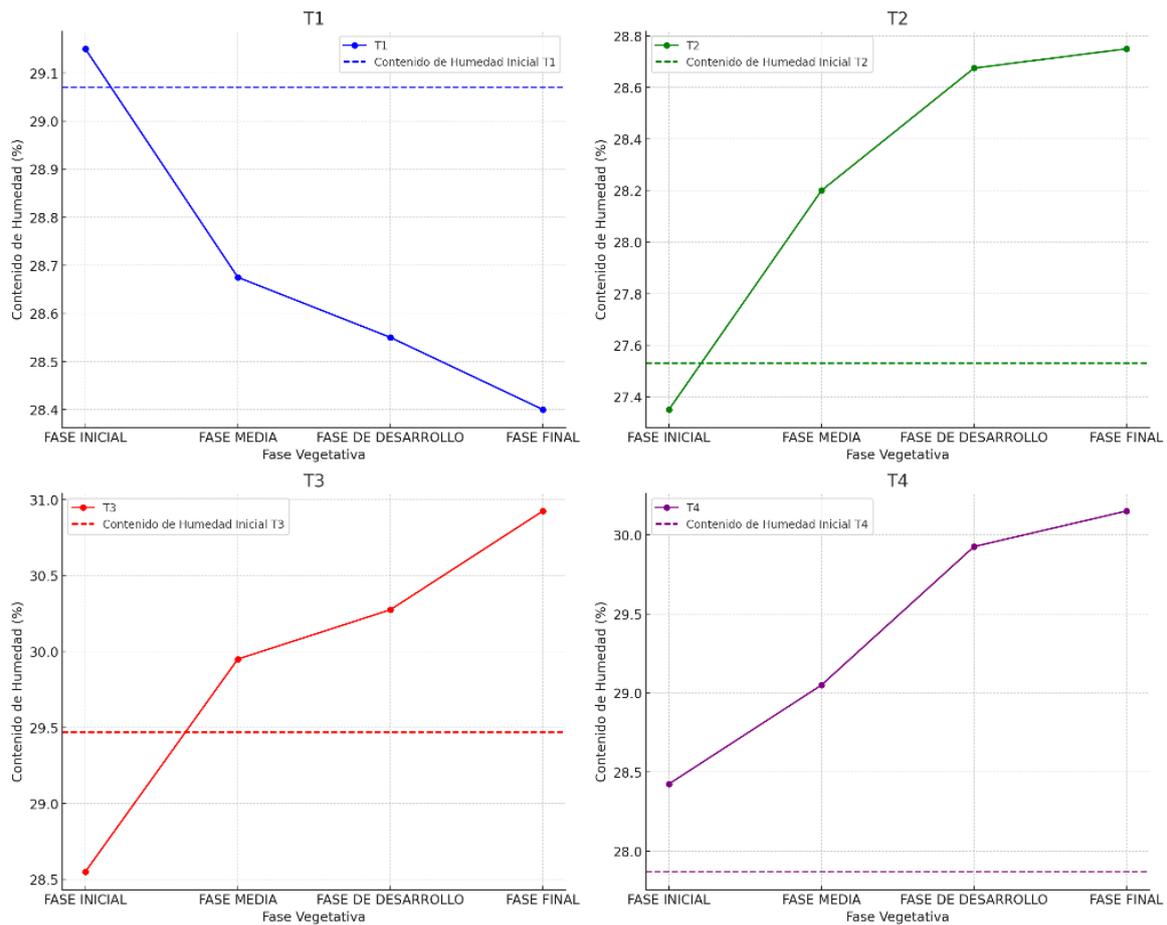


Figura 24. Contenido de humedad en los tratamientos

Los tratamientos T3 y T4, que tienen las láminas de riego más altas en todas las fases vegetativas, muestran un incremento continuo y significativo en el contenido de humedad del suelo. Esto indica que mayores cantidades de riego son efectivas para mantener e incluso aumentar la humedad del suelo.

T3, con un contenido de humedad inicial de 29.47%, y T4, con 27.87%, ambos incrementaron su contenido de humedad hasta alcanzar 30.93% y 30.15%, respectivamente, en la fase final.

4.3 Análisis Descriptivo de los milímetros de agua por tratamiento (mm)

Tabla 8. Estadísticas descriptivas por tratamiento con milímetros de agua consumidos

Milímetros de agua (mm)	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	40.43	742.40	27.25	60.09	40.01	13.62	0.749
T2	41.55	594.65	24.39	55.25	45.14	12.19	0.769

T3	46.19	747.00	27.33	61.95	49.36	13.67	0.816
T4	50.98	894.34	29.91	67.72	55.34	14.95	0.769

La media de agua consumida varía entre los tratamientos, siendo más baja en T1 (40.43 mm) y más alta en T4 (50.98 mm). Esto sugiere que, en promedio, el tratamiento T4 resultó en el mayor consumo de agua.

El T4 muestra la mayor varianza (894.34) y desviación estándar (29.91), indicando que los datos de agua consumida en T4 son los más dispersos, también presenta el rango más amplio (67.72 mm), lo que indica una mayor variabilidad en la cantidad de agua consumida en este tratamiento. T2 tiene la menor varianza (594.65) y desviación estándar (24.39), sugiriendo una dispersión menor en comparación con los otros tratamientos. Por otro lado, el T4 tiene el mayor error estándar (14.95), lo que sugiere una menor precisión en la estimación de la media de la población en comparación con los otros tratamientos.

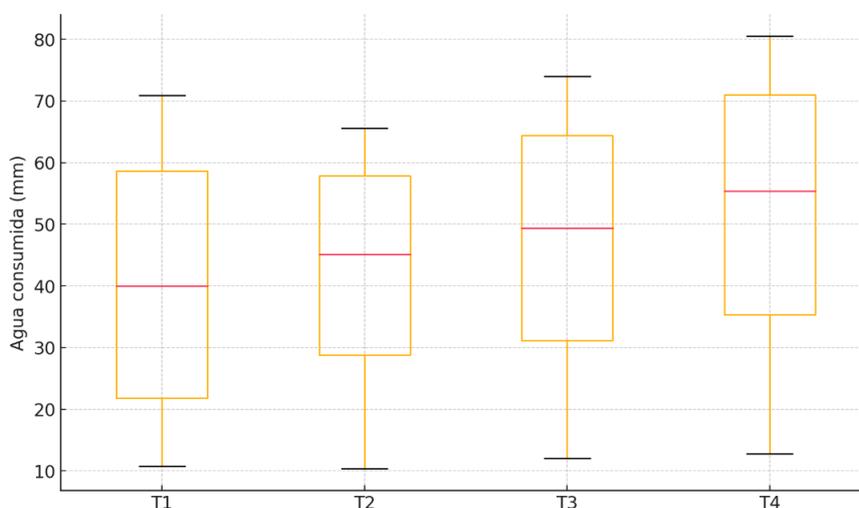


Figura 25. Distribución de los milímetros de agua consumidos en diferentes fases vegetativas

Las medianas de los tratamientos siguen una tendencia similar a la media, el tratamiento 4 presenta la mediana más alta con un valor de 55.34 mm, indicando una mayor dispersión de los datos, seguido del tratamiento 2 con una mediana de 45.14 mm, el tratamiento 3 presenta un valor de 49.36 mm, por su parte, el tratamiento del tanque evaporímetro quien registra el valor más bajo de la mediana (40.01 mm). No se observan valores atípicos significativos en los datos, lo que sugiere que las observaciones extremas no son comunes en estos conjuntos de datos.

4.4 Análisis Descriptivo de la longitud de raíces por tratamiento

Tabla 9. Estadísticas descriptivas por tratamiento con longitudes de raíces

Raíces (cm)	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	24.904667	2.385112	1.544381	5.60	25.4	0.398757	0.025389
T2	22.540000	25.525429	5.052270	17.30	21.5	1.304490	0.264207
T3	19.331333	5.900284	2.429050	9.65	19.4	0.627178	0.982436
T4	19.178667	1.544484	1.242773	4.32	19.1	0.320883	0.105723

El Tratamiento 1 presentó una mayor longitud de raíces (24.9047 cm), un hecho que puede relacionarse con la menor cantidad de agua aplicada y la menor humedad registrada en este tratamiento, en el tratamiento 2 la longitud de raíces es menor (22.54 cm), el tratamiento 3 (19.3313 cm) y el tratamiento 4 (19.1787 cm) presentan una longitud de raíces similar siendo las más bajas en comparación con los otros tratamientos.

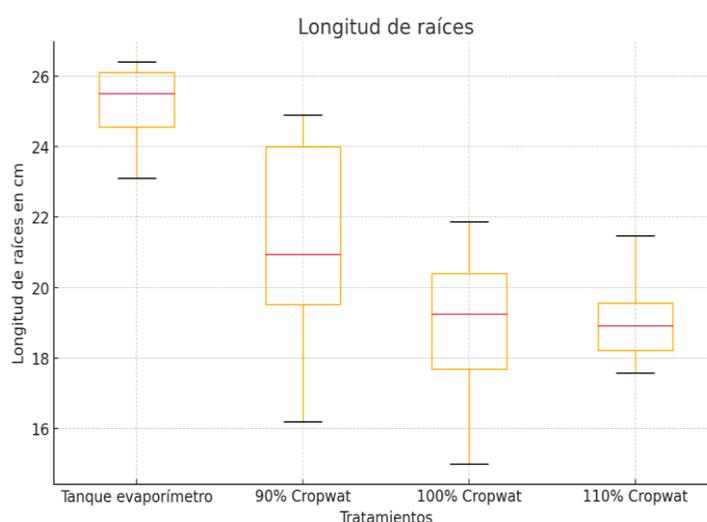


Figura 26. Distribución de longitud de raíces

En condiciones de déficit hídrico, las plantas tienden a desarrollar raíces más largas para acceder a las reservas de agua ubicadas en capas más profundas del suelo. Esto es evidente en los tratamientos 1 y 2, donde la longitud de raíces es intermedia y la variabilidad sugiere una respuesta adaptativa a la falta de agua superficial.

Por el contrario, los tratamientos 3 y 4 muestra una longitud de raíces menor, puede ser resultado de condiciones de exceso de humedad que causan una falta de oxígeno (anoxia) en

las raíces. Esto inhibe el crecimiento radicular y puede llevar a problemas como la pudrición de raíces.

4.5 Análisis Descriptivo del diámetro de mazorca por tratamiento

Tabla 10. estadísticas descriptivas por tratamiento del diámetro de mazorca

Diametro de mazorca (cm)	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	4.640	0.017619	0.13277	0.4	4.6	0.03429	0.35922
T2	4.707	0.014762	0.12152	0.4	4.6	0.03137	0.20577
T3	4.807	0.062095	0.24919	0.7	4.8	0.06435	0.10792
T4	4.873	0.086667	0.29437	0.7	4.9	0.07601	0.46661

El tratamiento 4 tiene la media y mediana más altas, indicando que este tratamiento es el más efectivo para aumentar el diámetro de las raíces. La variabilidad es más baja en el tratamiento 2 (varianza de 0.007 y desviación estándar de 0.085 cm) y más alta en el tratamiento 1 (varianza de 0.022 y desviación estándar de 0.150 cm). La variabilidad en los tratamientos 3 y 4 es similar y moderada

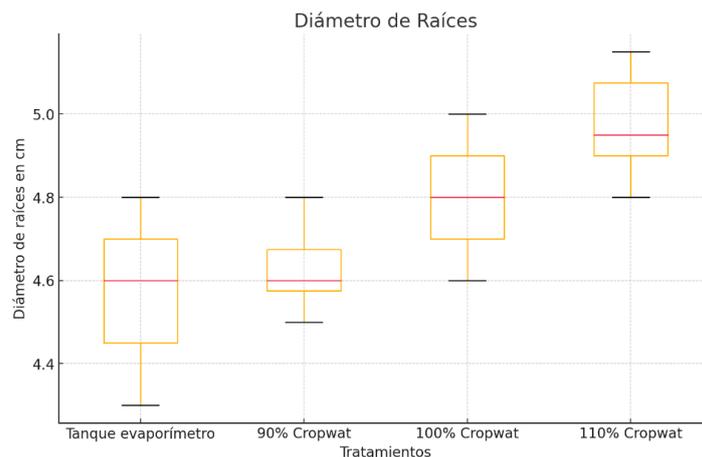


Figura 27. Distribución del diámetro de mazorca

El tratamiento 4 (110% de lámina de agua calculada en Cropwat) es el más efectivo para aumentar el diámetro de las raíces. Todos los tratamientos tienen distribuciones normales, lo que valida la consistencia de los resultados. La menor variabilidad en el tratamiento 2 sugiere que este tratamiento proporciona resultados más consistentes, aunque el diámetro de las raíces es menor comparado con los tratamientos 3 y 4.

Tabla 11. Estadísticas descriptivas por tratamiento de longitud de mazorca

Longitud de mazorca(cm)	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	15.013	2.2312	1.4944	4.5	15.0	0.3859	0.7372
T2	15.606	1.1047	1.0511	3.8	15.7	0.2714	0.2521
T3	16.233	2.5094	1.5841	4.7	17.0	0.4092	0.4606
T4	17.340	0.7545	0.8685	2.3	17.1	0.2242	0.1854

La longitud promedio de las mazorcas es más alta en el tratamiento T4 (17.340 cm) y más baja en el tratamiento T1 (15.013 cm). El tratamiento T3 presenta la mayor variabilidad (varianza: 2.5094 cm², desviación estándar: 1.5841 cm), mientras que el tratamiento T4 tiene la menor variabilidad (varianza: 0.7545 cm², desviación estándar: 0.8685 cm). El tratamiento T3 muestra el rango más amplio (4.7 cm), mientras que el tratamiento T4 tiene el rango más estrecho (2.3 cm).

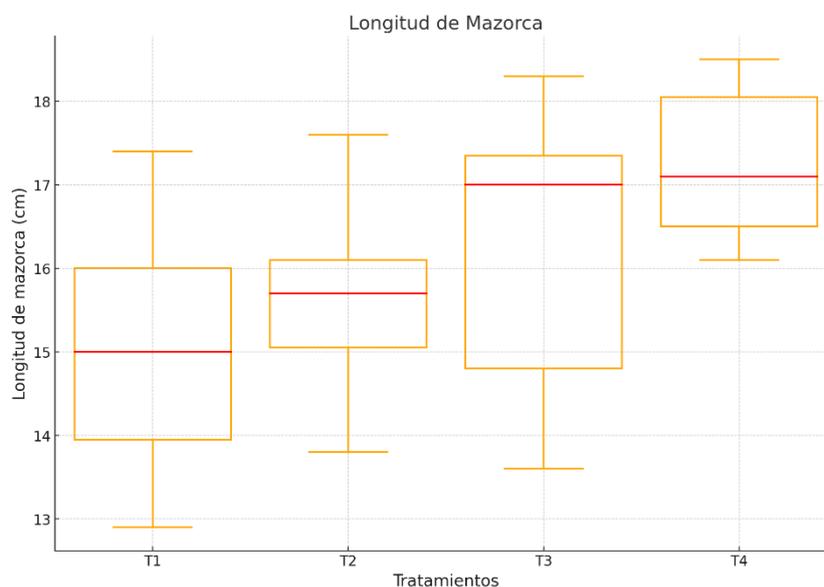


Figura 28. Distribución de la longitud de mazorca

El tratamiento T4 muestra la mayor mediana, indicando que este tratamiento resulta en las mazorcas más largas en promedio. El tratamiento T2 tiene el menor rango total, sugiriendo una menor variabilidad en la longitud de las mazorcas para este tratamiento. El tratamiento T3 tiene la mayor variabilidad en términos de longitud de mazorca, con un rango total de 4.7 cm.

El análisis de los datos revela que el tratamiento 4 es el más efectivo para promover un crecimiento uniforme y significativo en la longitud de las mazorcas. Este tratamiento no solo

tuvo la mayor media, sino también la menor variabilidad y rango, lo que indica que las plantas respondieron de manera más consistente a este nivel de riego.

4.6 Análisis Descriptivo del Peso de Mazorca por Tratamiento

Tabla 12. estadísticas descriptivas por tratamiento del peso de mazorca

Peso kg	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	0.2373	0.000564	0.0237	0.07	0.240	0.0061	0.2152
T2	0.2640	0.000454	0.0213	0.08	0.270	0.0055	0.4546
T3	0.2733	0.003738	0.0611	0.21	0.270	0.0158	0.6310
T4	0.2813	0.001184	0.0344	0.12	0.280	0.0089	0.4016

El peso promedio de las mazorcas fue más alto en el tratamiento 4 (0.2813 kg) y más bajo en el tratamiento 1 (0.2373 kg). El tratamiento 3 mostró la mayor varianza (0.003738 kg²) y desviación estándar (0.0611 kg), indicando una mayor dispersión en los pesos de las mazorcas. En contraste, el tratamiento 2 tuvo la menor varianza (0.000454 kg²) y desviación estándar (0.0213 kg), sugiriendo una respuesta más uniforme de las plantas a este nivel de riego.

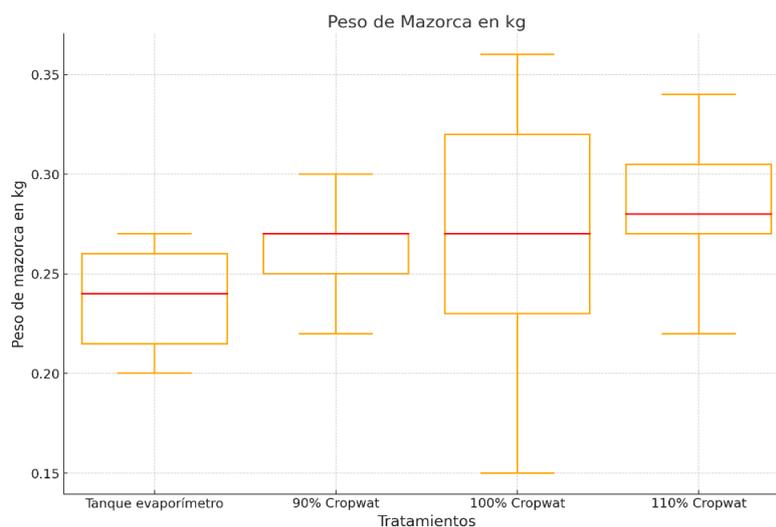


Figura 29. Distribución del peso de mazorca

El tratamiento 4 muestra la mayor mediana y un IQR que sugiere una distribución más uniforme de los pesos de las mazorcas en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento 3 presenta la mayor variabilidad, como lo indica su rango total y el IQR más amplio. El tratamiento 1 tiene la menor variabilidad, con un rango total más estrecho.

4.7 Análisis Descriptivo del número de granos por tratamiento

Tabla 13. Estadísticas descriptivas por tratamiento del número de granos

Número de granos	Media	Varianza	Desv. Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	561.8	5598.46	74.82	238	560.0	19.32	0.724975
T2	573.8	335.74	18.32	56	570.0	4.73	0.245365
T3	570.6	18693.40	136.72	473	586.0	35.30	0.474526
T4	585.0	11762.14	108.45	359	602.0	28.00	0.665274

El tratamiento 4 tuvo la mayor media y mediana pero las diferencias en el número de granos no fueron estadísticamente significativas entre los tratamientos. El tratamiento 2 presentó menor variabilidad y mayor consistencia, mientras que el tratamiento 3 mostró la mayor variabilidad. Los tratamientos 3 y 4 mostraron una mayor dispersión de los datos.

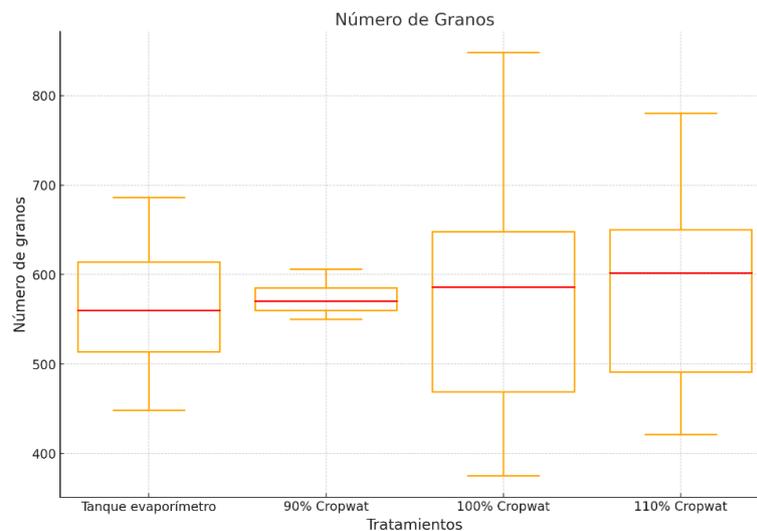


Figura 30. Distribución del número de granos por tratamiento.

El tratamiento 4 muestra la mayor mediana y un IQR que sugiere una distribución más uniforme del número de granos en comparación con los otros tratamientos. El tratamiento 3 presenta la mayor variabilidad, como lo indica su rango total y el IQR más amplio. El tratamiento 2 tiene la menor variabilidad, con un rango total más estrecho.

4.8 Análisis Descriptivo de altura de la planta por tratamiento

Tabla 14. Estadísticas descriptivas de las alturas de plantas en 4 tratamientos

Altura (m)	Media	Varianza	Desviación Estándar	Rango	Mediana	Error Estándar	p-valor
T1	2.531	0.020978	0.144838	0.44	2.57	0.037397	0.232256
T2	2.577	0.015152	0.123095	0.42	2.54	0.031783	0.418410
T3	2.705	0.012412	0.111411	0.36	2.69	0.028766	0.485401
T4	2.849	0.014107	0.118771	0.46	2.87	0.030667	0.726766

El tratamiento 4 es el más efectivo para aumentar la altura de las plantas ya que registra los valores más altos, seguido por 3 con una altura de 2.705 cm, 2, y el tratamiento 1 presentan alturas de las plantas similares.

Para resultados más consistentes, 3 y 4 son las mejores opciones, mostrando menor variabilidad en comparación con otros tratamientos.

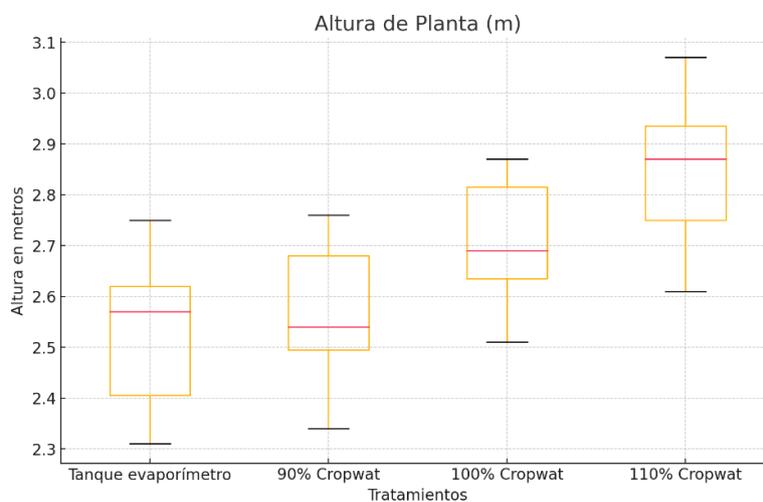


Figura 31. Distribución de la altura de planta por tratamiento

En la figura 33 se visualiza que los tratamientos 1 y 2 presentan los valores más bajos de altura de plantas, seguidas del tratamiento 3 presentando una altura considerable. Por su parte, el tratamiento 4 registra el valor más alto de altura.

4.9 Correlación múltiple

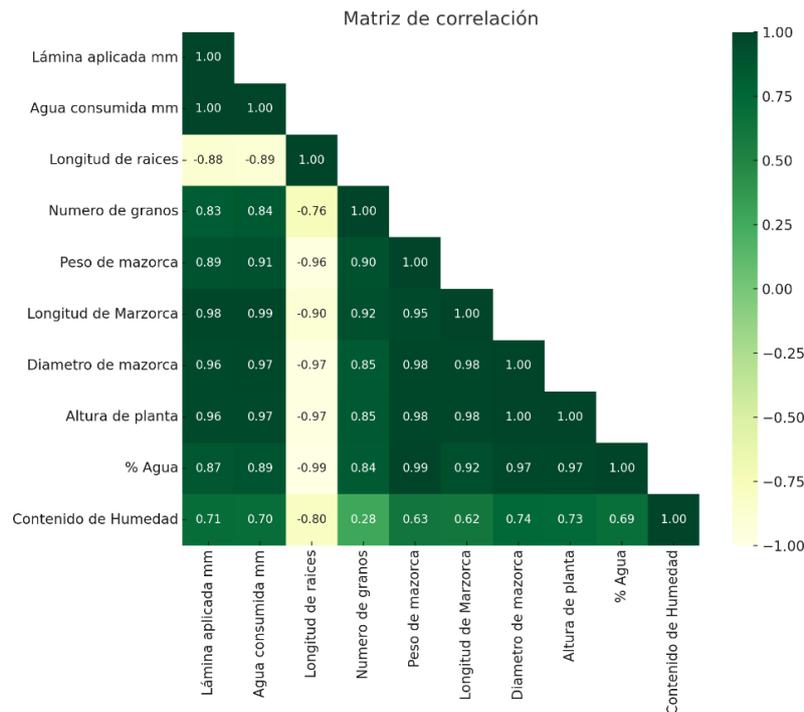


Figura 32. Correlación múltiple entre variables

En la figura 34 se presenta una correlación alta entre la mayoría de variables alcanzando hasta valores de 1, indicando que las variables están directamente relacionadas entre sí y aumentan o disminuyen en la misma proporción. Por su parte, la variable longitud de raíces es la que presenta una correlación negativa entre variables, indicando que se obtienen mejores resultados con raíces más cortas.

Una correlación negativa entre la lámina aplicada y la longitud de raíces indica que a medida que incremente la cantidad de agua aplicada la longitud de las raíces tiende a disminuir, por otro lado, una correlación negativa entre longitud de raíces y la altura de la planta indica que plantas con raíces más largas tienden a ser más bajas, esto puede ocurrir porque el estrés hídrico limita el crecimiento vertical de las plantas mientras estas destinan recursos al desarrollo radicular para buscar agua.

4.10 Análisis de varianza

Tabla 15. Análisis de varianza entre tratamientos.

Lámina de agua	Longitud raíces	Altura de planta	Diámetro mazorcas	longitud mazorcas	Peso de mazorcas	Numero de granos
T1	24,905 a	2,613 a	4,640 b	15,013 c	0,237 b	561,800 a
T2	22,540 a	2,67 a	4,707 ab	15,606 bc	0,264 ab	573,800 a
T3	19,331 b	2,747 a	4,807 ab	16,233 ab	0,273 ab	570,600 a
T4	19,178 b	2,803 a	4,873 a	17,340 a	0,281 a	585,000 a
CV%	13.835	8.974	3.689	7.583	14.597	16.652
Prueba F	12.88**	1.76NS	5.23**	10,02**	3,70*	0,15NS
DMS (5%)	2.875	0,2350	0.1696	1.177	0.0373	92.221

** : altamente significativo ($p=0.01$); NS: no significativo; CV: Coeficiente de variación.

Longitud de raíces

El tratamiento 1 (lámina de agua calculada con el tanque evaporímetro) es estadísticamente igual al tratamiento 2 (90% de la lámina calculada con Cropwat) pero diferentes al tratamiento 3 (100% de la lámina calculada con Cropwat) y tratamientos 4 (110% de la lámina calculada con Cropwat). El tratamiento 3 es estadísticamente igual al tratamiento 4 pero diferentes al tratamiento 1 y 2. Siendo el tratamiento 1 quien presento la mayor longitud de raíces.

Al comparar con la investigación de Llanqui (2019), donde las raíces de maíz alcanzaron un promedio de 25.71 cm con el uso de microorganismos eficientes, el tratamiento 1 de nuestro experimento, que utilizó una lámina de agua basada en la evaporación del tanque evaporímetro, mostró una longitud promedio de raíces de 24.905 cm. La menor cantidad de agua en nuestro tratamiento hizo que las raíces se esforzaran más en buscar agua y nutrientes, desarrollándose en mayor profundidad. Este comportamiento es consistente con la teoría de la plasticidad radicular.

Altura de planta

La aplicación de diferentes láminas de agua no presento diferencias estadísticas en la altura de la planta. La media más alta es de 2.803 m en el tratamiento 4 comparando con Melisa (2020) que obtuvo una media de 2 m con la variedad INIA-601, en los 4 tratamientos la media

está por encima de 2 metros. Esto debido a la diferente variedad, factores climáticos y los distintos manejos de riego.

Diámetro de mazorca

En la prueba Tukey, El tratamiento 1 es estadísticamente igual al tratamiento 2 y 3 diferentes al tratamiento 4. El tratamiento 4 es estadísticamente igual al tratamiento 2 y 3 pero difiere estadísticamente del tratamiento 1. Los tratamientos 2 y 3 son estadísticamente igual a todos los tratamientos. Siendo el tratamiento 4 el que presento un mayor diámetro de mazorca.

Según la investigación de Guamán (2020), donde la variedad Pioneer F alcanzó un diámetro de mazorca de 4.5 cm y la variedad Gladiador D obtuvo 4.3 cm, nuestro experimento mostró resultados superiores. En el tratamiento 4, que recibió una mayor lámina de agua, se alcanzó un diámetro promedio de mazorca de 4.873 cm. Este aumento en el tamaño de las mazorcas puede atribuirse a la mayor disponibilidad de agua, que favorece un mejor desarrollo del cultivo.

Longitud de mazorca

El tratamiento 1 es estadísticamente igual al tratamiento 2 pero diferente al resto de tratamientos. El tratamiento 4 es estadísticamente igual al tratamiento 3 pero difiere estadísticamente del resto de tratamientos. El tratamiento 2 es estadísticamente igual al tratamiento 3 pero diferente al tratamiento 1 y 4. Siendo el tratamiento 4 quien presenta una mayor longitud de la mazorca.

En comparación con el estudio de Guamán (2020), que reportó una longitud media de 21.5 cm en la mazorca utilizando cuatro híbridos de maíz, nuestro tratamiento 4 mostró una longitud media de mazorca de 17.340 cm, siendo la más alta entre los tratamientos evaluados. Es importante considerar que los híbridos utilizados en ambos estudios pertenecen a distintas variedades de maíz, lo cual puede influir significativamente en las diferencias observadas en la longitud de la mazorca. Además, los factores climáticos durante la fase vegetativa del cultivo también desempeñan un papel crucial en el desarrollo del maíz.

En el caso de nuestro estudio, todos los tratamientos se realizaron dentro de un invernadero, lo que minimiza el impacto de las variaciones climáticas externas y proporciona un entorno controlado para el crecimiento de las plantas. Esta condición podría explicar las diferencias en los resultados obtenidos en comparación a ese estudio donde los factores climáticos externos pueden haber tenido una mayor influencia.

La comparación de estos resultados resalta la importancia de considerar tanto las características genéticas de los híbridos de maíz como las condiciones ambientales en las que se cultivan. Las diferencias en la longitud de la mazorca entre los estudios subrayan la necesidad de adaptar las prácticas agrícolas a las condiciones específicas de cada región y variedad de maíz para optimizar el rendimiento del cultivo.

Peso de mazorcas

El tratamiento 1 es estadísticamente igual al tratamiento 2 y 3 pero diferentes al tratamiento 4. El tratamiento 4 es estadísticamente igual al tratamiento 2 y 3 pero difiere estadísticamente del tratamiento 1. Los tratamientos 2 y 3 son estadísticamente igual a todos los tratamientos. Siendo el tratamiento 4 el que presentó un mayor peso de mazorca.

Al comparar con el estudio de Guamán (2020), donde el híbrido de maíz Pioneer F alcanzó un peso de mazorca de 257.3 g, en nuestro experimento el tratamiento 4, que recibió una mayor lámina de agua, obtuvo un peso promedio de 281 g. Esta diferencia puede atribuirse al manejo adecuado del riego en nuestro experimento, que permitió un mejor desarrollo del cultivo. Estos resultados destacan la importancia de la gestión hídrica para optimizar el rendimiento del maíz, sugiriendo que una mayor disponibilidad de agua puede incrementar significativamente el peso de las mazorcas

Numero de granos

Según la prueba Tukey, la aplicación de diferentes láminas de aguas no presentó diferencias estadísticas en el número de granos. El estudio de Omar Ramírez (2021), donde se evaluó la calidad de mazorcas y granos en dos maíces criollos, obteniendo 16 hileras por mazorca y 29 granos por hilera (464 granos por mazorca en promedio), nuestro experimento mostró resultados superiores. En el tratamiento 4, que recibió una mayor lámina de agua, se alcanzó un promedio de 585 granos por mazorca. Esta diferencia puede atribuirse a la mayor disponibilidad de agua en el tratamiento 4, lo que favoreció un mejor desarrollo y productividad del maíz.

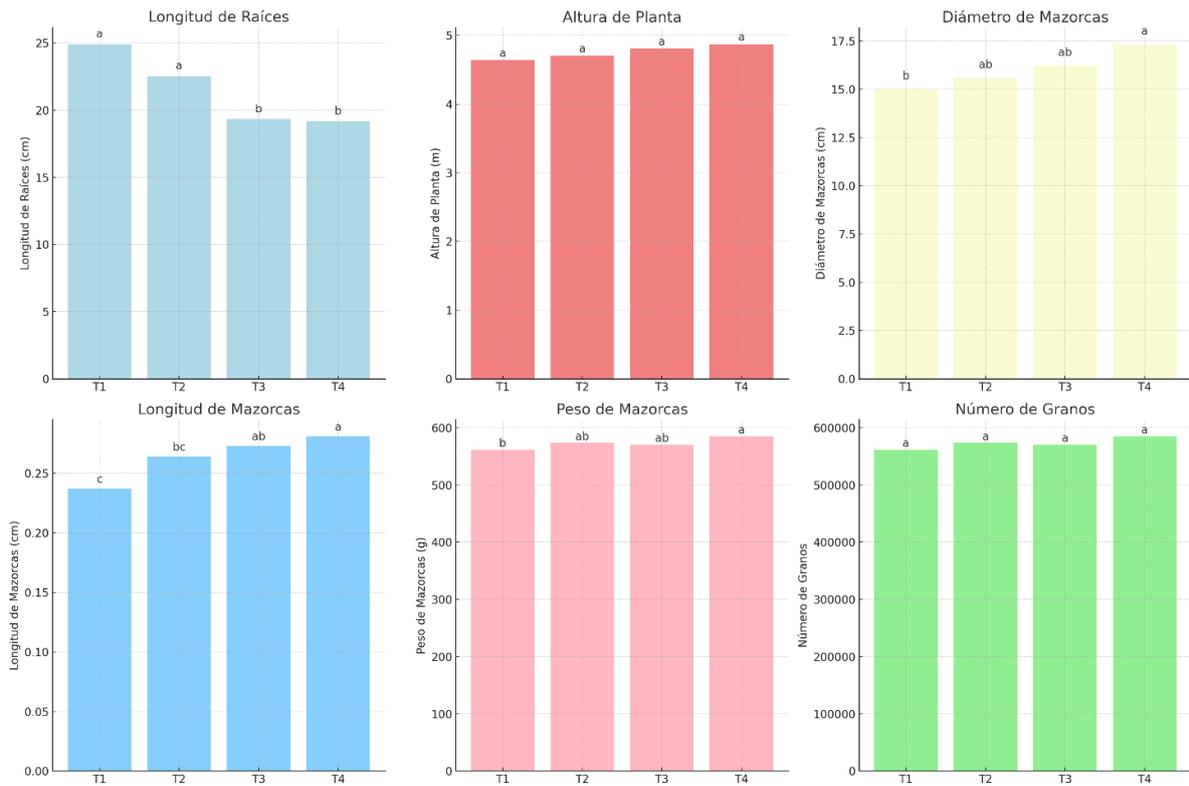


Figura 33. Contenido de humedad en los tratamientos.

4.11 Consumo de agua

Tabla 16. Milímetros de agua consumida en cada fase vegetativa

Consumo de agua mm	T1	T2	T3	T4
Fase inicial	25.50	34.98	37.48	42.80
Fase de desarrollo	70.90	65.59	74.00	80.49
Fase media	54.52	55.29	61.23	67.87
Fase final	10.81	10.34	12.05	12.77

El tratamiento 4 mostró consistentemente el mayor consumo de agua en todas las fases vegetativas, lo cual sugiere que una mayor disponibilidad de agua puede favorecer el crecimiento y desarrollo del maíz. Los tratamientos 2 y 3 también mostraron un mayor consumo de agua en comparación con el tratamiento 1 en todas las fases.

Tabla 17. Comparación entre la lámina aplicada y el agua consumida por tratamiento.

Tratamientos	Lámina aplicada (mm)	Consumo de agua (mm)
T1	162.40	161.730
T2	164.97	166.187
T3	183.30	184.758
T4	201.63	203.913

En el tratamiento 1 la lámina aplicada (162.40 mm) y el agua consumida (161.73 mm) son casi iguales, indicando una alta eficiencia en el uso del agua en este tratamiento. En el tratamiento 2 el agua consumida es de 166.19 mm siendo ligeramente mayor que la lámina aplicada (164.97 mm), lo que puede indicar una absorción adicional del agua debido a las condiciones específicas del suelo o clima. Al igual que los tratamientos anteriores en los tratamientos 3 y 4 el agua consumida supera ligeramente la lámina aplicada como se puede visualizar en la figura 36.

Comparando con Carlos (2018), la lámina de agua para años normales fue de 440 mm, se observó que el tratamiento 4 resultó en una lámina de agua de 201.63 mm, el cual produjo el mayor rendimiento. Es importante destacar que todos los tratamientos se llevaron a cabo dentro de un invernadero, lo que implica que los factores climáticos externos no tuvieron influencia directa, lo que puede haber contribuido a una mayor eficiencia en el uso del agua. Señala que el consumo de agua del cultivo de maíz durante toda la fase vegetativa oscila entre 500 y 800 mm. Sin embargo, en el tratamiento 4 de nuestro estudio, el consumo de agua fue de 203.913 mm. Esta discrepancia puede atribuirse a las diferencias significativas en los factores climáticos de las zonas de estudio, así como a las condiciones controladas del invernadero que permiten una gestión más precisa del agua. El menor consumo de agua en nuestro estudio, comparado con los valores de su estudio sugiere que el uso de invernaderos podría ser una estrategia eficaz para optimizar el uso de recursos hídricos en el cultivo de maíz.

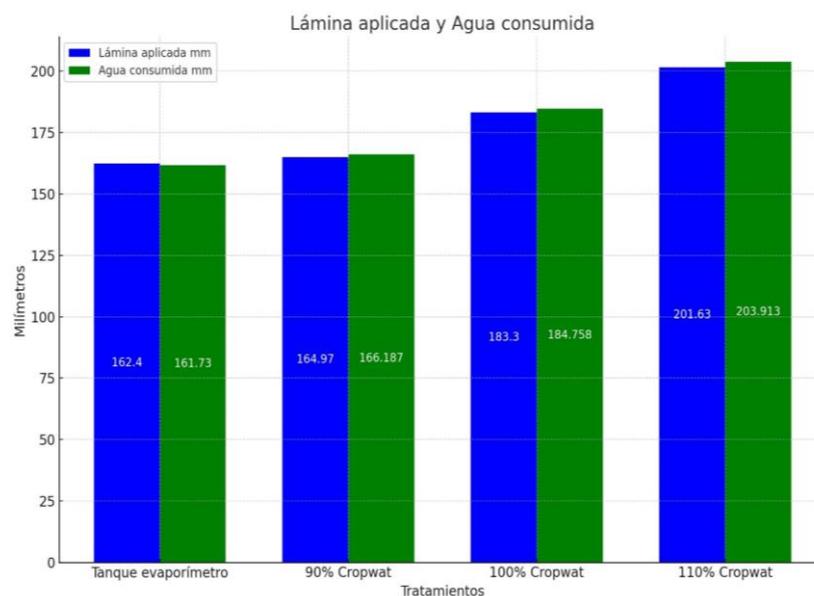


Figura 34. Lámina de agua aplicada y consumo de agua en los tratamientos.

V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió llegar a las siguientes conclusiones

- Medir el impacto de la lámina de agua aplicada sobre el consumo de agua, la humedad del suelo y el desarrollo del cultivo de maíz mediante el uso de la sonda de capacitancia TDR y el software CROPWAT. evidencian que la gestión eficiente del riego es crucial para optimizar el rendimiento y la sostenibilidad del cultivo de maíz, lo cual se reflejó en las diferencias significativas observadas entre los tratamientos aplicados.
- Las mayores láminas de agua (100% y 110% Cropwat) presentaron un mayor consumo de agua en comparación con el tanque evaporímetro y el 90% Cropwat. Esto implica que la disponibilidad de agua influye significativamente en la absorción hídrica del cultivo, favoreciendo su crecimiento y desarrollo.
- La media del porcentaje de humedad fue mayor en los tratamientos 100% y 110% Cropwat, indicando una mayor retención de agua en el suelo. Sin embargo, también se observó una mayor variabilidad en estos tratamientos, lo que sugiere la necesidad de un monitoreo continuo para evitar posibles excesos de humedad que puedan llevar a condiciones de anoxia.
- Los tratamientos con menor cantidad de agua aplicada (tanque evaporímetro y 90% Cropwat) mostraron una mayor longitud de raíces. Esto puede estar relacionado con una respuesta adaptativa del maíz en condiciones de déficit hídrico, desarrollando raíces más largas para acceder a reservas de agua en capas profundas del suelo.
- El diámetro y peso de mazorca fueron mayores en los tratamientos con 100% y 110% Cropwat, reflejando una correlación positiva entre la cantidad de agua aplicada y el rendimiento del cultivo. Sin embargo, es importante considerar el balance entre la cantidad de agua aplicada y la eficiencia en su uso para evitar desperdicios y maximizar la productividad.
- La investigación permite concluir en la importancia de aplicar estrategias de riego que consideren las necesidades específicas del cultivo de maíz y las características edafoclimáticas del área de cultivo. La implementación de tecnologías como la sonda de capacitancia TDR y el software CROPWAT proporciona herramientas precisas para la gestión del riego, permitiendo optimizar el uso del agua y mejorar el rendimiento del cultivo. Futuras investigaciones podrían enfocarse en la adaptación de estos métodos a diferentes condiciones

climáticas y tipos de suelo, así como en la evaluación de su impacto a largo plazo en la sostenibilidad agrícola.

VI. RECOMENDACIONES

- Implementar sistemas de monitoreo continuo utilizando sondas de capacitancia TDR para obtener datos precisos sobre el contenido de humedad del suelo en tiempo real. Esto permitirá ajustes inmediatos en la gestión del riego, optimizando el uso del agua y evitando excesos o déficits hídricos.
- Realizar calibraciones periódicas de las sondas TDR y otros equipos de medición para asegurar la precisión de los datos obtenidos. Asimismo, mantener y revisar regularmente estos equipos para evitar fallos que puedan comprometer la calidad de las mediciones.
- Basar la lámina de riego en las necesidades específicas del cultivo y las condiciones climáticas de la zona, utilizando herramientas como el software CROPWAT. Ajustar la cantidad de agua aplicada en las distintas fases fenológicas del maíz para maximizar la eficiencia del riego y el rendimiento del cultivo.
- Capacitar a los agricultores en el uso y manejo de tecnologías de monitoreo y software de gestión de riego. Proveer formación continua sobre técnicas de agricultura de precisión y manejo eficiente del agua para mejorar la productividad y sostenibilidad de los cultivos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Abanto, C., Farias, W., Martins, S., Lopes, J., & Ferreira, V. (2020). Calibration of frequency domain reflectometry sensors to estimate soil moisture in a Geric Xanthic Ferralsol. *Bioagro*. Obtenido de <https://revistas.uclave.org/index.php/bioagro/article/view/2696>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Obtenido de <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Álvarez, M., & Borja, N. (2022). Fluctuación poblacional del gusano Cogollero *Spodoptera Frugiperda* (J. E. Smith), en tres subsistemas de maíz, en la vereda Puerto Nuevo, municipio Fuente de Oro, Meta. *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0186-29792009000300009&script=sci_abstract
- Arango, E. (2020). *Análisis de la humedad del suelo en el cultivo de caña de azúcar en el Valle del Cauca con sensores de radar de apertura sintética (SAR)*. [Tesis de grado, Universidad Nacional abierta y a distancia]. Repositorio digital. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/36768>
- Atanacio, N. (2022). Determinación del contenido de agua de sustratos con sondas electromagnéticas. [Tesis de grado] Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. *Repositoio digital*. Obtenido de <https://oai.uaaan.mx/handle/123456789/48501>
- Bejar, S., Cantú, I., Yáñez, M., & Luna, E. (2020). Curvas de retención de humedad y modelos de pedotransferencia en un Andosol bajo distintos usos de suelo. *Revista de investigación*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322020000300031
- Caicedo, L., Méndez, F., Gutiérrez, E., & Flores, J. (2021). Medición de humedad en suelos, revisión de métodos y características. *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/351286246_Medicion_de_humedad_en_suelos_Revision_de_metodos_y_caracteristicas

- Cartagena, Y., Zambrano, J., Parra, R., Angamarca, M., Manguashca, J., Rivadeneira, J., & Velásquez, D. (2021). Evaluación del uso eficiente del agua en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) variedad INIAP 101, con diferentes niveles de fertilización. *Repositorio digital INIAP*. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5804#:~:text=El%20requerimiento%20de%20agua%20del,de%20grano%20las%20m%C3%A1s%20cr%C3%ADticas>.
- Contreras, M. (2022). *Generación de un protocolo para el uso de sonda tdr en calicata, en el manejo del riego en uva de mesa. [Tesis de grado, Universidad de Chile]*. Repositorio academico. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/196261>
- Deras, H. (2020). Guía técnica: el cultivo de maíz. *IICA*. Obtenido de <https://repositorio.iica.int/handle/11324/11893>
- Diego, A., Tapia, A., & Milán, P. (2022). Calibración y caracterización de sensores capacitivos de bajo coste para la monitorización de humedad de suelo. *Universidad Loyola*. Obtenido de <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/31462>
- FAO. (1987). Directrices para el diseño y evaluación de sistemas de riego superficial. *FAO*. Obtenido de <https://www.fao.org/4/T0231E/t0231e05.htm#TopOfPage>
- FAO. (2022). Datos estadísticos FAOSTAT. *FAO*. Obtenido de <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- Figarola, A., Ghersa, F., Castro, R., & Ferraro, D. (2020). Automatización del modelo de simulación de cultivos DSSAT para evaluar el desempeño productivo bajo distintas estrategias de manejo y escenarios ambientales [Universidad de Buenos Aires]. *Repositorio institucional*. Obtenido de <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115512>
- Gisbert, J., Ibáñez, S., & Moreno, H. (2019). La textura del suelo. *SciELO*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/50839531_La_textura_del_suelo
- Guaman, I. (2022). Evaluación de la sonda tdr para el seguimiento de la humedad de un suelo franco bajo el cultivo de banano. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Machala]. *Repositorio digital*. Obtenido de <https://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/19715>
- Guamán, R., Desiderio, T., Villavicencio, Á., Ulloa, S., & Romero, E. (2020). Evaluación del desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) utilizando cuatro híbridos. *Revista SciELO*, 7(2), 47-56. doi:<https://doi.org/10.29166/siembra.v7i2.2196>.
- Guaña, M. (2019). *Determinación de Zonas Aptitudinales para los Cultivos de Maíz (zea mays), papa (solanum tuberosum) y Chocho (lupinus mutabilis), Mediante un Modelo Geográfico en la Parroquia de Alaquez. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6310>
- Hernández, A., Estrada, B., Rodríguez, R., García, J., Patiño, S., & Osorio, E. (2019). Importancia del control biológico de plagas en maíz (*Zea mays* L.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1665>

- Kirkegaard, J., Kirkby, C., Oates, A., Poile, G., & Conyers, M. (2020). Strategic tillage of a long-term, no-till soil has little impact on soil characteristics or crop growth over five years. *CSIRO*. Obtenido de <https://www.publish.csiro.au/cp/cp20334>
- Llanqui, A., & Taype, J. (2019). Efecto de microorganismos eficientes (EM) en la asimilación [Tesis de grado, Universidad Daniel Alcides Carrión]. *Repositorio Digital*. Obtenido de http://45.177.23.200/bitstream/undac/2013/1/T026_43443545_T.pdf
- Mamani, H., & Paz, S. (2022). *Control de humedad en suelos heterogéneos de infraestructura vial aplicando sensor capacitivo, Cusco, 2021. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]*. Repositorio digital. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/93112>
- Marín, F., García, R., & Barrezueta, S. (2020). Resultados de la aplicación de biochar obtenido de residuos de banano y cacao, en el cultivo del maíz. *Revista Científica Agroecosistemas*. Obtenido de <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/404>
- Monterroso, A., & Gómez, J. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100105&script=sci_arttext
- Palomino, E. (2021). “Análisis correlacional de resistividad y capacitancia con contenido de humedad en arcilla, arena y material base de pavimento, Cusco 2021” [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio digital. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/80395>
- Portilla, F., & Martínez, M. (2021). *Análisis comparativo entre la humedad gravimétrica y la humedad determinada con sensores electrónicos en suelos granulares del cantón Ambato. Provincia de Tungurahua. [Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato]*. Repositorio institucional. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/32494>
- Rabanal, M., & Medina, A. (2020). Evaluación del rendimiento, características morfológicas y químicas de variedades del maíz morado (*Zea mays* L.) en la región Cajamarca-Perú. *Redalyc*. doi:<https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.829>
- Ramírez, O., Escobar, J., Maldonado, M., Rojas, A., Hernández, E., & Valenzuela, J. (2021). Calidad de mazorca y grano en maíces criollos de la Costa Chica, Guerrero. *Revista Mexicana de ciencias Agrícolas*, 11(spe 24). doi:<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2374>
- Reyes, C. (2018). Los requerimientos hídricos del maíz. *Revista Panorama* . Obtenido de <https://panorama-agro.com/?p=2990>
- Roca, C. (2019). Respuesta agronómica de tres híbridos de maíz sembrados a dos distancias en la parroquia La Esperanza del cantón Quevedo. *Universidad Técnica Estatal de Quevedo*. Obtenido de <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3631>
- Rodríguez, E., Placeres, Z., & Cisneros, E. (2023). Necesidades hídricas del frijol para las condiciones de “Laguna Blanca”, Cuba. *Revista ingeniería agrícola*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/5862/586275348002/>

- Ruiz, J., Flores, H., Ramirez, G., & Medina, M. (2020). Requerimientos agroecológicos de los cultivos. *ResearchGate*. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Jose-Ruiz-Corral/publication/343047223_REQUERIMIENTOS_AGROECOLOGICOS_DE_CULTIVOS_2da_Edicion/links/5f1310e04585151299a4c447/REQUERIMIENTOS-AGROECOLOGICOS-DE-CULTIVOS-2da-Edicion.pdf
- Salgado, S., Fenech, L., & Espinoza, F. (2007). Eficiencia en el uso del agua en maíz (*Zea Mays* L.) con riego por goteo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93216308>
- Stivers, L. (2023). Introducción a los Suelos: La Calidad de los Suelos. *PennState Extension*. Obtenido de <https://extension.psu.edu/introduccion-a-los-suelos-la-calidad-de-los-suelos#:~:text=Los%20suelos%20arenosos%20tienen%20muy,capacidad%20de%20retenci%C3%B3n%20muy%20alta>.
- Valdivieso, V. (2013). Efecto de cuatro laminas de riego por goteo sobre la producción del cultivo de maíz duro (*Zea Mays*), según la evaporación del tanque evaporímetro clase A [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Loja]. *Repositorio institucional*. Obtenido de <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11486>
- Vásconez, G., Caicedo, L., Véliz, D., & Sánchez, F. (2021). Producción de biomasa en cultivos de maíz: Zona central de la costa de Ecuador. *Revista de ciencias sociales*. Obtenido de <https://produccioncientificaluz.org/index.php/racs/article/view/36528>
- Zambrano, J., Velásquez, J., Peñaherrera, D., Sangoquiza, C., Cartagena, Y., & Villacrés, E. (2021). Guía para la producción sustentable de maíz en la Sierra ecuatoriana. *INIAP*. Obtenido de <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5796/1/GUIA%20CULTIVO%20DE%20MAIZ%202021-1.pdf>
- Zambrano, M., Chavarría, J., & Duicela, L. (2021). Evaluación multianual de las variables climatológicas y su relación con el balance hídrico para el cultivo de maíz duro. *SciELO*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-78902021000400021&script=sci_arttext
- Zelaya, C., & Rodríguez, J. (2021). Estimación de la reducción porcentual en rendimientos en los cultivos de maíz y frijol. Guía metodológica - Módulo II diplomado. *SIDALC*. Obtenido de <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-cgspace-10568-113242/Description>

VIII. ANEXOS

Consumo de agua mm	Tanque evaporímetro	90% Cropwat	100% Cropwat	110% Cropwat
Fase inicial	25.25	33.73	40.23	41.12
Fase de desarrollo	72.33	64.84	69.80	78.61
Fase media	54.88	53.86	60.25	65.24
Fase final	11.26	10.11	10.10	12.09

Consumo de agua por fase vegetativa

Consumo de agua mm	Tanque evaporímetro	90% Cropwat	100% Cropwat	110% Cropwat
Fase inicial	25.41	34.56	38.40	42.24
Fase de desarrollo	71.38	65.34	72.60	79.86
Fase media	54.64	54.81	60.90	66.99
Fase final	10.96	10.26	11.40	12.54

Lámina de agua por fase vegetativa

Consumo de agua mm	Tanque evaporímetro	90% Cropwat	100% Cropwat	110% Cropwat
Fase inicial	29.15	27.95	28.55	28.43
Fase de desarrollo	28.68	28.20	29.95	29.05
Fase media	28.55	28.68	30.28	29.93
Fase final	28.40	28.75	30.93	30.15

Contenido de humedad por fase vegetativa

Tanque evaporímetro	90% Cropwat	100% Cropwat	110% Cropwat
25.8	21.5	16	19.75
26.4	18.6	15	19.57
25.2	19.9	17.1	18.56
24.5	20.1	19.1	17.98
26.3	22.8	19.4	19.56
20.8	22.1	17.4	21.48
23.1	24.9	18.54	18.74
25.4	20.4	20.54	18.30
26.4	33.5	21.87	18.20
25.6	31	19.97	19.10
24.75	18.1	20.54	17.87
23.52	16.2	24.65	21.90
26.2	25.3	21.54	19.62
23.95	16.5	18.74	19.47
25.65	27.2	19.58	17.58

Longitud de raíces

Fecha	ETO 2 DIAS	FECHA	Tanque evaporímetro	90% Cropwat	100% Cropwat	110% Cropwat
29-mar	3.5	29-mar	3.07	3.42	3.80	4.18
31-mar	2.5	31-mar	2.19	3.42	3.80	4.18
2-abr	4.5	2-abr	2.63	3.42	3.80	4.18
4-abr	3.5	4-abr	3.51	3.42	3.80	4.18
6-abr	3.5	6-abr	2.63	3.42	3.80	4.18
8-abr	3	8-abr	3.07	3.42	3.80	4.18
10-abr	2.5	10-abr	2.19	3.51	3.90	4.29
12-abr	3.5	12-abr	1.75	3.51	3.90	4.29
14-abr	3.5	14-abr	2.19	3.51	3.90	4.29
16-abr	2	16-abr	2.19	3.51	3.90	4.29
18-abr	3.5	18-abr	4.25	3.51	3.90	4.29
20-abr	4.5	20-abr	3.21	3.69	4.10	4.51
22-abr	5.5	22-abr	4.24	3.87	4.30	4.73
24-abr	4	24-abr	3.77	3.87	4.30	4.73
26-abr	2.5	26-abr	4.71	3.87	4.30	4.73
28-abr	2.5	28-abr	4.71	3.87	4.30	4.73
30-abr	2.5	30-abr	4.50	4.05	4.50	4.95
2-may	3	2-may	5.65	4.23	4.70	5.17
4-may	5	4-may	4.71	4.23	4.70	5.17
6-may	3.5	6-may	4.71	4.23	4.70	5.17
8-may	3	8-may	4.62	4.23	4.70	5.17
10-may	3	10-may	3.45	4.32	4.80	5.28
12-may	2.5	12-may	5.65	4.41	4.90	5.39
14-may	3	14-may	5.65	4.32	4.80	5.28
16-may	2.5	16-may	3.77	4.32	4.80	5.28
18-may	4	18-may	3.77	4.32	4.80	5.28
20-may	3.5	20-may	2.83	4.23	4.70	5.17
22-may	5	22-may	4.71	4.14	4.60	5.06
24-may	4	24-may	3.77	4.14	4.60	5.06
26-may	2	26-may	3.77	4.14	4.60	5.06
28-may	4.5	28-may	4.71	4.14	4.60	5.06
30-may	4.5	30-may	3.77	4.14	4.60	5.06
1-jun	3	1-jun	3.77	3.87	4.30	4.73
3-jun	2.5	3-jun	2.83	3.87	4.30	4.73
5-jun	3.5	5-jun	3.77	3.87	4.30	4.73
7-jun	4	7-jun	3.77	3.87	4.30	4.73
9-jun	1.5	9-jun	4.71	3.87	4.30	4.73
11-jun	4	11-jun	3.77	3.51	3.90	4.29
13-jun	2	13-jun	4.71	3.51	3.90	4.29
15-jun	2.1	15-jun	3.77	3.51	3.90	4.29
17-jun	5.4	17-jun	4.22	3.51	3.90	4.29
19-jun	3.5	19-jun	3.37	3.51	3.90	4.29
21-jun	2.5	21-jun	3.37	3.24	3.60	3.96

Evaporación y lámina de riego cada 2 días



Siembra del cultivo



Sonda de capacitancia TDR



Longitud de raíces



Producción tratamiento 4



Producción tratamiento 3



Producción tratamiento 2



Producción tratamiento 1